



## **Popiół lotny w budownictwie. Badania wytrzymałościowe gruntów stabilizowanych mieszką popiołowo-cementową**

*Jarosław Filipiak*  
*Politechnika Koszalińska*

### **1. Wprowadzenie**

Polska jest krajem, w którym podstawowym źródłem energii jest węgiel. W efekcie spalania węgla kamiennego i brunatnego w elektrowniach i elektrociepłowniach powstają odpady paleniskowe składające się głównie z popiołów lotnych i żużla. Popioły lotne powstają ze spalania zmielonego węgla w paleniskach bezrusztowych, przy przeciętnej temperaturze 1000÷1100°C. Są one wychwytywane ze strumienia spalin w drodze z paleniska do komina [6]. Popiołami lotnymi nazywa się tę część odpadów, w których zawartość ziaren mineralnych mniejszych od 0,075 mm jest w przewadze, tzn. powyżej 50% [BN/79/6732.09]. Popiół lotny jest unikatowym i uniwersalnym materiałem, który wciąż jeszcze czeka na pełne wykorzystanie w wielu gałęziach przemysłu. W pracy przedstawiono metodologię i wyniki badań wzmacniania gruntów organicznych mieszką cementowo-popiołową, wykorzystując popiół lotny z Elektrowni Bełchatów, pracującej na węglu brunatnym. Na wstępie

podano klasyfikację popiołów lotnych z uwagi na jego skład chemiczny. Omówiono możliwości stosowania popiołów w budownictwie. Przedstawiono metody wykorzystania takiego materiału do wzmocniania gruntów spoistych. W zasadniczej części pracy opisano badania laboratoryjne, których celem było określenie zmiany wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wzmocnionych popiołem próbek gruntu.

## 2. Skład chemiczny i klasyfikacja popiołów lotnych

Charakter i właściwości popiołu lotnego zależą od rodzaju paleniska, stopnia rozdrobnienia, temperatury spalania oraz rodzaju urządzeń do wychwytywania popiołów ze spalin. Jednakże właściwości tego materiału zależą przede wszystkim od składu chemicznego substancji niepalnej zawartej w węglu. We wszystkich rodzajach popiołów lotnych podstawowymi składnikami chemicznymi są tlenki: krzemu, glinu, żelaza, wapnia, magnezu, sody, potasu, oraz niespalony węgiel. Główne składniki popiołu  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  są przede wszystkim komponentami fazy szklistej popiołu. W związku z dużym zróżnicowaniem właściwości chemicznych popiołów lotnych pojawiła się konieczność wprowadzenia ogólnej ich klasyfikacji, ze względu na skład chemiczny.

**Tabela 1.** Podział popiołów lotnych na kategorie w zależności od składu chemicznego (według BN-79/6732.09)

**Table 1.** Breakdown of fly ash into categories depending on their chemical composition (according to standard BN-79/6732.09)

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

**Tabela 2.** Podział popiołów lotnych na kategorie w zależności od składu chemicznego (według Europejskiej Komisji Gospodarczej (ECE 1973))

**Table 2.** Breakdown of fly ash into categories depending on their chemical composition (according to the European Economic Commission (ECE 1973))

| Kategoria podziału | [SiO <sub>2</sub> ][ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ] | Zawartość CaO | Zawartość [SO <sub>3</sub> ] |
|--------------------|---|---------------|------------------------------|
| Grupa I            | ≥ 2   | < 15%         | –                            |
| Grupa II           | < 2   | < 15%         | < 3%                         |
| Grupa III          | –   | > 15%         | > 3%                         |
| Grupa IV           | –   | < 15%         | < 3%                         |

Poniżej przykładowo przedstawiono skład chemiczny popiołu elektrowni „Bełchatów” [4].

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 42,83 %, |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,50 %, |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,40 %,  |
| CaO                            | 23,43 %, |
| CaO wolne                      | 4,09 %,  |
| MgO                            | 23,43% , |
| SO <sub>3</sub>                | 4,30 %,  |
| K <sub>2</sub> O               | 0,24 %,  |
| straty prażenia                | 3,50 %   |

Z powyższego zestawienia wynika, że popiół z tej elektrowni można zaliczyć do popiołów wapniowych, a według podziału ECE do I Grupy. Także do tej grupy można zaliczyć prawie wszystkie popioły powstające w Polsce ze spalania węgla kamiennego.

Popioły lotne można także podzielić na dwie grupy w zależności od zawartości tlenu 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 mineralnego dodatku do cementu do wykazania właściwości hydraulicznych w obecności wody i wodorotlenku wapniowego*[1]). 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. Popioły ze spalania węgla poddawane są kompleksowym badaniom, opartych na standardach Europejskiej Agencji Chemikaliów (ECHA). Już dzisiaj potwierdzono naukowo i laboratoryjnie, że są one bezpieczne, nie zagrażają zdrowiu ludzi i zwierząt, nie stanowią też zwykle niebezpieczeństwa dla środowiska naturalnego. A w świetle tej wiedzy oraz obowiązujących nowych regulacji prawnych i idącymi za tym wymaganiami w zakresie ochrony środowiska utylizacja popiołów staje się koniecznością.

### **3. Wykorzystanie popiołów w budownictwie**

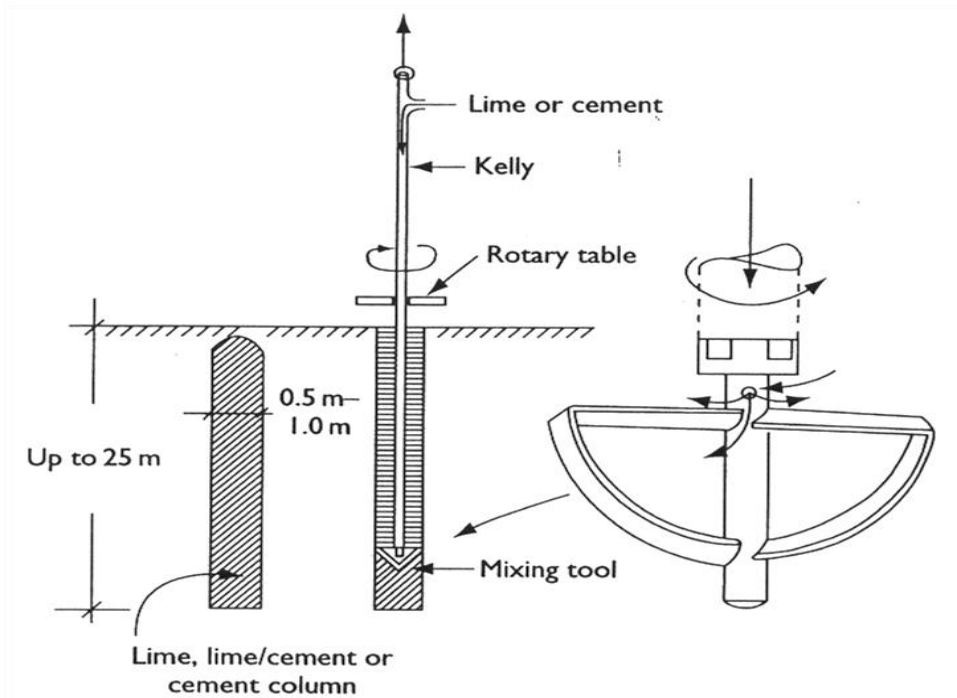
Popioły lotne są przetwarzane i wykorzystywane przez różne gałęzie przemysłu budowlanego. Na przykład unijne państwa tzw. starej piętnastki tylko w 32,6 procentach pożytkują przetwarzane popioły ze spalania węgla jako dodatki do betonów. Wprowadzenie norm i standardów regulujących procesy przetwarzania popiołów przyczyniło się do zaakceptowania produktów i materiałów wytwarzanych na bazie ubocznych produktów spalania (UPS) jako pełnowartościowych dla budownictwa. Poza oceną właściwości materiałów i ich przydatności, konieczne jest zwrócenie uwagi na formalną stronę zagadnienia. Uboczne produkty energetycznego spalania węgla są, co do zasady odpadami przemysłowymi, które podlegają przepisom ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach (DZ.U. Nr. 62, poz. 628). Popioły lotne i żużle są ujęte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów (DZ. U. Nr 112, poz 1206). Odpady ze spalania węgla kamiennego i brunatnego nie są zaliczone do odpadów niebezpiecznych. Istota wykorzystania UPS w całym sektorze budownictwa, w tym komunikacyjnym, sprowadza się przede wszystkim do oszczędności złóż surowców naturalnych, eliminuje też uciążliwe dla natury składowiska odpadów. Przetwarzanie i uszlachetnianie popiołów do formy materiału budowlanego jest zadaniem ośrodków badawczych i przemysłu.

słu. Ośrodki badawcze opracowały i wypracowują technologie odzyskiwania i przetwarzania ubocznych produktów spalania. Polska jest liderem pod względem rozwijania technologii wytwarzania produktów na bazie UPS dla drogownictwa. Popioły są używane do produkcji cementu czy materiałów klinkierowych, coraz częściej są również stosowane w budownictwie drogowym. [4, 7, 9]

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

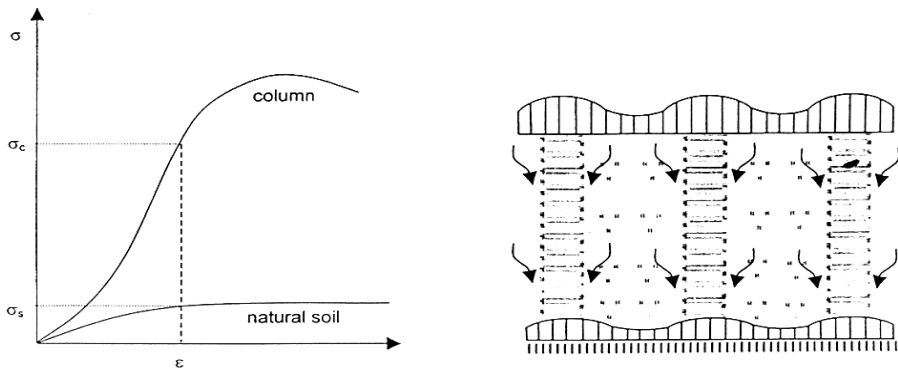
Popioły mogą być wykorzystywane do stabilizacji gruntów spoi-  
stych o dużym stopniu plastyczności, lub gruntów organicznych. Dodatek popiołu lotnego zmienia strukturę gruntu powodując w efekcie wzrost wytrzymałości na ścinanie i zmniejszenie odkształcalności. Jedną z nowoczesnych metod wzmocnienia gruntu jest metoda głębokiego mieszania (z ang. Deep Soil Mixing). Polega ona na tym, że rodzimy grunt miesza się z jednym lub z kilkoma stabilizatorami, często z cementem, wapnem lub innymi dodatkami, na przykład popiołami [8]. W metodzie DJM stosowane są dwa rozwiązania: pierwsze w postaci pionowych kolumn nazywanych popularnie kolumnami cementowo-wapiennymi oraz drugie w postaci tzw. masowej stabilizacji. Pierwsze rozwiązanie stosuje się w różnych warunkach gruntowych, natomiast drugie stosowane jest wyłącznie w gruntach organicznych, maksymalnie do głębokości 5 m.

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.



**Rys. 1.** Metoda wykonywania kolumn [5]

**Fig. 1.** Soil mixing proces [5]



**Rys. 2.** Idea współpracy kolumny z otaczającym gruntem [2]

**Fig. 2.** The geo-mechanical cooperation idea for deep stabilisation [2]

## 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 wzmocnionych 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 „Bełchatów”.

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[10], 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 soils used for investigations of stabilisation

| Rodzaj gruntu      | Barwa       | Wilgotność [%]                     | Gęstość objętościowa<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Klasa zawartości<br>węglanów | Zawartość części<br>organicznych I <sub>om</sub> [%] |
|--------------------|-------------|------------------------------------|--|------------------------------|--|
| Torf               | czarna      | 484 ÷ 581<br>w <sub>śr</sub> = 531 | 1,08 ÷ 1,15<br>ρ <sub>śr</sub> = 1,1         | III                          | 57,7 ÷ 69,5<br>I <sub>omśr</sub> = 64,6              |
| Namuł<br>gliniasty | brunatna    | 151 ÷ 176<br>w <sub>śr</sub> = 164 | 1,32 ÷ 1,49<br>ρ <sub>śr</sub> = 1,4         | IV                           | 19,1 ÷ 21,2<br>I <sub>omśr</sub> = 20,1              |
| Kreda<br>jeziorna  | jasno-szara | 78 ÷ 93<br>w <sub>śr</sub> = 86    | 1,41 ÷ 1,58<br>ρ <sub>śr</sub> = 1,5         | IV                           | 8,1 ÷ 8,9<br>I <sub>omśr</sub> = 8,4                 |

Ilości spoiwa oraz proporcje składników podano w tabeli 4. Doświadczenie zaplanowano jako eksperyment jednoczynnikowy: dla przyjętej wartości C/P zwiększano skokowo ilość stabilizatora.

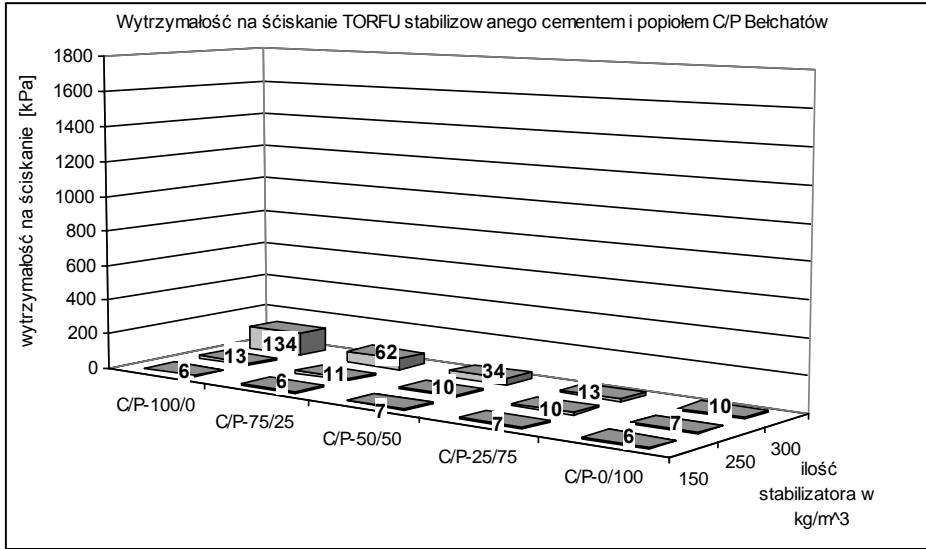
**Tabela 4.** Wykaz stabilizacji gruntów mieszanką cementowo-popiołową w zależności od ilości i rodzaju środka wzmacniającego

**Table 4.** List of stabilizations of soil with cement-ash mixture depending on amount and type of stabilisator

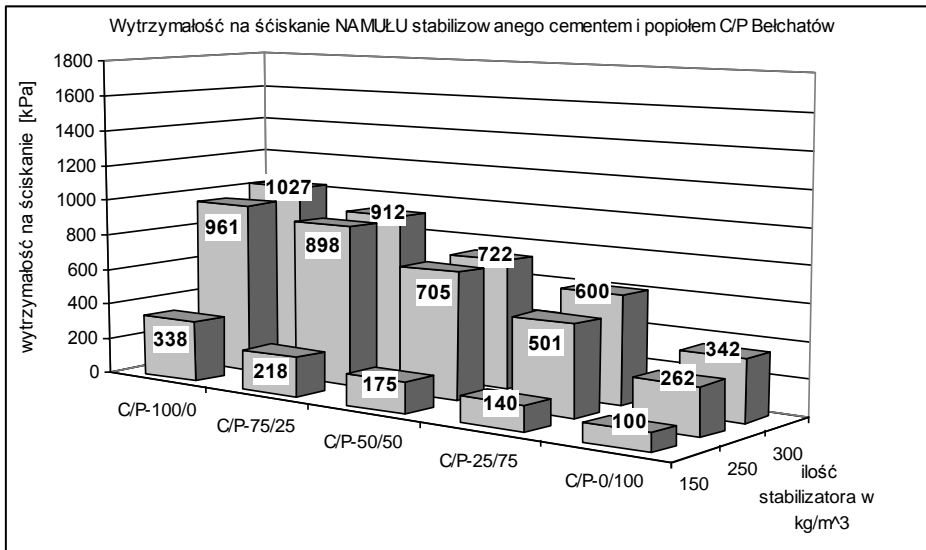
| Ilość stabilizatora<br>w kg na m <sup>3</sup> gruntu | Procentowy udział cementu<br>i popiołu C/P w mieszance stabilizującej |       |       |       |       |
|--|---|-------|-------|-------|-------|
|  | 100/0   | 75/25 | 50/50 | 25/75 | 0/100 |
| 150  | 10  | 10    | 10    | 10    | 10    |
| 250  | 10  | 10    | 10    | 10    | 10    |
| 300  | 10  | 10    | 10    | 10    | 10    |

Grunty ze stabilizatorem mieszano ręcznie przez dwie minuty, w celu równomiernego wymieszania stabilizatora z gruntem. Homogeniczną masę ulepszanego gruntu układano do plastikowych tub o średnicy 40 mm i wysokości 100 mm. Tak przygotowane próbki przechowywano w środowisku wodnym, w pozycji pionowej, pod obciążeniem około 18 kPa [3]. Próbki gruntu po 28 dniach dojrzewania poddano badaniom wytrzymałości na ściskanie. Badania wytrzymałości na ściskanie wykonano w aparacie trójosiowego ściskania bez naprężeń bocznych (tzw. jednoosiowe ściskanie), w aparacie AT – 2. Wszystkie próbki badano z jednakową prędkością 10 mm/min. Do wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie przyjęto maksymalną wartość odkształcenia dynamometru, uzyskiwaną w chwili zniszczenia próbki [3].

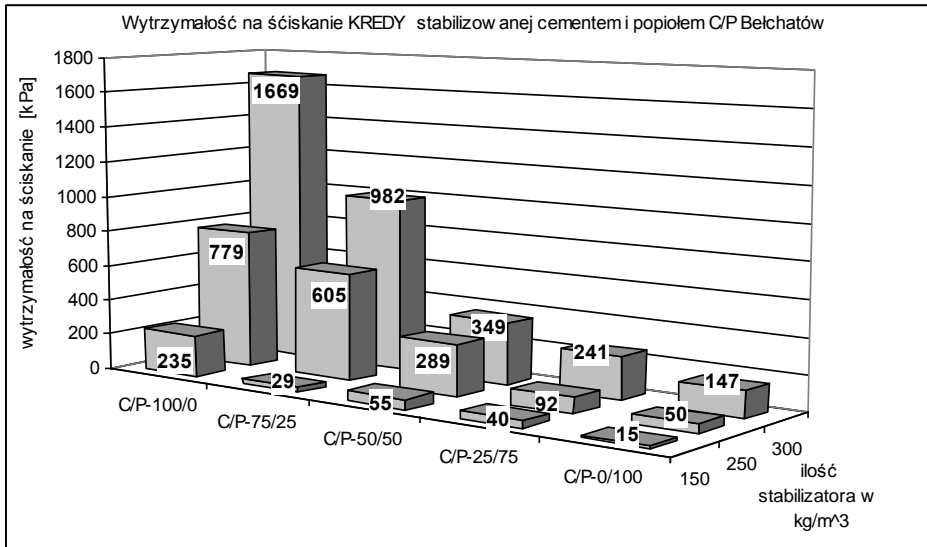




**Rys. 3.** Zmiana wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego torfu  
**Fig. 3.** Compression strength of stabilised peat



**Rys. 4.** Zmiana wytrzymałości na ściskanie stabilizowanego namułu gliniastego  
**Fig. 4.** Compression strength of stabilised clayey mud



**Rys. 5.** Zmiana wytrzymałości na ściskanie stabilizowanej kredy jeziornej  
**Fig. 5.** Compression strength of stabilised bog lime

Rezultaty badań próbek torfu, namułu gliniastego i kredy jeziornej stabilizowanych mieszanką cementowo popiołową przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3, 4 i 5. Wartości wytrzymałości podane na wykresach są wartościami średnimi z 10 próbek dla każdej kombinacji wg tabeli 4. Z ich analizy wynika, że wraz ze wzrostem ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu oraz wraz ze wzrostem ilości cementu w mieszance stabilizującej następuje wzrost wytrzymałości na ściskanie. Natomiast w przypadku zastosowania tej samej ilości cementu, dodatek popiołu do mieszanki powoduje wzrost wytrzymałości wzmocnianego gruntu. Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że mieszanki popiołowo cementowe można z powodzeniem stosować w badanych gruntach do wykonania tzw. kolumn cementowo wapiennych. Przy średnicy kolumny wynoszącej 0,5 m, na każdy metr wykonanej kolumny zutilizuje się 30 kg popiołu lotnego.

## 6. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Popioły lotne wraz z dodatkiem cementu mogą być stosowane do stabilizacji torfów, namułu gliniastego i kredy jeziornej z okolic Koszalina i Szczecinka.
2. Zastosowanie popiołów lotnych do wzmocnienia podłoża gruntowego stanowi istotny krok w kierunku ograniczenia zanieczyszczenia środowiska magazynowaniem tych odpadów.
3. Wraz ze wzrostem ilości stabilizatora na metr sześcienny gruntu oraz wraz ze wzrostem ilości cementu w mieszance stabilizującej następuje wzrost wytrzymałości ośrodka na ściskanie.
4. W przypadku zastosowania tej samej ilości cementu, dodatek popiołu do mieszanki powoduje wzrost wytrzymałości wzmacnianego gruntu.

## Literatura

1. **Czarnecki L.:** *Chemia w budownictwie*. Arkady. 1996.
2. EuroSoilStab: Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils. 2004.
3. **Filipiak J.:** *Wzmacnianie gruntów organicznych mieszanką cementowo-wapienną*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. 2003.
4. **Lukasik S.:** *Problemy składowania i zagospodarowania żużli i popiołów*. Sesja jubileuszowa ITB 2007.
5. **Moseley M. P. & Kirsch K.:** *Ground Improvement*. 2<sup>nd</sup> edition Spon Press Taylor & Francis Group. 2005.
6. **Pachowski J.:** *Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym*. WKiŁ Warszawa 1976.
7. **Serbeńska A.:** *Szare na złote*. Portal drogowy 2010.
8. **Werno M.:** *Opracowanie podstaw stosowania technologii wzmacniania gruntu za pomocą kolumn cementowo-wapiennych dla potrzeb budownictwa drogowego*. Wydawnictwa wewnętrzne Instytutu Morskiego. Gdańsk 1999.
9. **Quant B.:** Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Wodne nr 44, 1997.
10. Norma PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.

## **Fly Ash in Construction Industry. Strength Tests of Soil Stabilized with Mixture of Ash and Cement**

### **Abstract**

The part of the waste from coal combustion process, in which the mineral grains smaller than 0.075 mm are in advantage, i.e. more than 50% is called fly ash [BN/79/6732.09]. Fly ash is a unique and universal material, which is still waiting for full use in many industries. The paper presents the methodology and results of stabilization of organic soil mixture with cement-water-ash, using fly ash from the Bełchatów Power Station, working on brown coal. At first classification of fly ash due to its chemical composition is given. Possibility of the use of ash in construction is discussed. The paper presents methods of using such material for strengthening the soils. Main part of the paper describes the laboratory tests aimed at determining changes of uniaxial compressive strength of soil samples reinforced with ash.

The paper presents methodology and results of investigations of organic soils reinforcement from Koszalin, Szczecinek area. Peat, bog lime and clayey mud have been tested regarding their usefulness for reinforcement using cement-fly ash admixture. Physical soil properties have been examined as well as compression strength. The admixture contained 0/100, 75/25, 50/50, 25/75, 100/0 of cement/fly ash and it has been added in amounts of 150, 250 and 300 kg/m<sup>3</sup>. Stabilized soil samples matured for 28 days. The compression strength is presented in Figs. 3, 4 and 5.