



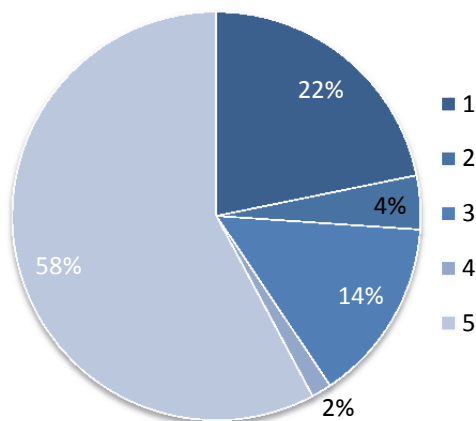
## **Produkt spalania komunalnych osadów ściekowych jako grunt antropogeniczny**

*Katarzyna Zabielska-Adamska*  
*Politechnika Białostocka*

### **1. Wstęp**

„Krajowy plan gospodarki odpadami 2014” uchwalony przez Radę Ministrów w dniu 24 grudnia 2010 roku [26] zakłada, jako jeden z podstawowych celów w gospodarce komunalnymi osadami ściekowymi, zwiększenie ilości osadów przekształcanych metodami termicznymi. Realizacja celu wymaga wzrostu masy osadów przekształcanych termicznie w cementowniach, kotłach energetycznych oraz spalarniach komunalnych osadów ściekowych.

W Polsce spalanie osadów ściekowych wciąż budzi wiele kontrowersji [28] z powodu emisji tlenków azotu, metali ciężkich i innych szkodliwych substancji, wymuszających kosztowne inwestycje do oczyszczania gazów spalinowych. Na rysunku 1 pokazano procentowe wykorzystanie w Polsce komunalnych osadów ściekowych, wyprodukowanych w roku 2009 w ilości 563 tys. ton, według EUROSTAT [9]. Spalanie osadów ściekowych stanowiło jedynie 2% całkowitej produkcji odpadów. Należy zaznaczyć, że do 30 czerwca 2010 roku istniały w Polsce jedynie trzy spalarnie komunalnych osadów ściekowych [26] o łącznej wydajności 37 300 Mg/rok, podczas gdy już w na początku XXI wieku w krajach europejskich, takich jak: Holandia, Szwajcaria, Austria, Belgia, Wielka Brytania i Niemcy spalanie stanowiło znaczącą część zagospodarowania osadów ściekowych, przekraczając w przypadku Holandii, Szwajcarii i Austrii połowę całkowitej ilości wykorzystywanych osadów [9]. W USA i Japonii spalanie sięgało odpowiednio 25 i 55% całkowitej ilości osadów [29].



**Rys. 1.** Procentowe wykorzystanie komunalnych osadów ściekowych w Polsce w 2009 roku [9]: 1 – wykorzystanie rolnicze, 2 – kompostowanie i inne zastosowania, 3 – składowanie, 4 – spalanie, 5 – inne

**Fig. 1.** Percentage disposal of sewage sludge in Poland in 2009 [9]: 1 – agricultural use, 2 – composting and other applications, 3 – landfill, 4 – incineration, 5 – others

Odpady ze spalania osadów ściekowych, klasyfikowane jako odpady inne niż niebezpieczne [2], nie powinny być wykorzystywane w środowisku bez wcześniejszego przetworzenia. W Polsce i na świecie najczęściej podejmowane są satysfakcjonujące próby wykorzystania odpadów do konstrukcji betonowych jako zamiennika części cementu lub kruszywa [4, 6, 12]. Jako kruszywo mogą być także wykorzystane odpady ze spalania osadów ściekowych modyfikowane za pomocą witrifikacji [31]. W geoinżynierii przeprowadzono badania zastosowania odpadów do stabilizacji słabo nośnego podłoża z gruntów spoistych w stosunku 4:1 z cementem lub wapnem hydratyzowanym [5, 15].

Według Ustawy o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku [27] przez przetwarzanie (przekształcanie) rozumie się procesy odzysku lub unieszkodliwiania. Odzysk jest to „proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów”. Przez unieszkodliwianie odpadów rozumie się „proces niebędący odzyskiem, nawet jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii”. Należy zatem dążyć do tego, aby termiczne przekształcanie osadów ściekowych nie było jedynie unieszkodliwianiem odpadów, a poprzez wykorzystanie produktu spalania ko-

munalnych osadów ściekowych prowadziło do „użytecznego zastosowania” na przykład w zastosowaniach geoinżynierskich, podobnie jak uboczne produkty spalania węgla czy odpady hutnicze [33, 35].

Celem pracy jest przedstawienie właściwości geotechnicznych przekształconych termicznie w spalarni w Łomży komunalnych osadów ściekowych i wykazanie, że mogą być one rozważane jako substytut gruntów mineralnych. Do określenia właściwości produktu spalania osadów ściekowych przyjęto metodykę badań stosowaną w badaniach gruntów budowlanych, modyfikując ją stosownie do potrzeb badawczych. Program badań obejmuje cechy niezbędne dla określenia przydatności odpadów do robót ziemnych w budownictwie drogowym według PN-S-02205:1998 [23].

## 2. Spalanie osadów ściekowych w Łomży

Spalarnia komunalnych osadów ściekowych w MPWiK w Łomży, z której pobrano odpady do badań własnych, została uruchomiona w grudniu 2007 roku, jako trzecia polska spalarnia po Dębogórze – 1998 r. i Nowym Targu – 2000 r. (zamknięta w 2009 r.). Wykorzystano tu technologię spalania osadów ściekowych w piecu z mechanicznym rusztem ruchomym. Instalacja spalarni o niewielkiej wydajności 7000 Mg/rok jest w pełni zautomatyzowana i przeznaczona do pracy ciągłej, z odzyskiem ciepła spalania wykorzystywanym do suszenia osadów. W trakcie realizacji inwestycji, w celu zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych związanych z oczyszczaniem spalin, podjęto decyzję o współspalaniu osadów z domieszką biomasy w postaci tartacznych trocin drzewnych [25]. Należy tu dodać, że utrzymanie wysokiej temperatury oraz czasu spalania/dopalenia jest konieczne, aby spaliny opuszczające piec charakteryzowały się niską zawartością substancji organicznych, zwłaszcza dioksyn i furanów, oraz tlenków azotu. Temperatura procesu zależy bezpośrednio od wartości opałowej osadów ściekowych, która wynosi jedynie 13,57 MJ/kg [7, 16]. Dodatek trocin pozwala na zwiększenie kaloryczności opału.

Instalacja składa się z trzech zasadniczych układów technologicznych [14]:

- niskotemperaturowej instalacji do suszenia osadów,
- instalacji termicznej mineralizacji osadu,
- instalacji oczyszczania gazów wylotowych.

Osady ściekowe po beztlenowej fermentacji, odwodnione na wirówce do wilgotności około 80%, podawane są przy pomocy pompy tłokowej do niskotemperaturowej suszarni taśmowej. Suchy granulatu osadowy o wilgotności do 20% kierowany jest do zbiornika buforowego. Następnie uruchamiany jest kocioł wodny z rusztem mechanicznym do termicznej mineralizacji wraz z płynnym włączeniem gazowego kotła rozruchowego. W komorze paleniskowej spalanie ma miejsce w temperaturze wyższej niż 600°C, a dopalanie w części górnej następuje w temperaturze powyżej 850°C. Spaliny kierowane są do odpylania suchego, po czym trafiają do instalacji mokrego odsiarczania wykonanej w oparciu o wodny roztwór węglanu sodu i złożu fluidalnego. Susz osadowy wraz z gazem ziemnym stanowią paliwo do produkcji ciepła technologicznego, które w postaci wody o temperaturze 90° przesyłane jest do instalacji suszenia odpadów. W suszarni i piecu następuje około 14-krotne zmniejszenie masy odpadów z osadu ściekowego. Mieszanina żużla i popiołu, odbierana w stanie nawilżonym, jest kierowana na składowisko.

### **3. Charakterystyka składu mineralnego i chemicznego badanych odpadów**

Spalanie osadów ściekowych różni się od spalania klasycznych paliw dużą zawartością wody w spalanych osadach, co wpływa na charakterystykę otrzymywanych produktów spalania. Powęglowe popioły lotne zawierają fazy amorficzne (szkliwa) i krystaliczne (głównie kwarc, mullit, magnetyt i hematyt). W wysokiej temperaturze spalania 1500–1700°C tworzą się wewnątrz puste ziarna kuliste [34]. Osady ściekowe składają się w jednej trzeciej z materii nieorganicznej, która po spalaniu w temperaturze 800–900°C tworzy cząstki popiołu [8]. W odpadach dominują ziarna nieregularne o mocno rozbudowanej powierzchni. Ziarna sferyczne lub prostopadłościennie są niezwykle rzadkie [12]. Fazy krystaliczne tworzą: kwarc, w niektórych przypadkach fosforan wapnia (whitlockite lub hydroksyapatyt), siarczan wapnia, tlenki żelaza i skalenie. Faza amorficzna stanowi od 50 do 74% całości popiołu [6].

Skład chemiczny odpadów ze spalania osadów ściekowych w Łomży podano za Kosior-Kazberuk [12, 13]. W tabeli 1 pokazano podstawowy skład odpadów w porównaniu do popiołu ze spalania osadów w złożu fluidalnym i odpadów energetycznych ze spalania węgla

kamiennego, a w tabeli 2 – zawartość pierwiastków śladowych w odpadach w porównaniu do gleb niezanieczyszczonych.

Podstawowy skład chemiczny odpadów ze spalania osadów ściekowych w piecach rusztowych nie odbiega od wartości średnich dla osadów spalanych w piecach fluidalnych. W porównaniu do odpadów energetycznych z węgla kamiennego skład odpadów odpowiada żużłowi, wyższe są zawartość fosforu i straty prażenia. Odpady o wysokiej zawartości wapnia charakteryzują się właściwościami pucolanowymi wzbudzonymi spoiwami hydraulicznymi [5, 15].

**Tabela 1.** Zawartość podstawowych związków chemicznych w odpadach, w %  
**Table 1.** The content of basic compounds in wastes, in %

Oznaczenie [%]	Odpady ze spalania osadów ściekowych		Odpady energetyczne z węgla kamiennego [34]	
	Popiół ze spalania w złożu fluidalnym [6]*	Odpady z kotła rusztowego [12, 13]**	Mieszanka popiołowo-żużłowa	Żużel
Si jako SiO <sub>2</sub>	14,4–65,0–(36,1)	34,68	42,0–65,0	20–54,0
Al jako Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,4–34,2–(14,2)	6,32	15,05–28,0	10–35
Ca jako CaO	1,1–40,1–(14,8)	15,42	3,0–9,0	1–20
Fe jako Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,1–30,0–(9,2)	10,32	3,0–15,0	2–35
Mg jako MgO	0,02–23,4–(2,4)	2,65	0,73–8,0	0,3–6,0
S jako SO <sub>3</sub>	0,01–12,4–(2,8)	0,60	0,2–5,0	0,1–12,0
P jako P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3–26,7–(11,6)	18,17	0,082–1,0	0,1–1,0
Ti jako TiO <sub>2</sub>	0,3–1,9–(1,1)	0,41	0,6–1,9	0,5–1,5
Mn jako MnO	0,03–0,9–(0,3)	–	0,01–0,2	0,04
Na jako Na <sub>2</sub> O	0,01–6,8–(0,9)	0,70	0,093–8,0	0,35–4,00
K jako K <sub>2</sub> O	0,1–3,1–(1,3)	1,30	0,078–3,6	1,0–2,6
Straty prażenia	0,2–41,8–(6,1)	8,65	1,0–15,0	0,2

*Objaśnienia:* \*wartości: minimalna–maksymalna–(średnia); \*\* wartości wyznaczone dla odpadów z Łomży.

Wartości średnie zawartości pierwiastków śladowych w popiele z pieców fluidalnych są wyższe od ich udziału w glebach niezanieczyszczonych prawie we wszystkich przypadkach (tab. 1). W niektórych przypadkach są uważane za wysoce toksyczne z powodu zawartości metali ciężkich [10]. Udział badanych pierwiastków śladowych w odpadach ze spalania osadów w piecach rusztowych jest dużo niższy od ich zawartości w popiołach z pieców fluidalnych. Miedź i nikiel przekraczają jednak

zawartości w glebach niezanieczyszczonych, natomiast cynk przekracza ten zakres prawie 10-krotnie. Wyciągi wodne [2] z odpadów ze spalania osadów ściekowych charakteryzują się niską podatnością na wymywanie metali ciężkich, ze względu na wysoki odczyn  $\text{pH} = 8,55\text{--}11,29$ .

Odpady ze spalania osadów ściekowych, pomimo poddania ich przetwarzaniu termicznemu, które uznawane jest za metodę likwidacji odorów [17], nadal charakteryzują się dość uciążliwym zapachem.

**Tabela 2.** Udział pierwiastków śladowych w porównaniu do gleb niezanieczyszczonych, w ppm

**Table 2.** Trace analysis compared to unpolluted soil, in ppm

Pierwiastek [ppm]	Odpady ze spalania osadów ściekowych		Zawartość w glebach niezanieczyszczonych [11]
	Popiół ze spalania w złożu fluidalnym [6]*	Odpady z kotła rusztowego [12]**	
Antymon	35–35–(35)	–	0,05–2
Arsen	0,4–726–(87)	–	0,2–16
Bar	90–14600–(4142)	–	175–520
Chrom	16–2100–(452)	85	7–150
Cyna	183–617–(400)	–	1–2
Cynk	1084–10000–(3512)	1119	30–125
Kadm	4–94–(20)	<0,375	0,2–1,05
Kobalt	19–78–(39)	–	0,1–>100
Mangan	300–9000–(3000)	–	100–1300
Miedź	200–5420–(1962)	357	1–140
Nikiel	79–2000–(671)	65	4–50
Ołów	90–2055–(600)	26	25–40
Stront	539–539–(539)	–	5–1000
Wanad	14–66–(35)	–	15–115

Objaśnienia: \*wartości: minimalna–maksymalna–(średnia); \*\* wartości wyznaczone dla odpadów z Łomży.

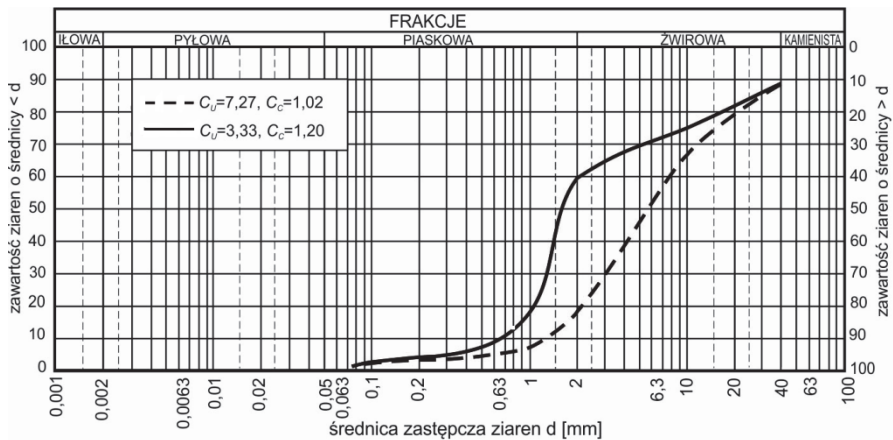
## 4. Właściwości geotechniczne odpadów – badania własne

### 4.1. Uziarnienie

Skład granulometryczny oznaczono na podstawie analizy sitowej, służącej do określenia procentowej masy ziaren pozostających na sitach w stosunku do całkowitej masy badanej próbki dla ziaren i cząstek o średnicach  $> 0,071$  mm. Badanie uziarnienia wykonano dla odpadów

wysuszonych do stałej masy w temperaturze 105–110°C, na próbkach pobranych metodą ćwiartowania z próby ogólnej. Otrzymany zakres składu granulometrycznego odpadów przedstawiono na rysunku 2.

Produkt spalania osadów ściekowych odpowiada uziarnieniem gruntem gruboziarnistym niespoistym od żwiru (Ż) do pospółki (Po) według PN-86/B-02480 [18], natomiast według klasyfikacji europejskiej PN-EN ISO 14688-2:2006 [22] odpowiada gruntem gruboziarnistemu od piasku przewarstwionego żwirem (grSa) do żwiru (Gr). Na podstawie wskaźnika jednorodności uziarnienia  $C_U$  (rys. 2) odpady należy ocenić od równoziarnistych do różnoziarnistych według PN-86/B-02480 [18], a według PN-EN 1997-2:2009 [21] od źle uziarnionych do dobrze uziarnionych. Ze względu na kształt krzywej ( $C_U$ ,  $C_C$ ) uziarnienia odpady prawie w całym zakresie można zakwalifikować jako materiał łatwo zagęszczalny, a tym samym przydatny do budowy nasypów.



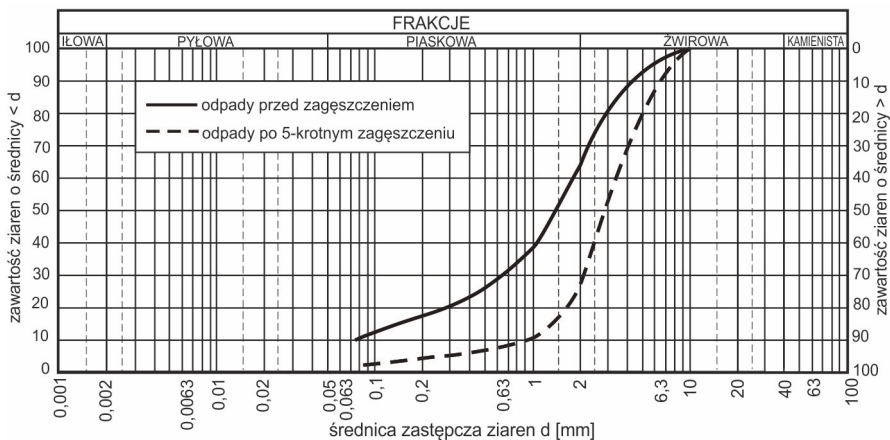
**Rys. 2.** Zakres uziarnienia badanych odpadów

**Fig. 2.** Graining range of tested waste

Przez wzgląd na prowadzenie badań na aparaturze do badań geotechnicznych o klasycznych wymiarach produkt spalania osadów ściekowych pobrany do badań zagęszczalności oraz badań parametrów mechanicznych rozkruszono i przesiano przez sito o bokach oczek kwadratowych 10 mm. Ze względu na podatność ziaren na kruszenie sprawdzono także jak zmieni się uziarnienie odpadów o ziarnach < 10 mm po ich 5-krotnym dynamicznym zagęszczaniu metodą standardową Proctora (II

metoda według PN-88/B-04481 [20]). Krzywe uziarnienia odpadów przed i po zagęszczaniu pokazano na rysunku 3.

Do oceny uziarnienia odpadów przewidywanych do wbudowania w nasypy drogowe, wykonano także oznaczenie wskaźnika piaskowego *WP*. Jest on procentowym stosunkiem objętości frakcji odpowiadających frakcjom piasku i częściowo żwiru do objętości całego badanego materiału po nasyceniu go odpowiednim roztworem zgodnie z normą BN-64/8931-01 [3]. Ze względu na gruboziarnistość odpadów badanie wykonano jedynie po 5-krotnym ubiciu tej samej próbki w cylindrze Proctora. Wartość średnia *WP* wynosi 75.



**Rys. 3.** Uziarnienie przesianych odpadów przed i po 5-krotnym zagęszczaniu  
**Fig. 3.** Graining of sieved waste before and after compaction repeated 5 times

Uziarnienie popiołów uzyskiwanych podczas spalania osadów w piecach fluidalnych różni się znacznie od odpadów z kotłów rusztowych. W przypadku popiołów z pieców fluidalnych średnice ziaren i cząstek zawierają się od 1 nm do około 700  $\mu\text{m}$ , a średnica zastępcza  $d_{50}$ , poniżej której znajduje się w odpadach 50% ziaren i cząstek zawiera się od 8 do 263  $\mu\text{m}$  [6, 8]. Badane odpady ze spalania w kotle z rusztem mechanicznym charakteryzują się dużo grubszym uziarnieniem, o najgrubszych ziarnach przekraczających 40 mm i  $d_{50}$  od 1,6 do 6 mm. Są zatem korzystniejszym materiałem z punktu widzenia zastosowań geotechnicznych.



Uziarnienie odpadów w stanie naturalnym oraz wartość wskaźników piaskowych po 5-krotnym zagęszczeniu kwalifikują badane odpady jako bardzo dobre podłoże nawierzchni drogowych według Wiłuna [30].

#### 4.2. Gęstość właściwa szkieletu

Oznaczenie gęstości właściwej szkieletu odpadów  $\rho_s$  wykonano zgodnie z PN-88/B-04481 [20] metodą piknometru (kolby) z użyciem wody i odpowietrzeniem za pomocą gotowania. Otrzymany zakres gęstości wyniósł 2,55–2,57 Mg/m<sup>3</sup>, a wartość średnia 2,56±0,02 Mg/m<sup>3</sup>.

Określone średnie gęstości właściwe szkieletu należy interpretować jako pozorną gęstość właściwą szkieletu – wraz z zamkniętymi porami. Gęstość właściwa szkieletu odpadów jest mniejsza niż gruntów mineralnych o zbliżonym uziarnieniu, która wynosi 2,65 Mg/m<sup>3</sup>, zatem badany odpad jest materiałem lekkim.

#### 4.2. Kapilarność bierna

Kapilarność bierną  $H_{kb}$  oznaczono według normy PN-60/B-04493 [19] jako wartość podciśnienia mierzonego w centymetrach słupa wody, przy którym powietrze przebija się przez próbkę gruntu. Wysokość podciśnienia jest uważana za istotny czynnik opisujący wrażliwość gruntów na działanie mrozu. Uzyskana wartość kapilarności biernej rozdrobnionych odpadów jest mniejsza niż 100 cm.

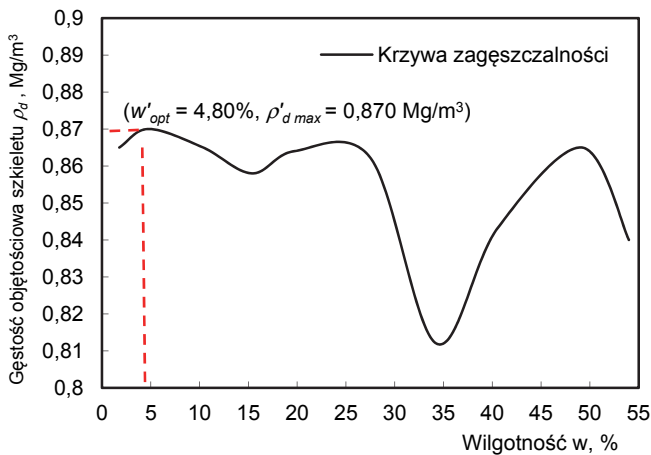
Badane odpady oceniane na podstawie kryterium wysadzinowości Wiłuna [30] zostały zakwalifikowane jako grunt niewysadzinowy. Odpady zagęszczane przy wilgotności zbliżonej do optymalnej, na podstawie wskaźnika nośności *CBR* oznaczonego po 4-dobowym nasączeniu próbek (pkt 4.4.2), również są oceniane jako grunt niewysadzinowy.

#### 4.3. Zagęszczalność badana metodą standardową Proctora

Laboratoryjne badanie zagęszczalności polega na zagęszczaniu w znormalizowany sposób gruntu przy różnych wilgotnościach  $w$  i naniesieniu otrzymanych wartości gęstości objętościowych szkieletu  $\rho_d$  na wykres obrazujący zależność  $\rho_d(w)$ . Wilgotność, przy której zagęszczany grunt uzyskuje maksymalną gęstość objętościową szkieletu  $\rho_{d\ max}$ , nazywa się wilgotnością optymalną  $w_{opt}$ . Badanie wykonano zgodnie z normą PN-88/B-04481 [20] wykorzystując ze względu na wielkość ziaren cylinder o pojemności 2,2 dm<sup>3</sup>. Odpady przesiano przed zagęszczaniem

przez sito o oczkach kwadratowych 10 mm. Ponieważ stwierdzono, że próbki odpadów zagęszczane wielokrotnie nie mogą być uważane za reprezentatywne, a laboratoryjne ustalanie parametrów zagęszczenia odpadów według PN-88/B-04481 [20], dopuszczającej nawet 5-krotne ubijanie tej samej próbki, prowadzi do błędnej oceny efektów zagęszczenia, metodę normową zmodyfikowano, dopuszczając tylko jednokrotne ubicie tej samej próbki odpadów w cylindrze Proctora. Każdy punkt krzywej zagęszczalności był określany dla oddzielnie przygotowanej próbki. Zawilgocone próbki przechowywano przez 24 godziny w zamkniętych pojemnikach.

Krzywą zagęszczalności przy jednokrotnym ubijaniu tej samej próbki odpadów przedstawiono na rysunku 4.



**Rys. 4.** Krzywa zagęszczalności przy jednokrotnym ubijaniu tej samej próbki  
**Fig. 4.** Compaction curve when the same sample was compacted once

Odczytane z wykresu krzywej zagęszczalności (rys. 4) wartości parametrów zagęszczalności wynoszą:  $w'_{opt} = 4,80\%$ ,  $\rho'_{d max} = 0,870 \text{ Mg/m}^3$ . Po uwzględnieniu masy ziaren odsianych przez sito ( $> 5\%$ ) odczytane wartości parametrów przelicza się według wzorów normowych [20]:

$$w_{opt} = (1 - x)w'_{opt} \tag{1}$$

$$\rho_{d max} = \frac{\rho_s \cdot \rho'_{d max}}{\rho_s - x(\rho_s - \rho'_{d max})} \tag{2}$$

gdzie:

$x$  – stosunek masy ziaren na sicie 10 mm do masy całej próbki.

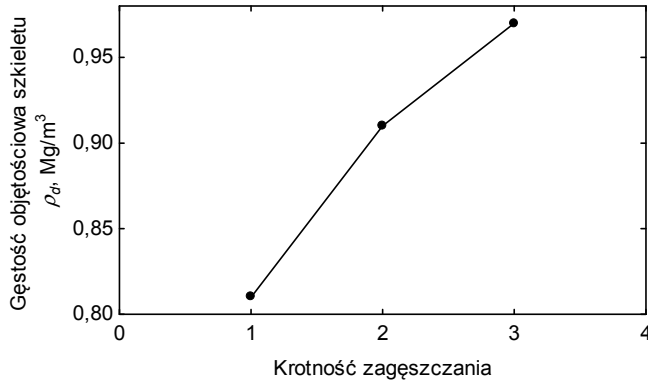
Wartości parametrów zagęszczalności rzeczywistych odpadów  $w_{opt}$  i  $\rho_{d max}$  wynoszą zatem:  $w_{opt} = 3,60\%$ ,  $\rho_{d max} = 1,046 \text{ Mg/m}^3$ .

Laboratoryjna zagęszczalność odpadów metodą Proctora nie jest zbyt efektywna, nawet biorąc pod uwagę niższą wartość  $\rho_s$  odpadów niż w przypadku gruntów mineralnych. Odpady osiągają najwyższą wartość maksymalnej gęstości objętościowej równą  $1,046 \text{ Mg/m}^3$  przy wilgotności równej  $3,60\%$ . Wskaźnik porowatości  $e$  zagęszczonych przy wilgotności optymalnej odpadów wynosi  $1,447$ . Dla odpadów o ziarnach  $< 10 \text{ mm}$  wartości te wynoszą:  $\rho_{d max} = 0,870 \text{ Mg/m}^3$ ,  $w_{opt} = 4,80\%$ ,  $e = 1,942$ .

W badaniach gruntów mineralnych i antropogenicznych o ziarnach podatnych na rozkruszenie, próbki wielokrotnie zagęszczane nie mogą być uważane za reprezentatywne. Wartości maksymalnej gęstości szkieletu gruntowego wzrastają bowiem wraz z liczbą uciętą tej samej próbki gruntu, podczas gdy ich wilgotność optymalna maleje [32]. Wpływ dynamicznego zagęszczania i rozkruszenia ziaren przedstawiono na przykładzie wartości  $\rho_d$  odpadów uzyskiwanych w kolejnych zagęszczeniach tej samej próbki (rys. 5). Wyniki badań uzasadniają założenie przy zagęszczaniu, że laboratoryjna metoda zagęszczenia powinna być zmodyfikowana, tak aby kolejny punkt krzywej zagęszczalności można było określać zawsze na próbce wcześniej niezagęszczanej.

Porównawczo przeprowadzono badania  $\rho_{d max}$  odpadów wysuszonych do stałej masy, zagęszczając odpady przez wibrowanie. Ze względu na wielkość ziaren odpadów metodę normową zmodyfikowano – badanie przeprowadzono w cylindrach o pojemności  $2,2 \text{ dm}^3$ , zagęszczając odpady na stoliku Ve-Be przez 1 min i sprawdzając zagęszczenie po kolejnych 0,5 min. Gęstość objętościowa przy najgęściejszym ułożeniu ziaren  $\rho_{d max}$  wyniosła  $0,940 \text{ Mg/m}^3$  (przy porowatości  $1,723$ ).

Płaski wykres krzywej zagęszczalności oraz wysokie wartości gęstości objętościowej szkieletu odpadów zagęszczanych w stanie powietrzno-suchym ułatwiają wbudowywanie odpadów w budowlę ziemne. Ze względu na wysokie wartości  $\rho_{d max}$  odpadów otrzymane podczas zagęszczania wibracyjnego, podczas wbudowywania odpadów w budowlę ziemne należy wziąć pod uwagę zagęszczanie wibracyjne odpadów.



**Rys. 5.** Wpływ kolejnych ubić na gęstość objętościową szkieletu odpadów  
**Fig. 5.** The impact of repeatedly compaction on waste dry density

#### 4.4. Właściwości mechaniczne

##### 4.4.1. Wytrzymałość na ścinanie zagęszczonych odpadów

Wytrzymałością gruntu na ścinanie nazywa się opór, jaki stawia grunt naprężeniom stycznym w rozpatrywanym punkcie ośrodka. Wartość oporu gruntu  $\tau_f$  określona jest uogólnionym wzorem Coulomba:

$$\tau_f = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad (3)$$

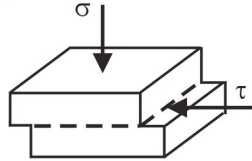
gdzie:

- $\tau_f$  – składowa styczna wektora naprężenia w chwili ścięcia,
- $\sigma$  – składowa normalna wektora naprężenia do płaszczyzny zniszczenia,
- $\varphi$  – kąt tarcia wewnętrznego,
- $c$  – opór spójności gruntu.

Wartości wytrzymałości na ścinanie dla celów inżynierskich wyznacza się najczęściej jako wartości maksymalne, nie dopuszczając do dużych odkształceń gruntu. Badania wytrzymałości odpadów przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania (rys. 6), z wymuszoną płaszczyzną ścięcia.

Próbki o wilgotnościach zbliżonych do  $w_{opt}$  zagęszczano poprzez wibrowanie bezpośrednio w skrzynce aparatu bezpośredniego ścinania (12 x 12 cm) do gęstości odpowiadających gęstościom próbek maksymalnie zagęszczonych metodą standardową Proctora. Próbki odpadów ścinano po wstępnej izotropowej konsolidacji i bez odpływu wody

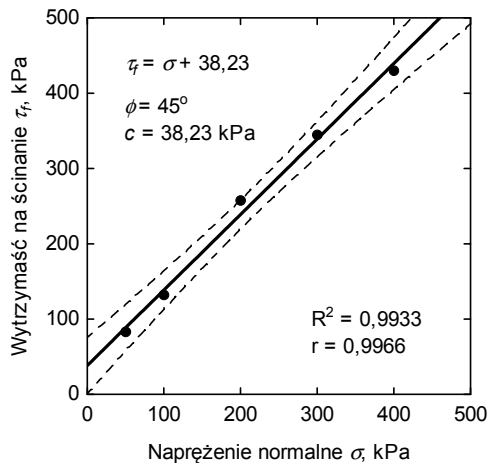
z próbki w czasie ścinania. Każdą próbkę ścinano jednokrotnie z prędkością 1 mm/min.



**Rys. 6.** Schemat ideowy aparatu bezpośredniego ścinania

**Fig. 6.** Schematic diagram of direct shear apparatus

Na rysunku 7 pokazano wykres stanu granicznego odpadów ścinanych w aparacie bezpośredniego ścinania. Wartość oporu spójności wynika z przyjęcia liniowej aproksymacji stanu granicznego gruntu i wynosi 38,23 kPa. Wartość kąta tarcia wewnętrznego odpadów wynosi 45°.



**Rys. 7.** Wytrzymałość na ścinanie odpadów ze spalania osadów ściekowych

**Fig. 7.** Shear strength of sewage sludge incineration waste

Odpady zagęszczane przy  $w_{opt}$  charakteryzują się dużymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego i spójności obliczeniowej, którą należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu budowli ziemnych. Otrzymane parametry wytrzymałościowe odpadów przewyższają parametry gruntów mineralnych odpowiadających im uziarnieniem [30].

#### 4.4.2. Wskaźnik nośności CBR

Nośność podłoża drogowego, jako zdolność do przenoszenia obciążeń bez wywoływania nadmiernych odkształceń, oznaczana jest za pomocą kalifornijskiego wskaźnika nośności *CBR* określonego wzorem:

$$CBR = \frac{p}{p_s} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie:

$p$  – obciążenie jednostkowe potrzebne do znormalizowanego wciśnięcia tłoka w próbkę gruntu,

$p_s$  – obciążenie jednostkowe odpowiadające wciskaniu tłoka w próbkę tłucznia standardowo zagęszczonego.

Oznaczenia przeprowadzono dla próbek bez nasączenia oraz próbek nasączanych w wodzie przez 4 doby zgodnie z ASTM D 1883 [1]. Próbki zagęszczano w cylindrach *CBR* metodą standardową Proctora, przy wilgotnościach zbliżonych do  $w_{opt}$ . Próbki poddane penetracji obciążone 2,44 kPa. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Wyniki badań *CBR* nienasączanych i nasączanych odpadów

**Table 3.** *CBR* test results for non-saturated and saturated waste

Oznaczenie	Produkt spalania osadów ściekowych	
	bez nasączenia	nasączany
Wartość średnia <i>CBR</i> , w %	16,3	11,0
Otrzymany zakres, w %	13,3–21,9	8,9–13,1
Wartość średnia wilgotności, w %	0,87	44,60

Wartości *CBR* odpadów zagęszczanych metodą standardową Proctora przy wilgotności optymalnej są zbliżone do wartości otrzymywanych dla gruntów mineralnych odpowiadających im uziarnieniem. Wartości *CBR* obniżają się po 4-dobowym nasączeniu próbek wodą w stosunku do badanych bezpośrednio po zagęszczeniu o około 30%.

#### 4.5. Pęcznienie pod wpływem dostępu wody

Wartości wskaźników pęcznienia  $I_{pc}$  określono dla odpadów zagęszczonych metodą standardową Proctora w cylindrach *CBR*, przy wilgotnościach w przybliżeniu równych  $w_{opt}$  ze wzoru:

$$I_{pc} = \frac{h_p - h_0}{h_0} \cdot 100\% \quad (5)$$

gdzie:

$h_p$  – wysokość próbki po spęcznieniu,

$h_0$  – wysokość początkowa próbki.

Oznaczenia wykonano po 4-dobowym nasączeniu próbek wodą z obciążeniem konsolidującym równym 2,44 kPa (zalecanym jako obciążenie minimalne w normie ASTM D 1883 [1]). Uzyskana wartość średnia  $I_{pc} = 0,20\%$ , a rozstęp wyników wynosi 0,17%–0,23%. Wzrost pęcznienia został zaobserwowany jedynie w ciągu pierwszej doby od rozpoczęcia nasączenia. Można stwierdzić, że zagęszczone odpady nie wykazują tendencji do pęcznienia przy obciążeniu minimalnym.

## 5. Analiza możliwości wykorzystania odpadów na podstawie badań własnych

W 1981 roku Instytut Badawczy Dróg i Mostów wydał wytyczne wbudowywania odpadów energetycznych w nasypy komunikacyjne [24], dopuszczając mieszaniny popiołowo-żużłowe ze spalania węgla kamiennego lub brunatnego o określonych właściwościach do konstruowania warstw korpusu drogowego. Uwarunkowania te powielono w normie PN-S-02205:1998 [23], jako niezbędne kryteria wykorzystania odpadów. Warunkiem wykorzystania odpadów jest ich wbudowanie w miejsca suche lub odizolowane od wody. Gdy poziom wody gruntowej znajduje się na głębokości mniejszej niż 1,0 m poniżej konstrukcji nasypu należy wykonać dolną warstwę odcinającą o grubości  $\geq 0,5$  m. Warstwę odcinającą może zastąpić geomembrana. Górą warstwę nasypu (w strefie przemarzania) należy stabilizować spoiwami lub zastosować geomembranę przykrytą 10 cm warstwą piasku. Skarpy, do czasu wytworzenia się okrywy roślinnej, zaleca się okryć warstwą przeciwoerozyjną. W przypadku niskiego poziomu wód gruntowych, gdy zwierciadło wody gruntowej znajduje się na głębokości większej od kapilarnego podciągania, mieszaninę popiołowo-żużłową można układać bezpośrednio na podłożu gruntowym. Podczas formowania nasypów najważniejsze jest odpowiednie zagęszczenie odpadów. Reasumując, mieszaniny popiołowo-żużłowe o określonych właściwościach dopuszcza się do wbudowywania we

wszystkie warstwy korpusu drogowego pod warunkiem, że będą zalegały w miejscach odizolowanych od wody gruntowej i opadowej.

W tabeli 4 pokazano wyniki badań produktu spalania komunalnych osadów ściekowych w Łomży w porównaniu do wymagań normowych dla odpadów energetycznych wbudowywanych w nasypy komunikacyjne.

**Tabela 4.** Właściwości produktu spalania osadów ściekowych w porównaniu do mieszanin popiołowo-żuźlowych wbudowywanych w nasypy według [23]

**Table 4.** Properties of sewage sludge incineration product in comparison to coal fly ash and bottom ash mix to be built-in road embankments according to [23]

Lp.	Wyszczególnienie cech	Wymagania normowe	Produkt spalania osadów ściekowych
Wymagania podstawowe			
1.	Uziarnienie, w %: – zawartość frakcji piaskowo-żwirowej – zawartość ziaren < 0,075mm Wskaźnik piaskowy:	≥ 35 ≤ 75	40,46–81,84 1,36–2,0
2.	– w stanie naturalnym – po 5 zagęszczeniach w aparacie Proctora	≥ 15 ≥ 10	– 75
3.	Zawartość niespalonego węgla, w %	≤ 10	8,65*
4.	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, w Mg/m <sup>3</sup>	≥ 1,0	1,046
5.	Wskaźnik CBR po 4-dobach nasączenia wodą, w %	≥ 10	11,0
6.	Pęcznienie liniowe, w %: – bez obciążenia – z obciążeniem 3 kPa	≤ 2,0 ≤ 0,5	– 0,20
7.	Kąt tarcia wewnętrznego, w °	≥ 20	45,0
Wymagania uzupełniające			
8.	Kapilarność bierna, w m	≤ 2,0	< 1,0
9.	Zawartość SO <sub>3</sub> , w %	< 3,0	0,60*

Objaśnienia: \* wartości wyznaczone dla odpadów z Łomży [12, 13].

## 6. Podsumowanie

Przeprowadzone oznaczenia właściwości fizycznych i mechanicznych oraz skład chemiczny, wskazały na możliwość zastosowania produktu spalania komunalnych osadów ściekowych jako materiału na nasypy liniowe i do makroniwelacji terenu. Badana mieszanina żuźła i popiołu spełnia wymagania normowe sformułowane dla ubocznych produktów spalania węgla wbudowywanych w nasypy komunikacyjne.



Ze względu na 30% obniżenie wartości *CBR* po nasączeniu odpadów wodą i stosunkowo niskie wartości wskaźnika nośności *CBR* nasączanych odpadów, odpady ze spalania komunalnych osadów ściekowych powinny być wbudowywane w miejsca odizolowane od wody gruntowej i opadowej. Wskazuje na to również możliwość wymywania pierwiastków ciężkich z masy odpadów, których zawartość w odpadach jest dużo wyższa niż w glebach niezanieczyszczonych.

Do wbudowania odpadów powinno się wykorzystać wytyczne wbudowywania odpadów energetycznych w nasypy komunikacyjne. Dolną warstwę odcinającą przy wysokim poziomie wody gruntowej, a także górną warstwę nasypu w strefie przemarzania można wykonać z odpadów stabilizowanych cementem lub wapnem hydratyzowanym. Odpady, ze względu na dużą zawartość wapnia wykazują właściwości wiążące po wzbudzeniu ich spoiwem hydraulicznym [5, 15].

Badane odpady ze spalania osadów w kotle z rusztem mechanicznym charakteryzują się dużo grubszym uziarnieniem od popiołów uzyskiwanych ze spalania osadów w piecach fluidalnych. Są zatem korzystniejszym materiałem do wbudowywania w budowlę ziemne niż odpady uzyskiwane podczas spalania w złożu fluidalnym.

Ze względu na brak w literaturze danych dotyczących właściwości geotechnicznych produktów spalania osadów ściekowych należy przeprowadzić dalsze badania laboratoryjne i polowe stwierdzające przydatność odpadów do budowli ziemnych.

## Literatura

1. **ASTM Standards: D 1883** – *Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils.*
2. **Białowiec A., Janczukowicz W., Krzemieniewski M.:** *Możliwości zagospodarowania popiołów po termicznym unieszkodliwianiu osadów ściekowych w aspekcie regulacji prawnych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 11, 959–971 (2009).
3. **BN-64/8931-01** *Drogi samochodowe. Oznaczanie wskaźnika piaskowego.*
4. **Chen M., Blanc D., Gautier M., Mehu J., Gourdon R.:** *Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction.* Waste Management. 33, 1268–1275 (2013).
5. **Chen L., Lin D.F.:** *Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement.* Journal of Hazardous Materials. 162, 321–327 (2009).

6. **Cyr M., Coutand M., Clastres P.:** *Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials.* Cement and Concrete Research. 37, 1278–1289 (2007).
7. **Dąbrowski J., Piecuch T.:** *Mathematical description of combustion process of selected groups of waste.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 13, 253–268 (2011).
8. **Donatello S., Cheeseman Ch.R.:** *Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review.* Waste Management. 33, 2328–2340 (2013).
9. **Eurostat's database:** *Sewage Sludge Production and Disposal.* <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>> (15.08.2013).
10. **Fytli D., Zabaniotou A.:** *Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. 12, 116–140 (2008).
11. **Kabata-Pendias A., Pendias H.:** *Biogeochemia pierwiastków śladowych.* Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1993.
12. **Kosior-Kazberuk M.:** *Application of SSA as partial replacement of aggregate in concrete.* Polish Journal of Environmental Studies. 20, 365–370 (2011).
13. **Kosior-Kazberuk M.:** *Nowe dodatki mineralne do betonu.* Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2, 47–55 (2011).
14. **Lewańczuk G.:** *Instalacja suszenia i mineralizacji termicznej osadów ściekowych dla oczyszczalni ścieków w Łomży – przebieg procesu inwestycyjnego.* Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej „Termiczna mineralizacja osadu ściekowego”, Warszawa. 9–13 (2008).
15. **Lin D.F., Lin K.L., Hung M.J., Luo H.L.:** *Sludge ash/hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil.* Journal of Hazardous Materials. 145, 58–64 (2007).
16. **Piecuch T.:** *Termiczna utylizacja odpadów.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 2, 11–37 (2000).
17. **Piecuch T., Kowalczyk A., Kupś D., Gomółka D.:** *Sposób likwidacji uciążliwych zapachów powstających w procesie mechanicznego odwadniania komunalnych osadów ściekowych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 13, 747–768 (2011).
18. **PN-86/B-02480** *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.*
19. **PN-60/B-04493** *Grunty budowlane. Oznaczania kapilarności biernej.*
20. **PN-88/B-04481** *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.*
21. **PN-EN 1997-2:2009** *Eurokod 7. Projektowanie Geotechniczne. Część: 2 Rozpoznawanie i badanie podłoża gruntowego.*

22. **PN-EN ISO 14688-2:2006** *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część: 2 Zasady klasyfikowania.*
23. **PN-S-02205:1998** *Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.*
24. **Ślupski W.:** *Technologia wykonywania nasypów komunikacyjnych z odpadów energetycznych (wytyczne).* IBDiM. Warszawa 1981.
25. **Tomkiewicz T.:** *Termiczna mineralizacja osadów ściekowych w aspekcie prawno-ekologicznym (na przykładzie MPWiK Łomża).* Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej „Termiczna mineralizacja osadu ściekowego”, Warszawa. 37–45, (2008).
26. **Uchwała Nr 217 Rady Ministrów z dnia 24 grudnia 2010 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2014”.** M. P. Nr 101 poz. 1183.
27. **Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 r.** Dz. U. 2013 Nr 0 poz. 21.
28. **Werle S., Wilk R.K.:** *A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective.* Renewable Energy. 9(35), 1914–1919 (2010).
29. **Werther J., Ogada T.:** *Sewage sludge combustion.* Progress in Energy and Combustion Science. 1(25), 55–116 (1999).
30. **Wilun Z.:** *Zarys geotechniki.* WKŁ. Warszawa 1987.
31. **Wystalska K., Sobik-Szolysek J., Biń J.B.:** *Vitrification and devitrification of ash after sewage sludge combustion.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 15, 181–191 (2013).
32. **Zabielska-Adamska K.:** *Laboratory compaction of fly ash and fly ash with cement additions.* Journal of Hazardous Materials. 151, 481–489 (2008).
33. **Zabielska-Adamska K.:** *Wybrane zastosowania materiałów odpadowych w geoinżynierii.* Inżynieria Morska i Geotechnika. 4, 286–293 (2012).
34. **Zabielska-Adamska K.:** *Popiół lotny jako materiał do budowy warstw uszczelniających.* Rozprawy naukowe nr 136, Wyd. Politechniki Białostockiej, Białystok 2006.
35. **Zawisza E.:** *Odpady hutnicze jako antropogeniczne grunty budowlane. Metody badań i właściwości geotechniczne.* Wyd. Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2012.

## Product of Municipal Sewage Sludge Incineration as an Anthropogenic Soil

### Abstract

National Waste Management Plan 2014 for Poland assumes increasing the amount of municipal sewage sludge converted by thermal methods, which requires an increase in the mass of sludge thermally pretreated in cement plants, power boilers and incineration plants of sewage sludge. Before June 2010 only three municipal sewage sludge incinerators were existed in Poland, and sludge incineration accounted for only 2% of the total waste. Incineration plant of municipal sewage sludge in Lomza was launched in December 2007 as the second Polish incinerator. It uses the combustion of sewage sludge in the furnace with mechanical moving grate. A mixture of slag and ash is taken off in a moistened state and led to a landfill. The paper presents the geotechnical properties of the thermally converted municipal sewage sludge in incineration plant in Lomza to show that it can be considered as a substitute for natural soils. The research programme includes properties necessary to determine the suitability of the waste for road embankments according to Polish Standard PN-S-02205:1998. The comparison of the obtained test results and the code requirements designed for coal fly ash and bottom ash mix indicates that the product of sewage sludge combustion meets all code requirements for material suitable for road embankment. Due to the 30% reduction of *CBR* values after waste soaking causing relatively low *CBR* values of soaked waste, the product of sewage sludge incineration should be built into places isolated from ground water and precipitation. That is also indicated by the possibility of leaching of heavy metals from the waste because their content is much higher than in uncontaminated soils. For earthworks should be used guidelines applied for coal fly ash and bottom ash mix embedded in road embankments. Tested product of sewage sludge combustion in the furnace with mechanical grate are much more preferred material for earthworks than fly ash generated during incineration in a fluidised bed due to the particle size. In view of lack of data in the literature concerning the geotechnical properties of the sewage sludge incineration products, further laboratory and field studies should be conduct to confirm the usefulness of waste for earthworks.

### Słowa kluczowe:

żużel i popiół ze spalania osadów ściekowych, wykorzystanie odpadów, właściwości geotechniczne odpadów, roboty ziemne

### Keywords:

slag and ash from combustion of sewage sludge, waste utilization, waste geotechnical properties, earthworks