

Wykorzystanie odpadów przemysłowych do budowy i umacniania wałów przeciwpowodziowych

*Piotr Filipowicz, Magdalena Borys
Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, Falenty*

1. Wprowadzenie

Materiały odpadowe produkowane przez przemysł są coraz częściej wykorzystywane w budownictwie zamiast gruntów naturalnych. Znaczna część odpadów powęglowych pozostających po wydobyciu węgla kamiennego jest wykorzystywana do preparowania tzw. podsadzki wyrobisk kopalnianych podziemnych, utylizacji hałd węglowych w ramach technologii odzysku węgla i surowca do wytwarzania prefabrykatów betonowych, czyli technologii HAL-DEX [6, 7, 8], wykorzystywana do rekultywacji wyrobisk odkrywkowych po kruszywach, budowy i remontu dróg lokalnych, do budowy i modernizacji korpusów nasypów wodno-melioracyjnych, w tym wałów przeciwpowodziowych, ogroblowań kanałów i zbiorników wodnych oraz produkcji materiałów budowlanych. W budownictwie do tych samych celów co odpady powęglowe wykorzystuje się z podobnymi sukcesami także materiały po przetworzeniu zanieczyszczonych gruntów naturalnych.

Aby możliwe było wykorzystanie tych materiałów jako gruntu budowlanego konieczna jest wiedza na temat oddziaływania ich na otaczające środowisko, w tym przede wszystkim skład chemiczny materiału oraz odcieków wodnych, a w następnej kolejności konieczne jest rozpoznanie ich parametrów geotechnicznych. Parametry geotechniczne dwóch wybranych rodzajów odpadów przemysłowych, które pod względem składu chemicznego nie stwarzają zagrożenia dla środowiska w przypadku ich wbudowania w korpusy nasypów okresowo piętrzących wodę, jakimi są wały przeciwpowodziowe, stanowią przedmiot niniejszego artykułu.

2. Charakterystyka materiału i metodyka badań

Badania prowadzono dla prób odpadów powęglowych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego, pochodzących z hałdy kopalni węgla kamiennego „Bogdanka” o różnym okresie ich składowania tj. świeżych dostarczonych prosto z kopalni oraz wieloletnich leżakujących na hałdzie przez okres 5-ciu i 7-miu lat, oraz dwóch materiałów (oznaczonych jako MI i MII) wytworzonych z refulatu pochodzącego z dna kanału szczecińskiego przetworzonego zgodnie z technologią Hegemanna. Dla materiałów tych wykonano analizę porównawczą zakresu zmienności składu granulometrycznego, wilgotności optymalnej, maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, kąta tarcia wewnętrznego, spójności i współczynnika filtracji.

Skład granulometryczny określano metodą sitową po wstępnym namoczeniu próbki odpadów, powodującym odklejenie się cząstek, należących do frakcji pyłowej i ilowej od cząstek grubszych [9]. Dla wypłukanych drobnych cząstek o średnicy poniżej 0,063 mm wykonano analizę areometryczną dla prób przetworzonego refulatu.

Parametry zagęszczania badano w aparacie Proctora metodą II wg PN-88/B-04481, tj. z zastosowaniem dużego cylindra i ciężkiego ubijaka oraz jednostkowej pracy zagęszczania wynoszącej $0,59 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ badanych odpadów. Badania wykonywano dla próbek o pełnym składzie uziarnienia, z wyjątkiem kilku próbek odpadów powęglowych, z których usunięto pojedyncze cząstki o średnicy ponad 40,0 mm. Badania wykonywano za każdym razem na nowych próbkach odpadów.

Wytrzymałość na ścinanie badano z zastosowaniem aparatu bezpośredniego ścinania, który był wyposażony w skrzynkę o wymiarach 120x120x60 mm. Próbki odpadów doprowadzano do wilgotności optymalnej, którą określono w badaniu aparatem Proctora metodą II, a następnie zagęszczano je bezpośrednio w skrzyneczce aparatu, poprzez ubijanie ręczne w 3 warstwach, tak aby uzyskać wskaźnik zagęszczenia wynoszący około 0,92. Badanie wykonywano każdorazowo dla próbek przygotowywanych od początku z nowego materiału.

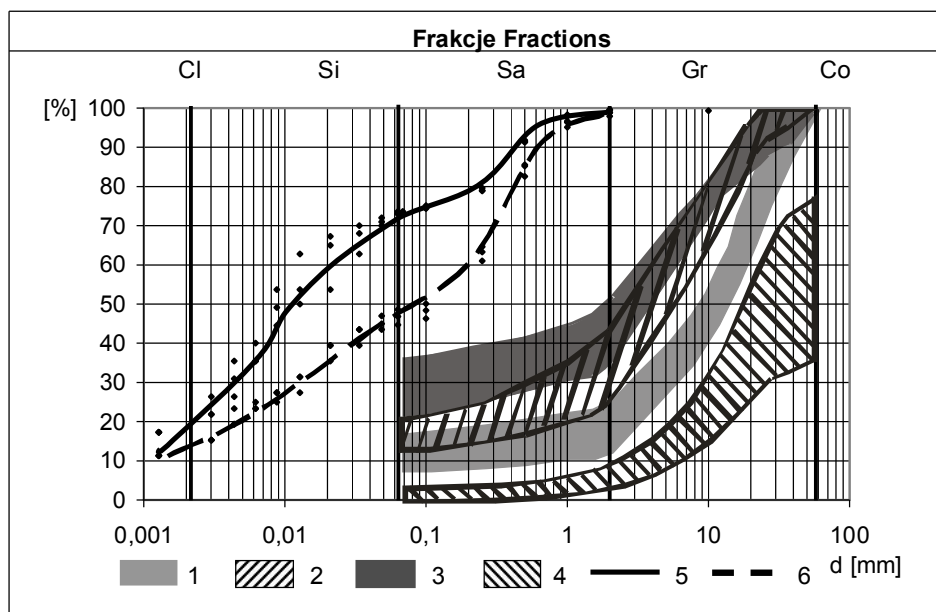
Współczynniki filtracji określono w laboratorium w cylindrach filtracyjnych, dla próbek o wysokości 150 mm i średnicy 139 mm. Przed badaniem filtracji próbki doprowadzono do wilgotności zbliżonej do wilgotności optymalnej, a następnie zagęszczano je w cylindrach filtracyjnych do uzyskania wartości wskaźnika zagęszczenia $I_s \geq 0,92$. Dla tak przygotowanych próbek współczynnik filtracji oznaczano poprzez zadanie przepływu wody od góry do dołu próbki przy zmiennym spadku hydraulicznym, a odczyty prowadzono w kilku powtórzeniach po uzyskaniu pełnego nasycenia próbki wodą i ustabilizowaniu się przepływu wody przez próbkę.

3. Wyniki badań i dyskusja

Analiza uziarnienia odpadów powęglowych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego pozwoliła zauważyć wyraźny wpływ długości okresu składowania odpadów powęglowych na hałdzie na otrzymane wyniki (rys. 1). Stwierdzono, że im starsze są odpady tym zawierają coraz mniej cząstek grubych i więcej cząstek drobnych. We wszystkich przebadanych próbkach frakcja żwirowa zajmowała największą część i wynosiła - od 73 do 86% w odpadach świeżych, od 58 do 77% w odpadach 5-letnich oraz od 51 do 67% w odpadach 7-letnich. Frakcja kamienista, czyli cząstki o średnicy powyżej 63 mm, w badanych próbkach odpadów świeżych i wieloletnich nie występowały. Frakcja piaskowa wynosiła - od 6 do 10% w odpadach świeżych, od 13 do 23% w odpadach 5-letnich oraz od 14 do 19% w odpadach 7-letnich. Udział frakcji pyłowej w próbkach odpadów świeżych dochodził do 18%, w odpadach 5-letnich wynosił od 11 - 19% a 7-letnich od 19 - 34% [3]. Uziarnienie odpadów powęglowych pod względem procentowej zawartości poszczególnych frakcji sklasyfikowano wg tablicy NA.1 w normie PN-EN ISO 14688-2:2006 dla prób świeżych jako żwir (Gr), dla prób 5 - letnich jako żwir przechodzący w żwir pylasty (Gr / siGr) a próby 7 - letnie jako żwir pylasty (siGr).

Odpady powęgłowe z Lubelskiego Zagłębia Węglowego w porównaniu do odpadów z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego zawierają zdecydowanie mniej grubych cząstek i więcej cząstek drobnych, co można zauważyć na podstawie zakresu uziarnienia odpadów powęglowych z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego przedstawionego na rysunku 1 [11, 12].

Uzyskane wyniki analizy sitowej i areometrycznej dla prób nowych materiałów powstałych z przetworzonego refulatu przedstawiono w postaci uśrednionej krzywej uziarnienia po 3 powtórzeniach na rysunku 1 osobno dla prób MI i MII. Analiza granulometryczna wykazała, że w próbach materiału nazwanego MI przeważała frakcja pyłowa, której zawartość wynosiła 52–54,6%. Zawartości pozostałych frakcji wynosiły: frakcji ilowej 19–21%, frakcji piaskowej 26–26,5%, a frakcji żwirowej do 0,5%. W próbach materiału MII przeważała frakcja piaskowa, której zawartość wynosiła 50,2–53,2%. Zawartości pozostałych frakcji wynosiły dla frakcji ilowej około 13%, frakcji pyłowej 31,7–35,6%, a frakcji żwirowej 1,1–2,1%. Uziarnienie obydwu badanych próbek nowego materiału pod względem procentowej zawartości poszczególnych frakcji sklasyfikowano wg tablicy NA.1 w normie PN-EN ISO 14688-2:2006 jako glinę ilastą (sasiCl).



Rys. 1. Skład granulometryczny odpadów przemysłowych: 1 – odpady powęglowe świeże z Lubelskiego Zagłębia Węglowego, 2 – 5 letnie odpady powęglowe z Lubelskiego Zagłębia Węglowego, 3 – 7 letnie odpady powęglowe z Lubelskiego Zagłębia Węglowego, 4 – odpady powęglowe świeże z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego [11], 5 – materiał MI wytworzony z refulatu pochodzącego z dna kanału szczecińskiego przetworzonego zgodnie z technologią Hegemanna, 6 – materiał MII wytworzony z refulatu pochodzącego z dna kanału szczecińskiego przetworzonego zgodnie z technologią Hegemanna.

Fig. 1. Grain size distribution of industrial waste: 1 – Fresh coal mine wastes from Lublin Coal Basin, 2 – 5 years old coal mine wastes from Lublin Coal Basin, 3 – 7 years old coal mine wastes from Lublin Coal Basin, 3 – Fresh coal mine wastes from Upper Silesia Coal Basin [Skarzyńska 1997], 5 – New material MI originated from sediments dredged out of the Szczecin Channel and processed according to Hegemann's technology, 6 – New material MII originated from sediments dredged out of the Szczecin Channel and processed according to Hegemann's technology.

Wartości wilgotności optymalnej i maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego dla badanych odpadów przemysłowych zamieszczono w tabeli 1 i porównano je z wartościami prezentowanymi w literaturze dla odpadów powęglowych z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego [11, 12]. Dla badanych odpadów powęglowych wieloletnich stwierdzono wyraźną tendencję

spadkową wartości maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego i rosnącą wilgotności optymalnej w porównaniu z odpadami świeżymi (tabela 1). Wilgotność optymalna badanych odpadów zwiększyła się średnio o 2% dla tych odpadów po 5 latach składowania na hałdzie i o około 4% dla materiału po 7 latach składowania. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego zmniejszyła się od wartości wynoszącej około $1,835 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w odpadach świeżych do wartości równej $1,730 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w odpadach 5-letnich i do wartości $1,685 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w odpadach 7-letnich.

Tabela 1. Parametry zagęszczania badanych prób MI i MII
Table 1. Compacting parameters of tested samples MI and MII

Rodzaj odpadów przemysłowych <i>Type of industrial wastes</i>	Wilgotność optymalna <i>Optimal moisture content, %</i>	Max gęstość objętościowa szkieletu gruntowego <i>Maximum dry density of solid particles, $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$</i>
Przetworzony refulat MI <i>New material originating from processed sediments MI</i>	40-44	1,168-1,200
Przetworzony refulat MII <i>New material originating from processed sediments MII</i>	28-29	1,442-1,457
Odpady powęglowe świeże LZW <i>Fresh coal mine wastes LZW</i>	11-13	1,790-1,950
Odpady powęglowe 5 – letnie LZW <i>5 years old coal mine wastes LZW</i>	11-14	1,690-1,751
Odpady powęglowe 7 – letnie LZW <i>7 years old coal mine wastes LZW</i>	15-19	1,640-1,710
Odpady powęglowe świeże GZW ¹ <i>Fresh coal mine wastes GZW¹</i>	7-12	1,700-1,900
Odpady powęglowe wieloletnie GZW ¹ <i>Coal mine wastes stored for several years GZW¹</i>	8-19	1,200-2,000

– Skarżyńska 1997
¹ – Skarżyńska 1997

Dla odpadów powęglowych z GZW Skarżyńska [11, 12] zaobserwowała podobnie tendencje wzrostowe dla wilgotności optymalnej tj. od wartości w zakresie pomiędzy 7 a 12% dla odpadów świeżych do 11-19% dla materiału wieloletniego. Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego zawierała się w zakresie od $1,7 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $1,9 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ w odpadach świeżych, natomiast w odpadach wieloletnich wynosiła od $1,2 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ do $2,0 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Dla badanych prób z przetworzonego refulatu zaobserwowano większe wartości wilgotności optymalnej, wynoszące od 40 do 44% dla prób MI i od 28 do 29% dla prób MII, w porównaniu do prób odpadów powęglowych. Materiał ten charakteryzował się natomiast niższymi wartościami maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego w porównaniu z badanymi próbkami odpadów powęglowych.

Obliczone wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności odpadów powęglowych świeżych i wieloletnich potwierdziły, że wraz z postępującym procesem wietrzenia zmniejsza się wartość ich kąta tarcia wewnętrznego, natomiast spójności zwiększa (tabela 2). Zaobserwowane zmiany wartości parametrów wytrzymałościowych nastąpiły na skutek rozpadu grubych cząstek na drobniejsze. Grube ostrokrawędziste cząstki znajdujące się w odpadach powęglowych świeżych, klinując się, powodują występowanie dużych wartości kąta tarcia wewnętrznego. W odpadach wieloletnich grube cząstki o kształcie ostrokrawędzistym występują rzadko, dlatego obserwujemy mniejsze wartości kąta tarcia wewnętrznego. Większa spójność odpadów powęglowych wieloletnich w porównaniu ze świeżymi spowodowana jest dużym udziałem frakcji drobnych głównie pyłowej i ilowej.

Tendencje zmiany parametrów wytrzymałościowych odpadów z Lubelskiego Zagłębia Węglowego są podobne do prezentowanych w literaturze w odniesieniu do odpadów pochodzących z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. W zależności od długości okresu składowania na hałdzie wartość kąta tarcia wewnętrznego odpadów pochodzących z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego może zmniejszyć się nawet o około 20° , natomiast różnica wartości spójności między odpadami świeżymi a wieloletnimi może wynieść około 50 kPa, a nawet więcej [4, 5, 11].

Badane próby przetworzonego refulatu zawierały około 50% i więcej cząstek drobnych poniżej 0,02 mm stąd, zarówno próby MI jak i MII charakteryzowały się wysokimi wartościami spójności (MI $>55\text{kPa}$ i MII $>36\text{kPa}$), wyższą niż naturalne grunty spoiste o podobnym uziarnieniu. Wartości kąta tarcia wewnętrznego nie przekraczały 26° dla prób MI i 33° dla prób MII. Wartości kąta tarcia wewnętrznego dla przetworzonego refulatu były zdecydowanie mniejsze w porównaniu do wartości otrzymanych dla odpadów powęglowych (tabela 2).

Tabela 2. Zakres wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności
Table 2. Range of values of apparent angle of internal friction and cohesion

Rodzaj odpadów przemysłowych <i>Type of industrial wastes</i>	Kąt tarcia wewnętrznego, <i>Apparent angle of internal friction, °</i>	Spójność, <i>Cohesion, kPa</i>
Przetworzony refulat MI <i>New material originating from processed sediments MI</i>	24 - 26	55 - 67
Przetworzony refulat MII <i>New material originating from processed sediments MII</i>	28 - 33	36 - 50
Odpady powęglowe świeże LZW <i>Fresh coal mine wastes LZW</i>	43 - 55	22 - 32
Odpady powęglowe 5 – letnie LZW <i>5 years old coal mine wastes LZW</i>	34 - 35	21 - 35
Odpady powęglowe 7 – letnie LZW <i>7 years old coal mine wastes LZW</i>	27 - 39	25 - 40

Wyniki badań współczynnika filtracji oznaczonego w kilku powtórzeniach odpadów powęglowych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego zestawiono w tabeli 3. Badania przepuszczalności wykazały, że współczynnik filtracji odpadów powęglowych zależy od ich czasu składowania na hałdzie [1, 2, 3]. Wartość średnia współczynnika filtracji w próbkach odpadów powęglowych były rzędu $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla odpadów świeżych, natomiast $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla 5-letnich i $10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dla 7-letnich.

Zmniejszenie przepuszczalności odpadów w miarę upływu czasu ich składowania jest związane z rozpadem grubych cząstek na coraz drobniejsze. Próby zawierające dużo grubych cząstek należących do frakcji żwirowej i kamienistej mają większą przepuszczalność, co ma związek z większą porowatością tych próbek. Odpady wieloletnie, zawierające więcej drobnych cząstek niż świeże, charakteryzują się mniejszą przepuszczalnością.

Odpady powęglowe można zaliczyć do materiałów średnio i słabo przepuszczalnych charakteryzujących się współczynnikiem filtracji podobnym do współczynnika notowanego dla gruntów mineralnych, takich jak: piaski drobne, pylaste i gliniaste, zmniejszającym się wraz z upływem czasu składowania odpadów na hałdzie.

Tabela. 3. Współczynnik filtracji badanych odpadów powęglowych z Lubelskiego Zagłębia Węglowego oznaczony w kolumnach filtracyjnych, $m \cdot s^{-1}$

Table. 3. Coefficient of permeability coal mine wastes from Lublin Coal Basin determined in filtration columns, $m \cdot s^{-1}$

Nr powtórzenia <i>Repetition</i>	Świeża <i>Fresh</i>	5-letnie <i>5 years old</i>		7-letnie <i>7 years old</i>	
		Próba 1 <i>Sample 1</i>	Próba 2 <i>Sample 2</i>	Próba 1 <i>Sample 1</i>	Próba 2 <i>Sample 2</i>
1	7,15E-04	1,06E-06	1,62E-05	7,44E-07	4,51E-07
2	6,12E-04	1,94E-06	5,04E-06	1,02E-06	9,56E-07
3	6,23E-04	1,62E-06	3,62E-06	7,63E-07	3,08E-07
Wartość średnia <i>Mean value</i>	6,50E-04	1,54E-06	8,29E-06	8,42E-07	5,72E-07

Współczynniki filtracji oznaczone w kolumnach filtracyjnych dla dwóch rodzajów nowych materiałów powstałych z przetworzonego refulatu wynosiły odpowiednio dla prób MI około $10^{-5} m \cdot s^{-1}$, a dla prób MII od 10^{-5} do $10^{-6} m \cdot s^{-1}$, przy czym nie stwierdzono istotnego wpływu czasu na uzyskiwane w kolejnych powtórzeniach wartości przepływu filtracyjnego (tabela 4). Wartości współczynników filtracji materiałów MI i MII zawierały się w granicach, jakimi charakteryzują się słabo przepuszczalne grunty drobnoziarniste, w tym piaski zapyłone i gliny ilaste.

Tabela 4. Wartości współczynnika filtracji w próbach materiałów MI i MII wytworzonych z refulatu zagęszczonych do wskaźnika zagęszczenia 0,92, wykonane w 3 powtórzeniach w kolejnych dniach, $m \cdot s^{-1}$

Table 4. Coefficients of permeability for samples of materials MI and MII made of dredged sediments compacted to the index of compaction = 0.92 made in three repetitions on consecutive days, $m \cdot s^{-1}$

Rodzaj materiału <i>Material</i>	Współczynnik filtracji w $m \cdot s^{-1}$, wyznaczony w kolejnych dniach: <i>Permeability coefficients in $m \cdot s^{-1}$ determined on consecutive days:</i>								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MI	8,33E-05	4,37E-05	3,61E-05	1,86E-05	3,21E-05	3,45E-05	5,42E-05	6,22E-05	6,22E-05
	5,57E-05	5,11E-05	5,31E-05	5,22E-05	3,05E-05	2,97E-05	4,45E-05	4,42E-05	3,80E-05
	5,30E-05	5,13E-05	4,58E-05	4,00E-05	3,46E-05	3,81E-05	3,46E-05	3,28E-05	3,11E-05
Średnia <i>Mean</i>	6,40E-05	4,87E-05	4,50E-05	3,69E-05	3,24E-05	3,41E-05	4,44E-05	4,64E-05	4,38E-05
MII	4,75E-05	9,77E-05	4,36E-05	4,40E-05	5,02E-05	4,15E-05	4,13E-05	3,91E-05	4,03E-05
	1,96E-05	1,89E-05	1,66E-05	1,30E-05	9,32E-06	8,31E-06	7,71E-06	6,77E-06	6,40E-06
	2,94E-05	2,99E-05	3,04E-05	2,99E-05	2,52E-05	2,92E-05	2,90E-05	2,25E-05	2,07E-05
Średnia <i>Mean</i>	3,22E-05	4,88E-05	3,02E-05	2,90E-05	2,82E-05	2,63E-05	2,60E-05	2,28E-05	2,25E-05

4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków dotyczących składu granulometrycznego i właściwości filtracyjnych odpadów przemysłowych pod kątem ich zagospodarowania w budownictwie hydrotechnicznym:

1. Uziarnienie badanych odpadów powęglowych zależy od długości okresu składowania na hałdzie. W starszych próbkach udział frakcji żwirowej i kamienistej jest znacznie mniejszy niż w świeżych, więcej znajduje się w nich cząstek należących do frakcji piaskowej, pyłowej i ilowej. We wszystkich przebadanych próbach odpadów powęglowych frakcja żwirowa zajmowała największą część i pod tym względem odpady te podobne są do żwiru i żwiru pylastego.
2. Analiza granulometryczna prób nowych materiałów powstałych po przetworzeniu refulatu pozwoliła stwierdzić, że pod względem procentowej zawartości poszczególnych frakcji odpowiadają one glinom ilastym. Próby MI zawierały najwięcej cząstek należących do frakcji pyłowej, natomiast próby MII cząstek należących do frakcji piaskowej.
3. W badanych odpadach powęglowych zaobserwowano tendencję spadkową maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego oraz rosnącą wilgotności optymalnej i naturalnej wraz z długością okresu ich składowania na hałdzie. Natomiast próby przetworzonego refulatu charakteryzowały się najmniejszymi wartościami maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.
4. Badane odpady powęgłowe i przetworzony refulat charakteryzowały się wysokimi wartościami spójności, wyższą niż naturalne grunty spoiste o podobnym uziarnieniu. Zaobserwowane wraz z upływem czasu składowania odpadów powęglowych na hałdzie zmniejszenie się wartości kąta tarcia wewnętrznego i zwiększenie spójności związane jest z rozpadem grubych cząstek na drobne.
5. Badane odpady zarówno powęgłowe jak i przetworzony refulat można zaliczyć do materiałów średnio i słabo przepuszczalnych charakteryzujących się współczynnikiem filtracji podobnym do współczynnika notowanego dla gruntów mineralnych, takich jak: piaski drobne, pylaste i gliniaste oraz piaski zapyłone i gliny ilaste, w przypadku odpadów powęglowych obserwujemy zmniejszenie się ich przepuszczalności wraz z upływem czasu składowania na hałdzie.
6. Pomimo znacznego zróżnicowania pod względem zawartości procentowej poszczególnych cząstek wśród badanych odpadów przemysłowych, charakteryzują się one bardzo podobnym współczynnikiem filtracji. Największy, a tym samym najbardziej niekorzystny, wynik zanotowano dla odpadów powęglowych świeżych i nowego materiału MI, a był on rzędu 10^{-4} – 10^{-5} m·s⁻¹. Odpady

powęglowe wieloletnie cechowały się mniejszym współczynnikiem filtracji wynoszącym 10^{-6} – 10^{-7} m·s⁻¹.

7. Biorąc pod uwagę wartości parametrów geotechnicznych opisanych w niniejszym artykule odpadów przemysłowych można stwierdzić, że spełniają one podstawowe kryteria umożliwiające ich wykorzystanie do budowy wałów przeciwpowodziowych w zastępstwie gruntów naturalnych.

Literatura

1. **Borys M., Filipowicz P.:** Geotechnical parameters of mine wastes from The Lubelskie Coal Basin as a material for hydrotechnical embankments – Journal of Water and Land Development, No. 8, s.163-170, Falenty 2004.
2. **Filipowicz P., Borys M.:** Geotechnical properties of mining wastes and their utilization in civil engineering – rozdział w monografii pt.: „Problematic soils”, Eastern Mediterranean University Press 2005, volume 1, s. 259-267., Famagusta, Północny Cypr 2005.
3. **Filipowicz P.:** Wpływ czynników środowiskowych na parametry geotechniczne odpadów powęglowych w aspekcie ich zastosowania do budowy nasypów wodno-melioracyjnych. Rozprawa doktorska, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych w Falentach, s. 195, Falenty 2006.
4. **Kawalec B.:** Metody empiryczne ustalania wartości kątów tarcia wewnętrznego materiałów gruboziarnistych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Budownictwo z. 40, s. 33-41, 1976.
5. **Krzyk P.:** Wpływ czasu składowania na zmianę wybranych parametrów geotechnicznych nie przepalonych odpadów powęglowych Kopalni Anna. Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, z. 20, s. 41-53, Warszawa 2001.
6. **Piecuch T., Opielka J.:** Techniczno-ekonomiczna analiza pracy zakładów utylizacji hałd. BIULETYN S.I.T.G. Informacja Techniczno-Ekonomiczna Jaworznicko-Mikołowskiego Zjednoczenia Przemysłu Węglowego. Zeszyt nr 4, s. 37-47, 1973.
7. **Piecuch T., Opielka J.:** Możliwość a celowość utylizacji hałd Jaworznicko-Mikołowskiego Zjednoczenia Przemysłu Węglowego. BIULETYN S.I.T.G. Informacja Techniczno-Ekonomiczna Jaworznicko-Mikołowskiego Zjednoczenia Przemysłu Węglowego. Zeszyt nr 2, s. 69-78, sierpień 1974.
8. **Piecuch T.:** Utylizacja odpadów przemysłowych. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej. Wyd. I-e rok 1996, Wyd. II-e rok 2000.
9. PN-88/B-04481: Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu.
10. PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania.
11. **Skarżyńska K. M.:** Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Krakowie, s. 199, Kraków 1997.
12. **Skarżyńska K. M., Burda H., Kozielska-Sroka E., Michalski P.:** Laboratory and site investigations on weathering of coal mining wastes as a fill material in earth structures. W: Reclamation, treatment and utilization of coal mining wastes. Pr. zbior. Red. A.K.M. Rainbow. Amsterdam: Elsevier Sci. Publ. B.V. s. 179–195, Amsterdam 1987.

Application of Industrial Waste for Construction and Modernisation of Flood Control Embankments

Abstract

Waste materials from industry are more and more often used for building purposes instead of natural soils. Large amounts of coal mine wastes are used to restore opencast aggregate mines, to build or rebuild local roads, to build or modernise the bodies of embankments including flood embankments, dikes around channels and water reservoirs and to produce building materials. Dust-slag compound, aggregates based on coal mine wastes and materials produced after processing contaminated soils are also used for these purposes.

Understanding environmental impact and knowledge of chemical composition of these materials and their water eluates and finally their geotechnical parameters are necessary to use them as building grounds. Grain size distribution, maximum dry density of solid particles, optimal moisture content, shear strength of soil and coefficient of permeability have been tested to utilise these materials in hydrotechnical constructions e.g. when building flood embankments.

Performed analysis of grain size distribution in mine wastes from Lublin Coal Mine revealed a clear effect of the storage time on obtained results. The older were the wastes the less coarse and the more fine particles they contained. Grain size distribution analysis for new materials originating from processed sediments showed that silt fraction dominated (52 - 54.6%) in MI sample and MII samples were dominated by sand fraction (50.2 - 53.2%). Grain size distribution of both samples based on percent content of particular fractions was classified as clayey loam (sasiCl).

Maximum dry density of solid particles decreases and optimal moisture content increases with the time of storage of mine wastes in a heap. The values of optimum moisture content and maximum dry density of solid particles measured for sediment samples MI and MII markedly differed from the values obtained for samples of mine wastes. Optimum moisture content of processed sediments was higher by at least 12% (maximum by 33%) than the optimum moisture content of fresh and stored mine wastes. Maximum dry density of solid particles of the MI samples was lower by $0.651 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $0.385 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ for the MII samples than that of fresh mine wastes.

Both waste materials were characterised by high angle of internal friction (24° - 55°) and high cohesion (21-67kPa), higher than natural compact grounds of similar grain size distribution.

Analysed coal mine wastes may be classified as moderately and poorly permeable. Their coefficient of permeability is similar to that of mineral soils like fine, silted and loamy sands. The coefficient decreases with the time of their storage on a stockpile. New materials obtained after processing dredged sediments showed coefficient of permeability c. $10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (sample MI) or between 10^{-5} and $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (sample MII). These values fall within the range typical for poorly permeable fine-grained soils like silted sands and clayey loams.