

Paweł FALACIŃSKI¹
Łukasz SZAREK²

POPIÓŁ Z TERMICZNEGO PRZEKSZTAŁCANIA KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH JAKO SKŁADNIK ZAWIESIN TWARDNIEJĄCYCH

W roku 2015 wytworzono 568,0 tys. ton s.m. komunalnych osadów ściekowych. Jest to pochodna rozwoju cywilizacyjnego Polski i budowy nowoczesnych oczyszczalni ścieków. Zaostrzające się przepisy oraz założone, strategiczne cele gospodarki ściekowej determinują rozwój nowoczesnych metod utylizacji osadów ściekowych: technik termicznych. W wyniku takich działań ilość powstałych lotnych popiołów po spaleniu komunalnych osadów ściekowych znacząco rośnie. Specyficzne właściwości powstającego popiołu nie pozwalają na wykorzystaniu go w powszechnie rozumianym przemyśle budowlanym. Trwają intensywne prace nad możliwością bezpiecznego dla środowiska zagospodarowania tego typu odpadu. Artykuł prezentuje możliwości zastosowania popiołu z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych (TPKOŚ) jako dodatku do zawiesin twardniejących stosowanych podczas realizacji przesłon przeciwfiltracyjnych w obiektach hydrotechnicznych /ochrony środowiska. Przedstawiono proces TPKOŚ, podstawowe właściwości fizyczne oraz chemiczne powstającego popiołu i skonfrontowano je z obowiązującymi wymaganiami dla dodatków do betonu. Zaprezentowano wyniki badań podstawowych parametrów technologicznych zawiesin twardniejących z dodatkiem lotnego popiołu z TPKOŚ, tj. gęstość, lepkość, odstęp doby wody, wytrzymałość strukturalną. Ponadto przedstawiono wyniki parametrów użytkowych zawiesin po stwardnieniu tj. gęstość, przepuszczalność hydrauliczną, wytrzymałość na ściskanie. Na tej podstawie przeanalizowano przydatność projektowanych zawiesin twardniejących do realizacji przesłon przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych.

Słowa kluczowe: zawiesina twardniejąca, lotny popiół z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Paweł Falaciński, Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Warszawa, ul. Nowowiejska 20, 00-653, pawel.falacinski@is.pw.edu.pl

² Łukasz Szarek, Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki, Warszawa, ul. Nowowiejska 20, 00-653, lukasz.szarek@is.pw.edu.pl

1. Wprowadzenie

Od roku 2004 zanotowano wzrost liczby oczyszczalni ścieków komunalnych o ok. 14,0 % (z 2875 do 3273 w roku 2015) [6]. Przyrost obiektów specjalistycznych, o wysokiej sprawności technologicznej powoduje wzrost ilości ubocznych produktów procesów oczyszczania ścieków, tj. komunalnych osadów ściekowych. Według danych GUS [6], ilość wytworzonych osadów ściekowych w roku 2015 wyniosła 568,0 tys. ton suchej masy (s.m.). Stały, coroczny przyrost ich ilości (na poziomie ok. 2,0 – 2,5 %) stwarza ogromne problemy z bezpiecznym ich zagospodarowaniem.

Jednym ze sposobów przetwarzania powstałych osadów ściekowych jest ich spalanie. W ostatnich latach w Polsce bardzo rozwinęły się metody termiczne, w związku z tym ilość ubocznych produktów spalania (UPS) – popiołów, znacząco wzrosła. Dane GUS [6] wyraźnie wskazują na zmniejszenie ilości osadów składowanych na składowiskach (z ok. 16 % w roku 2008 r. do ok. 5,0 % w 2015 r.) na rzecz metod termicznych (z ok. 1,0 % w roku 2008 r. do ok. 15 % w 2015 r.). Proces spalania osadów ściekowych nie eliminuje jednak problemu wysokiej zawartości w osadach fosforu oraz metali ciężkich, które trafiają do ubocznych produktów tego procesu. Powstający odpad ze względu na swoje specyficzne właściwości (wysoka wodożądność, niska aktywność, obecność metali ciężkich) jest trudny do zagospodarowania / zastosowania w powszechnie rozumianym przemyśle budowlanym. W związku z tym poszukiwane są sposoby bezpiecznego dla środowiska wykorzystania lotnych popiołów z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych (TPKOŚ) [1].

W niniejszym artykule przedstawiono badania nad możliwością wykorzystania lotnych popiołów z TPKOŚ jako składnika zawiesin twardniejących, stosowanych do realizacji przesłon przeciwfiltracyjnych w obiektach hydrotechnicznych / ochrony środowiska. Dostępne w literaturze badania zawiesin twardniejących z dodatkiem innych rodzajów UPS, np.: popiołów konwencjonalnych lub ze spalania fluidalnego, wykazały obniżenie przepuszczalności hydraulicznej w warunkach kapilarno – dyfuzyjnych [8]. Niniejsza praca przedstawia charakterystykę popiołu z TPKOŚ, badania podstawowych właściwości technologicznych (w stanie płynnym) oraz użytkowych (po stwardnieniu) zawiesin twardniejących z dodatkiem popiołu z TPKOŚ.

2. Rodzaje i właściwości zawiesin twardniejących

W budownictwie hydrotechnicznym od kilkadziesiąt lat wykorzystuje się przesłony przeciwfiltracyjne wykonywane w wykopach wąskoprzestrzennych. Wykopy rozpierane zawiesinami bentonitowo-wodnymi są wypełniane gruntem spoistym, modyfikowanymi gruntami miejscowymi, betonem, iłobetonem lub tzw. zawiesiną twardniejącą. Zgodnie z definicją [15] zawiesina twardniejąca jest to wysokowodna suspensja, zawierająca cement lub inne spoiwo oraz dodat-

kowe materiały, jak il, bentonit, granulowany żużel wielkopiecowy lub popioły lotne, wypełniacze i domieszki, która twardnieje z upływem czasu.

Jeśli wyłączyć ze składu zawiesin domieszki chemiczne, to pozostałe składniki stałe mają charakter mineralny. Niektóre z nich są produktami ubocznymi procesów technologicznych – odpadami.

Zawiesiny stosowane lub badane w Polsce można usystematyzować pod względem rodzaju zastosowanych składników w następujący sposób:

- cementowo-bentonitowo-wodne,
- cementowo-bentonitowo-wodne z domieszkami chemicznymi,
- cementowo-bentonitowo-wodne z dodatkami, takimi jak: piasek, popiół z węgla kamiennego lub brunatnego, popiół fluidalny z węgla kamiennego lub brunatnego, żużel wielkopiecowy,
- bentonitowo-wodne z dodatkami, takimi jak: popiół z węgla brunatnego, popiół z węgla kamiennego, wapno,
- cementowo-bentonitowo-wodne z dodatkami, tzw. mieszanki firmowe.

Informacje o właściwościach wyżej wymienionych zawiesin można znaleźć w literaturze przedmiotu, np. [4, 9], a w odniesieniu do gotowych mieszanek w aprobatkach technicznych wydanych dla tych wyrobów.

Przywołane w tabeli 1. wartości wybranych właściwości zawiesin twardniejących charakteryzują wymagania (kryteria dopuszczające) w stosunku do prze-

Tabela 1. Wybrane właściwości zawiesin twardniejących stosowanych do wykonywania przesłon przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych [4, 28]

Table 1. Selected properties of hardening slurries used in the fabrication of cut-off walls in flood embankments [4, 28]

Właściwości	Jednostka	Wartości	Oznaczenie według
Gęstość - metoda wgłębnego mieszania (Deep Soil Mixing – DSM) - metoda wibracyjna (Wibracyjnie Iniek-towana Przesłona Szczelinowa – WIPS) - metoda wykopu wąskoprzestrzennego	[g/cm ³]	1,30-1,50 1,50-1,60 1,15-1,40	BN-90/1785-01
Lepkość umowna (czas wypływu z lejka Marsha)	[s]	maks. 50	BN-90/1785-01
Odstój dobowy wody (po 24 h)	[%]	maks. 4,0	PN-85/G-02320
Wytrzymałość strukturalna - po 10 min	[Pa]	1,4-10,0	BN-90/1785-01
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania	[MPa]	0,5-2,0	PN-EN 12390-3: 2011
Współczynnik filtracji po 28 dniach dojrzewania	[m/s]	≤ 10 ⁻⁸	metody laboratoryjne, jak dla gruntów spoistych

słon przeciwfiltracyjnych realizowanych (różnymi metodami) w wałach przeciwpowodziowych. W stosunku do uszczelnień (przesłon przeciwfiltracyjnych) realizowanych w innych, specjalistycznych obiektach hydrotechnicznych (obwałowania w oczyszczalniach ścieków lub na składowiskach odpadów) wymagania stawiane dla tego typu budowli wyznacza się (specyfikuje) indywidualnie w zależności od wymagań projektowych.

3. Charakterystyka popiołu z TPKOŚ zastosowanego w badaniach

Popioły z TPKOŚ najczęściej powstają w wyniku spalania osadów ściekowych w piecach fluidalnych. Proces przebiega w temperaturze $600 \div 900^{\circ}\text{C}$, w której podsuszony wsad surowcowy ulega spopieleniu w zawieszynie drobnych cząstek ciała stałego, w strumieniu gazu. Taka forma przekształcania osadów ściekowych pozwala na redukcję objętości odpadu oraz uzysk energii cieplnej, a także ograniczenie zawartości związków azotu i siarki w spalinach – w związku z tym spalanie fluidalne uznawane jest za najlepszą dostępną technikę (Best Available Technology) [3].

Ze względu na swoje pochodzenie popioły z TPKOŚ charakteryzują się specyficznymi właściwościami (min. duża zawartość fosforu [10]), niespotykanymi w stosowanych do tej pory w budownictwie ubocznych produktach spalania węgla. W myśl idei Circular Economy, gospodarki blisko-zero emisyjnej, powinno się je traktować jako potencjalny produkt, np. materiał budowlany.

Wykorzystana w eksperymencie partia popiołu pochodziła z miejskiej oczyszczalni ścieków, wyposażonej w stację termicznego przekształcania osadów ściekowych, obsługującej aglomerację miejską. Partia pobrana została na przełomie kwietnia i maja 2015 r., w okresie ciągłej pracy instalacji.

Badania składu chemicznego oraz właściwości fizycznych popiołu przeprowadzono w laboratoriach Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. W tabeli 2. przedstawiono zbiorcze zestawienie wskaźników wraz z odniesieniem do norm/metod, zgodnie z którymi zostały przeprowadzone analizy chemiczne i fizyczne. Rozkładu popiołu dokonano przy użyciu nadtlenku sodu. Niska zawartość manganu w badanym materiale pozwoliła na wykorzystanie roztworu kwasu wersenowego (EDTA) jako czynnika kompleksującego kationy metali.

Zaczyny niezbędne do oznaczenia czasu początku wiązania oraz stałości objętości wykonano po zmieszaniu popiołu, cementu CEM I 42,5R i wody wodociągowej o temperaturze $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. Do przeprowadzenia badań wytrzymałościowych oraz wodożądności przygotowano zaprawę wykorzystując w/w materiały oraz piasek normowy [18-21].

Tabela 2. Zestawienie metod wykonywania badań chemicznych i fizycznych

Table 2. Methodological summary of chemical and physical examinations

Lp.	Wskaźniki chemiczne	
	Oznaczenie	Metoda badania/norma
1	Chlorki Cl ⁻	PN-EN 196-2 [19]
2	Siarczany(VI) SO ₃	PN-EN 196-2 [19]
3	Wolny tlenek wapnia CaO _{Wolny}	PN-EN 451-1 [24]
4	Reaktywny tlenek wapnia CaO _{Reaktywny}	PN-EN 197-1 [22]
5	Reaktywny ditlenek krzemu SiO ₂ _{Reaktywny}	PN-EN 197-1 [22]
6	Zawartość sumy tlenków SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ (przy użyciu EDTA)	PN-EN 196-2 [19]
7	Całkowita zawartość alkaliów jako Na ₂ O _{eq}	Metoda fotometrii płomieniowej FES ISO 9964 [7]
8	Tlenek magnezu MgO (przy użyciu EDTA)	PN-EN 196-2 [19]
9	Fosforany (V) jako P ₂ O ₅	PN-EN 450-1 [23]
10	Straty prażenia	PN-EN 196-2 [19]
Wskaźniki fizyczne		
11	Miałkość	PN-EN 451-2 [25]
12	Wskaźnik aktywności	PN-EN 450-1 [23]
13	Stałość objętości	PN-EN 196-3 [20]
14	Gęstość	PN-EN 1097-7 [14]
15	Czas początku wiązania	PN-EN 196-3 [20]
16	Wodoządnosc	PN-EN 450-1 [23]
17	Powierzchnia właściwa wg Blaine'a	PN-EN 196-6 [21]

W tabeli 3. przedstawiono wyniki oznaczeń właściwości chemicznych i fizycznych badanej partii popiołu z TPKOŚ. Uzyskane wyniki badań składu chemicznego i właściwości fizycznych popiołu z TPKOŚ (tabela 3.) skonfrontowano z wymaganiami stawianymi popiołom wykorzystywanym jako dodatek do betonu PN-EN 450-1 [23].

Zawartość w badanym popiele reaktywnego tlenku wapnia (10,5 % masy) nieznacznie przekracza górną wartość graniczną (kryterium: 10,0 % masy). Składnik ten bierze udział w tworzeniu fazy C-S-H. Potencjału hydraulicznego popiołu nie potwierdzają jednak wyniki badań wskaźnika aktywności (54,0 % wytrzymałości na ścislenie próbek referencyjnych). Ponadto na nieprzydatność popiołu, jako dodatku do betonu, wskazuje niska zawartość reaktywnego tlenku krzemu (9,1 % masy), biorącego udział w reakcji pucolanowej. Wymagania odnoszące się do sumy zawartości tlenków SiO₂, Fe₂O₃, oraz Al₂O₃ (kryterium: 70,0 % masy) – stanowiących, obok tlenku wapnia, główne składniki cementu, również nie zostały spełnione (60,2 % masy). Dzięki niskiemu stosunkowi SO₃/Al₂O₃ = 0,15 dodatek popiołu z TPKOŚ prawdopodobnie nie wpłynie negatywnie na pęcznienie betonu w wyniku tworzenia się ettringitu [27], jednak podwyższona zawartość tlenku magnezu (4,15 % masy), który w wolnej postaci

Tabela 3. Właściwości chemiczne i fizyczne popiołu z TPKOŚ w odniesieniu do wymagań PN EN 450-1 [23]

Table 3. Chemical and physical properties of ash from the thermal treatment of municipal sewage sludge in terms of EN 450-1 [23]

Lp.	Składnik chemiczny	Popiół z TPKOŚ	Wymagania EN 450-1 [23]
		[% masy]	[% masy]
1	Chlorki	$0,038 \pm 0,003$	$\leq 0,10$
2	Siarczany	$2,78 \pm 0,18$	$\leq 3,0$
3	Wolny tlenek wapnia $\text{CaO}_{\text{Wolny}}$	$0,12 \pm 0,01$	$\leq 2,5$ EN 197-1 wg 450-1 dla $> 1,5$ należy spełnić stałość objętości
4	Reaktywny tlenek wapnia $\text{CaO}_{\text{Reaktywny}}$	$10,5 \pm 2,0$	$\leq 10,0$
5	Reaktywny tlenek krzemu $\text{SiO}_{2\text{Reaktywny}}$	$9,1 \pm 0,9$	≥ 25
6	Zawartość sumy tlenków SiO_2 , Fe_2O_3 , oraz Al_2O_3	$60,2 \pm 4,5$	≥ 70
7	Całkowita zawartość alkaliów jako $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$	$4,20 \pm 0,12$	$\leq 5,0$
8	Tlenek magnezu MgO	$4,15 \pm 0,26$	$\leq 4,0$
9	Fosforany jako P_2O_5	$5,50 \pm 1,02$ mg/kg	$\leq 5,0$
10	Strata prażenia (Kategoria)	$2,09 \pm 0,07$ (A)	kat.: A $\leq 5,0$ B $\leq 7,0$ C $\leq 9,0$ %
Właściwości fizyczne			
11	Miałkość	$62,5 \pm 4,0$	kat. N $\leq 40,0$ kat. S $\leq 12,0$
12	Stałość objętości	$0,1 \pm 0,1$ mm	≤ 10 mm
13	Wskaźnik aktywności po 28 dniach	$54,0 \pm 3,4$ %	≥ 75 %
14	Początek wiązania* (w/s**)	2,03 (0,38)	$\leq 2,0$ razy dłużej niż czas początku wiązania zaczynu wykonanego z samego cementu porównawczego
15	Wodoządnosc	129 ± 1 %	≤ 95 % (tylko kategoria S)
16	Gęstość	$2263,7 \pm 154,2$ Mg/m ³	–
17	Powierzchnia właściwa wg Blaine'a	2860 ± 80 cm ² /g	–
* – wielokrotność czasu wiązania próbki referencyjnej			
** – wskaźnik wodno-spoiwowy			

uwadnia się zdecydowanie wolniej niż CaO, może powodować nierównomierną zmianę objętości przy dojrzewaniu tworzyw na bazie badanego popiołu [12]. Ze względu na określenie zawartości tylko rozpuszczalnej formy fosforanów (jako P_2O_5), nie jest znany całkowity udział masowy fosforu ogólnego, który dochodzić może nawet do 1,5 % [10]. Obecność w popiołach fosforu może wpływać negatywnie na alit oraz opóźniać proces hydratacji cementu w betonach na bazie

tego dodatku [11]. Prawdopodobnie stąd wynika wydłużony początek czasu wiązania zaczynu na bazie rozpatrywanego popiołu. Wysoka miałość popiołu (ponad 60,0 % masy) oraz znacznie podwyższona wodożądność (129,0 % w porównaniu z zaprawą referencyjną) wpłynie negatywnie na urabialność mieszanki betonowej.

Popioły z TPKOŚ nie spełniają założeń normy PN-EN 450-1 [23-25]. Zapisy normy PN-EN 197-1 [22] dyskwalifikują popioły z TPKOŚ jako składnik główny oraz drugorzędny cementu ze względu na genezę (palenisko nieopalone pyłem węglowym), a także ze względu na miałość i wysoką wodożądność (tabela 2.).

Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku popiołów ze spalania węgla brunatnego (zbyt duża zawartość reaktywnego tlenku wapnia [26, 5]), jednak są one powszechnie stosowane jako dodatek do różnego rodzaju spoiw [22] oraz mieszanek betonowych na podstawie aprobat technicznych.

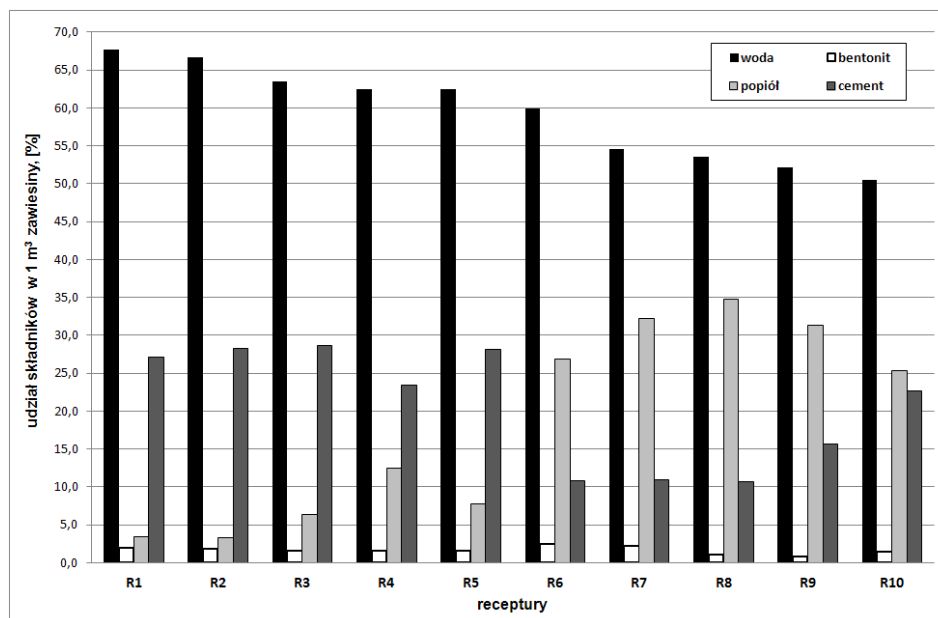
Pomijając kwestie formalne popiół z TPKOŚ cechuje wiele problematycznych dla technologii betonu właściwości, które nie stanowią przeszkody do stosowania go w technologii zawiesin twardniejących.

Technologia zawiesin twardniejących nie stawia popiołom wyżej wymienionych wymagań, w szczególności wymagań dotyczących wodożądności. Wynika to z faktu, że woda stanowi składnik mieszaniny przeważający objętościowo i jej ilość jest wystarczająca do zwilżenia dodatków mineralnych oraz zachowania odpowiedniej konsystencji zawiesiny. Wpływ wodożądności na mrozoodporność jest pomijalny ze względu na fakt, iż zawiesiny nie są mrozo odporne, a konstrukcje z nich wykonywane (głównie w podłożu gruntowym) są chronione przed przemarzaniem [9].

4. Receptury zawiesin twardniejących

Do sporządzenia zawiesin twardniejących wykorzystano: wodę wodociągową, bentonit sodowy (DYWONIT), cement CEM I 32,5R, lotny popiół z TPKOŚ.

Na rysunku 1. przedstawiono udział wymienionych składników w % na 1 m³ zawiesiny (receptury od R1 do R10).



Rys. 1. Procentowy udział składników w 1,0 m³ zawiesiny

Fig 1. The percentage of components in 1,0 m³ of slurry

5. Metody badań

5.1. Badania zawiesin w stanie płynnym (właściwości technologiczne)

Pomiary gęstości ρ zawiesin w stanie płynnym wykonano przy użyciu wagi ramiennej typu Baroida [2].

Lepkość umowną L zawiesiny badano przy użyciu wiskozymetru wypływowego (lejek Marsha). Mierzono czas (w sekundach) wypływu 1000 ml płynnej zawiesiny (z 1500 ml zawiesiny umieszczonej w lejku) [2].

Odstój dobowy wody O_d określano jako procentowy udział objętości wody wydzielającej się samoistnie z 1,0 dm³ zawiesiny po dobie jej pozostawiania w bezruchu w cylindrze pomiarowym [13].

Oznaczenie wytrzymałości strukturalnej zawiesiny płynnej (największej wartości naprężenia ścinającego, przy której następuje zniszczenie struktury układu dyspersyjnego) wykonano za pomocą szirometru [2].

Próbki zawiesiny do badań po stwardnieniu były formowane w cylindrycznych formach stalowych oraz z PCV o $d = h = 80$ mm. Do momentu związania próbki były przechowywane w formach pod okryciem z folii, w pomieszczeniu laboratoryjnym. Po 2-3 dobach próbki były wyjmowane z form stalowych i zanurzane całkowicie w wodzie wodociągowej, w której dojrzewały do momentu badania. Próbki wykonywane w formach z tworzywa sztucznego (PCV) (rys. 2.)

i przeznaczone do badań przepuszczalności hydraulicznej nie były wyjmowane z form, ale umieszczane w wodzie, i tak przechowywane do momentu badania. Wszystkie próbki dojrzewały w stałej temperaturze $+18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

5.2. Badania zawiesin po stwardnieniu

Oznaczenie wszystkich właściwości po stwardnieniu przeprowadzono po 28 dniach dojrzewania próbek.

Gęstość objętościową ρ_o stwardniałej zawiesiny określano na próbkach walcowych z form stalowych według procedury opisanej w normie [16].

Przepuszczalność hydrauliczna k_{10} stwardniałych zawiesin twardniejących jest bardzo niska (analogicznie jak gruntów spoistych) i w związku z tym czas potrzebny do uzyskania równowagi dopływu i odpływu wody z próbki w badaniach ze stałym spadkiem hydraulicznym jest długi. W takim przypadku wykorzystuje się metody badania przepuszczalności przy zmiennym spadku hydraulicznym. Sposób ten polega na określaniu, w ustalonych chwilach czasu t_1 , t_2 , itd., wartości naporów hydraulicznych h_1 , h_2 , itd. wywieranych przez słup wody w rurce dopływowej, o powierzchni przekroju a , podczas przepływu cieczy przez próbkę o długości (wysokości) L_p i powierzchni przekroju poprzecznego A . W tym przypadku przepuszczalność hydrauliczną można wyznaczyć ze wzoru (1):

$$k_T = \frac{a \cdot L_p}{A \cdot \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

gdzie: k_T – przepuszczalność hydrauliczna w temperaturze T [m/s];

a – powierzchnia przekroju poprzecznego rurki zasilającej [m²];

L_p – długość (wysokość) badanej próbki [m];

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki, [m²];

$\Delta t = t_2 - t_1$, – czas między pomiarami naporów h_1 i h_2 [s];

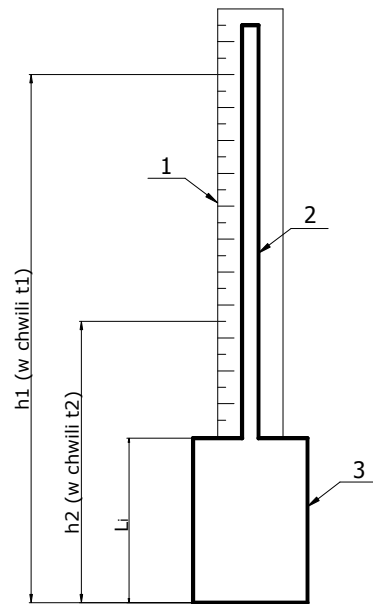
h_1 i h_2 – wartości naporów hydraulicznych w chwilach t_1 i t_2 , [m].

Badania przepuszczalności hydraulicznej zawiesin twardniejących przy użyciu wody wodociągowej zostały przeprowadzone w specjalnie wykonanych, chemoodpornych aparatach z tworzywa sztucznego (pleksi i PVC) (rys. 2.). Działanie na badaną próbkę medium filtrującego (woda pitna) odbywało się w sposób grawitacyjny. Wykonywano pomiary z malejącym, początkowym spadkiem hydraulicznym. Zakres stosowanych gradientów wynosił od 0 do 45. Pomiary naporów hydraulicznych (odczyt na skali pomiarowej) wykonywano w kilku odstępach czasowych (od 3 do 6), wynoszących 30 min. W celu zapewnienia powtarzalności wyników do badania wykorzystywano po 3 próbki zawiesiny w serii.

Przepuszczalność hydrauliczna obliczona ze wzoru (1) nie uwzględnia wpływu temperatury filtrującej cieczy. Wartości k_T uzyskane z badań (w temperaturze T) przeliczano na wartości k_{10} odpowiadające temperaturze $+10^{\circ}\text{C}$. Korzystano przy tym ze wzoru (2):

$$k_{10} = \frac{k_T}{0,7 + 0,03T} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

Wytrzymałość na ściskanie f_c zawiesiny twardniejącej określano na próbkach walcowych z form stalowych, według normy [17].



Rys. 2. Schemat badania przepuszczalności hydraulicznej przy zmiennym spadku hydraulicznym: 1 – skala pomiarowa; 2 – rurka z PVC; 3 – forma z próbką; h_1 , h_2 – napory hydrauliczne w chwilach t_1 , t_2

Fig 2. Scheme of testing hydraulic conductivity with variable hydraulic gradient:

1 – measuring scale; 2 – PVC pipe; 3 – sample of hardening slurry; h_1 , h_2 – hydrodynamic thrust in moments t_1 , t_2

6. Wyniki badań

6.1. Właściwości technologiczne zawiesin twardniejących

Wartości parametrów technologicznych badanych zawiesin twardniejących (w stanie płynnym) przedstawiono w formie graficznej na rysunkach 2-5.

6.2. Właściwości użytkowe zawiesin twardniejących

W tabeli 4. przedstawiono wartości średnie badanych parametrów użytkowych zawiesin twardniejących (po stwardnieniu). W nawiasach podano miarę rozrzutu wyników, w formie współczynnika zmienności ν [%].

Tabela 4. Wartości parametrów użytkowych (po stwardnieniu) badanych zawiesin twardniejących

Table 4. Functional parameters of hardening slurries (after hardening)

Lp.	Zawiesi- na	Wskaźniki		Gęstość obje- tościowa ρ_o [g/cm ³]	Przepuszczalność hydrauliczna k_{10} [m/s]	Wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]
		w/s	w/c			
1	R1	2,09	2,50	1,321 (0,5)	$2,24 \times 10^{-8}$ (13,9)	1,03 (10,2)
2	R2	1,99	2,35	1,333 (0,1)	$2,32 \times 10^{-8}$ (15,2)	1,19 (0,6)
3	R3	1,74	2,22	1,355 (0,5)	$1,03 \times 10^{-8}$ (32,8)	1,41 (1,5)
4	R4	1,67	2,67	1,363 (0,5)	$1,51 \times 10^{-8}$ (16,4)	0,67 (1,1)
5	R5	1,67	2,22	1,368 (0,5)	$4,99 \times 10^{-9}$ (30,2)	1,58 (4,0)
6	R6	1,49	5,56	1,374 (1,4)	$1,07 \times 10^{-6}$ (19,7)	0,20 (13,4)
7	R7	1,20	5,00	1,398 (1,3)	$8,84 \times 10^{-7}$ (15,2)	0,21 (21,7)
8	R8	1,15	5,00	1,429 (1,1)	$5,89 \times 10^{-7}$ (10,2)	0,23 (10,1)
9	R9	1,09	3,33	1,462 (1,0)	$3,15 \times 10^{-7}$ (15,2)	0,33 (8,5)
10	R10	1,02	2,22	1,504 (0,7)	$3,88 \times 10^{-8}$ (11,1)	1,11 (23,4)

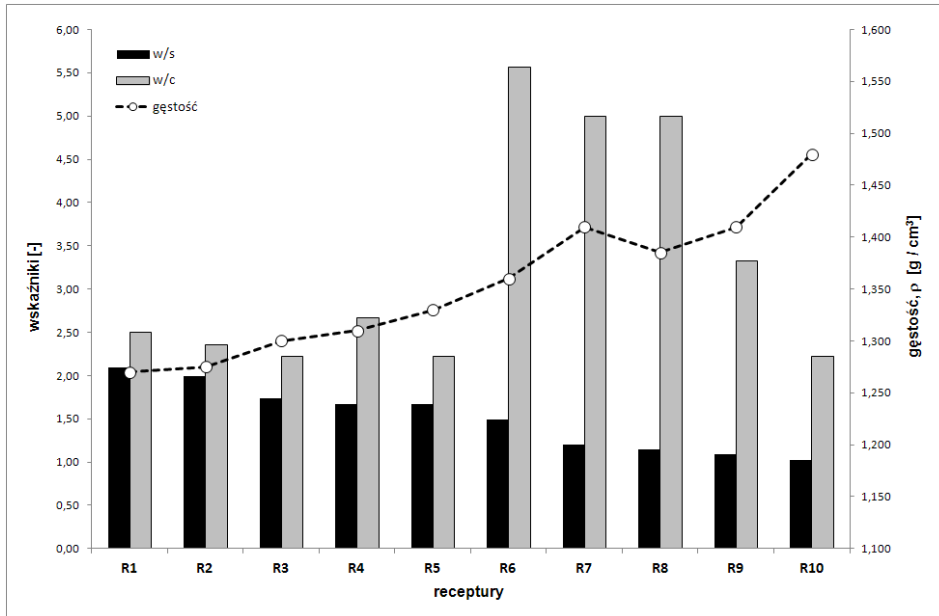
7. Analiza wyników badań

Wartości parametrów technologicznych badanych zawiesin przedstawiono na rysunkach 2 ÷ 5 w odniesieniu do wskaźników: w / s (woda / suche składniki) oraz w / c (woda / cement).

Wielkości zmierzone porównano z wymaganiami podanymi w tabeli 1., tj. wartościami parametrów technologicznych zawiesin twardniejących stosowanych do wykonywania przesłon przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych.

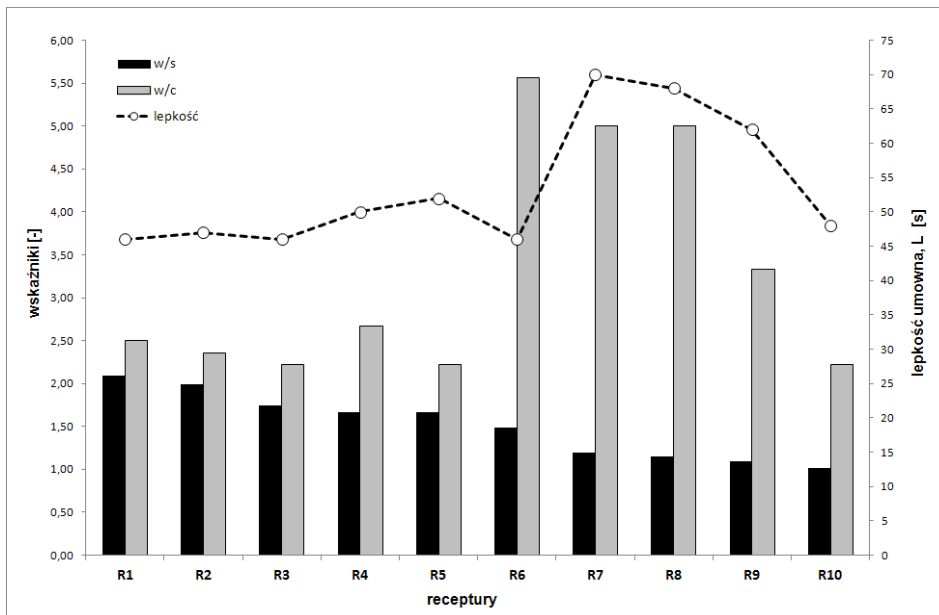
Analizując gęstość (Rys. 3.) należy zauważyć, iż jej wartość jest na poziomie wystarczającym do zapewnienia stateczności głębionego wykopu (z wyłączeniem metody wibracyjnej WIPS) dla wszystkich badanych receptur w technologii wgłębnego mieszania gruntu (DSM) oraz wykopu wąskoprzestrzennego. Wartość gęstości zawiesin rośnie (generalnie), wraz ze spadkiem wskaźnika w / s.

Lepkość umowna zawiesin R7, R8 i R9 przekracza wartości dopuszczalne (szacowane na maks. 50 s) ze względu na możliwość transportu hydraulicznego zawiesiny w miejsce wbudowania oraz jej przemieszczanie w drążonym wykopie. Zmiany wartości lepkości umownej analizowanych zawiesin względem wskaźników w / c i w / s nie znajdują potwierdzenia istotnego statystycznie (Rys. 4.).



Rys. 3. Gęstości vs. współczynniki w / s oraz w / c

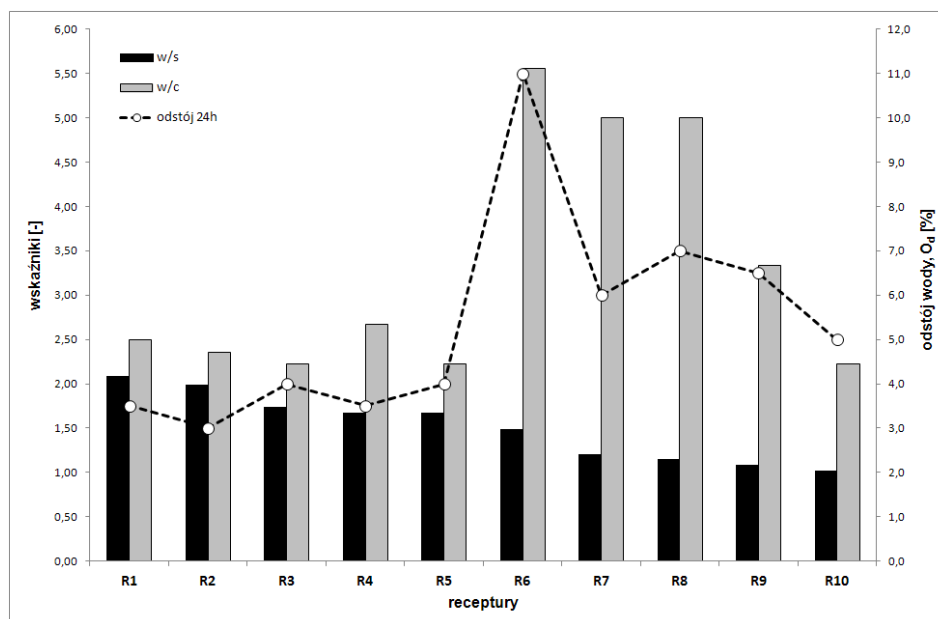
Fig. 3. Density vs. w / s and w / c coefficients



Rys. 4. Lepkość umowna vs. współczynniki w / s oraz w / c

Fig. 4. Conventional viscosity vs. w / s and w / c coefficients

Zawiesiny od R6 do R10 nie spełniły wyznaczonego kryterium (tab. 1.): maks. wartości odstępu wody ($< 4,0\%$) określonego po 24 godzinach (Rys. 5). W badanych zawiesinach stwierdzono wyraźną korelację zmian wartości odstępu dobowego jedynie względem wskaźnika w/c (wsp. korelacji $r = 0,85$).



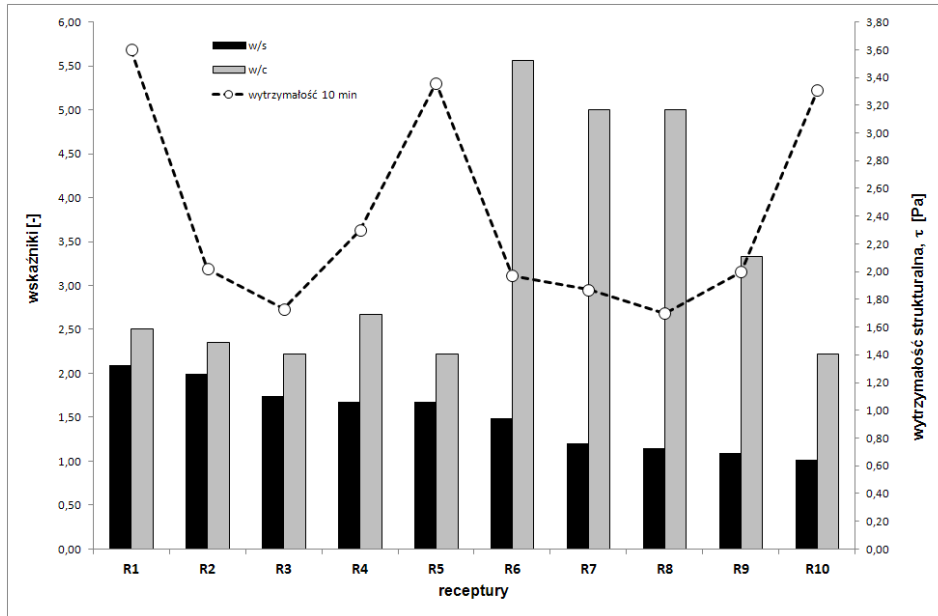
Rys. 5. Odstój wody vs. współczynniki w/s oraz w/c

Fig. 5. Water setting vs. w/s and w/c coefficients

Wartość dopuszczalną wytrzymałości strukturalnej (po 10 minutach, powyżej $1,4\text{ Pa}$ [28]) osiągnęły wszystkie badane zawiesiny (Rys. 6.), jednak nie stwierdzono statystycznie istotnej zależności tego parametru od wskaźników w/c oraz w/s .

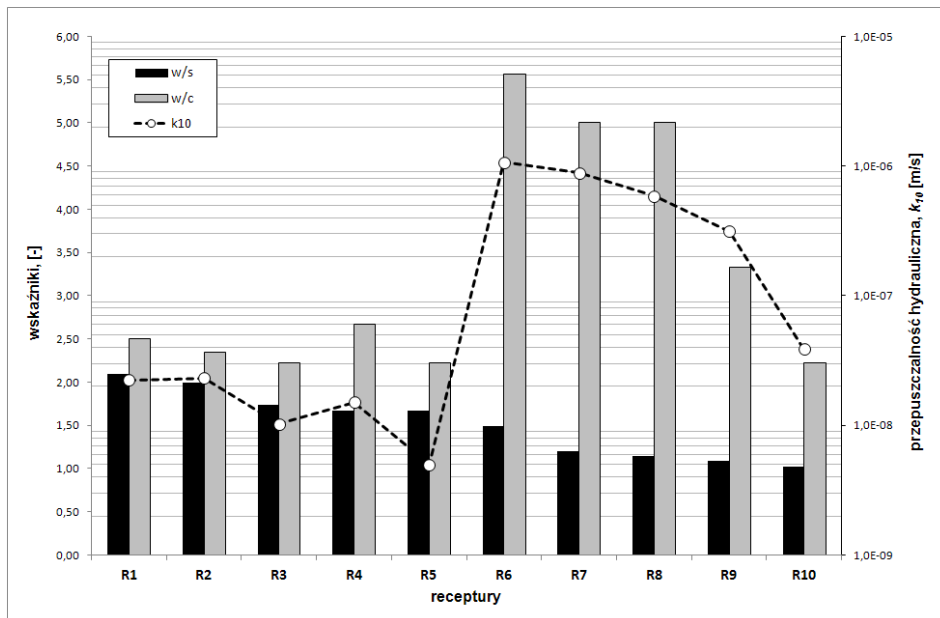
Odnośnie do parametrów użytkowych badanych zawiesin (tab. 4.) można stwierdzić, że gęstość objętościowa po stwardnieniu jest na akceptowalnym poziomie dla wszystkich zawiesin, a zmiana (wzrost) tego parametru jest (generalnie) odwrotnie proporcjonalna do wskaźnika w/s .

Kryterium dotyczące przepuszczalności hydraulicznej (wartość preferowana $k_{10} \leq 1,0 \times 10^{-8}\text{ m/s}$) zostało spełnione jedynie w przypadku receptury R5 ($k_{10} = 4,99 \times 10^{-9}\text{ m/s}$). Nieznaczne przekroczenie wartości progowej zanotowano w przypadku zawiesin R1 – R4 (Rys. 7.). Wszystkie zawiesiny (generalnie) wykazały spadek wartości k_{10} wraz z obniżeniem wskaźnika w/c . Przedstawione wyniki potwierdzają silną zależność ($r = 0,97$) szczelności zawiesiny (k_{10}) od wskaźnika wodnocementowego (w/c).



Rys. 6. Wytrzymałość strukturalna vs. współczynniki w / s oraz w / c

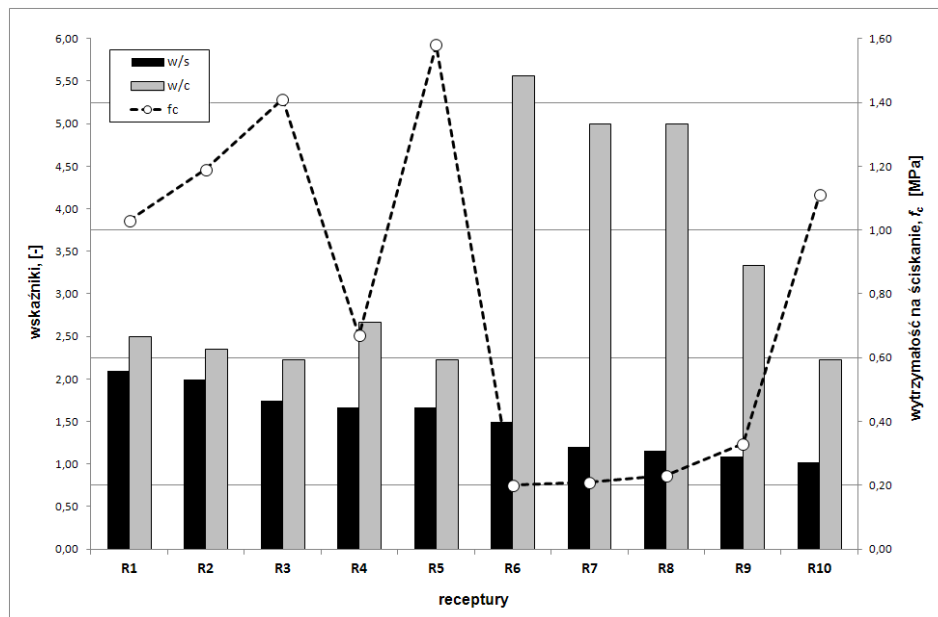
Fig. 6. Structural strength vs. w / s and w / c coefficients



Rys. 7. Przepuszczalność hydrauliczna vs. współczynniki w / s oraz w / c

Fig. 7. Hydraulic conductivity vs. w / s and w / c coefficients

W przypadku zawieszin twardniejących stosowanych w realizacji przesłon przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych, wartości wytrzymałości na ściskanie projektuje się na poziomie: od 0,5 do 2,0 MPa (tab. 1.). Wartości progowe f_c uzyskały jedynie zawiesziny R1 – R5 oraz R10 (rys. 8.). Stwierdzono związek między wytrzymałością na ściskanie, a wskaźnikiem w/c ($r = -0,88$). W przypadku zawieszin, których wytrzymałości na ściskanie spełniły wymagania (od R1 do R5 oraz R10), korelacja f_c i wskaźnika (w/c) jest jeszcze silniejsza ($r = -0,98$).



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie vs. współczynniki w/s oraz w/c

Fig. 8. Compressive strength vs. w/s and w/c coefficients

8. Podsumowanie

Ujmując analizowane właściwości kompleksowo, tj. zarówno właściwości technologiczne jak i użytkowe, należy stwierdzić, iż wszystkie wymagania stawiane zawieszinom twardniejącym, stosowanym do realizacji uszczelnień wałów przeciwpowodziowych (tab. 1.), spełniła jedynie zawieszina R5.

Wskazuje to na możliwość zastosowania lotnego popiołu z termicznego przekształcania komunalnych osadów ściekowych jako dodatku do zawieszin twardniejących.

W celu poprawy szczelności i wytrzymałości badanych zawieszin należy zwiększyć udział spoiwa. Może to być stosowany podczas badań cement portlandzki lub inne mineralne materiały wiążące, np. mielony żużel wielkopiecowy

lub lotny popiół ze spalania węgla kamiennego lub brunatnego (Uboczny Produkt Spalania), co powinno zostać potwierdzone w odpowiednich badaniach.

Przedstawione wymagania odnośnie do zawiesin twardniejących nie wyczerpują zagadnienia ekspozycji zawiesin na inne oddziaływania, np. agresję chemiczną środowiska zanieczyszczonych wód gruntowych, gdzie często wykonywane są przesłony przeciwfiltracyjne.

Prezentowane badania nie wyczerpują tematu i niezależnie od możliwego wykorzystania przedstawionych wyników w praktyce projektowania przesłon przeciwfiltracyjnych niezbędne jest kontynuowanie prac badawczych. Niewątpliwie istotne będą eksperymenty związane z odpornością korozyjną zawiesin z dodatkiem popiołów z TPKOŚ oraz immobilizacji związków niebezpiecznych w matrycy zawiesiny.

Zaproponowany kierunek wykorzystania lotnego popiołu z termicznego przekształcania osadów ściekowych wpisuje się w szeroko pojętą politykę zrównoważonego rozwoju.

Literatura

- [1] Białowiec Andrzej, Wojciech Janczukowicz, Mirosław Krzemieniewski. 2009. „Możliwości zagospodarowania popiołów po termicznym unieszkodliwianiu osadów ściekowych w aspekcie regulacji prawnych”. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska nr 11: 959-971.
- [2] BN-90/1785-01, 1990, Płuczka wiertnicza. Metody badań w warunkach polowych.
- [3] Borowski Gabriel, Magdalena Gajewska, Elżbieta Haustein. 2014. „Możliwości zagospodarowania popiołów z termicznego przekształcania osadów ściekowych w kotłach fluidalnych”. Inżynieria i Ochrona Środowiska, nr 17.
- [4] Borys M.. 2012. „Przegrody przeciwfiltracyjne z zawiesin twardniejących w korpach i podłożu wałów przeciwpowodziowych”. Wiadomości melioracyjne i łąkarskie, nr 2 (433): 89-95.
- [5] Giergiczny Zbigniew. 2013. *Popiół lotny w składzie cementu i betonu*. Opole. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [6] Główny Urząd Statystyczny. Ochrona środowiska. 2004-2016.
- [7] ISO 9964-3:1993, 1993, Water quality – Determination of sodium and potassium – Part 3: Determination of sodium and potassium by flame emission spectrometry.
- [8] Kledyński Zbigniew, Paweł Falaciński, Agnieszka Machowska, Dyczek J., Kotwica Ł. 2016. „Utilisation of CFBC fly ash in hardening slurries for flood-protection dikes”. Archives of Civil Engineering, vol. LXII (3): 75-87.
- [9] Kledyński Zbigniew, Leszek Rafalski. 2009. *Zawiesiny twardniejące*. Warszawa. KILiW PAN, IPPT PAN.
- [10] Łukawska Monika. 014. „Analiza specjacyjna fosforu w osadach ściekowych po termicznym spalaniu”. Inżynieria i Ochrona Środowiska, nr 17 (3): 433-439.
- [11] Małolepszy Jan, Ewelina Tkaczewska. 2006. „Wpływ popiołów lotnych ze współspalania węgla kamiennego i biomasy na proces hydratacji i właściwości cementu”. w: Materiały konferencji Dni Betonu, Wisła: 591-601.

- [12] Pachowski Jan. 1976. *Popioły lotne i ich zastosowanie w budownictwie drogowym*. Warszawa. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [13] PN-85/G-02320, 1985, Wiertnictwo. Cementy i zaczyny cementowe do cementowania w otworach wiertniczych.
- [14] PN-EN 1097-7:2008, 2008, Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw – Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza - Metoda piknometryczna.
- [15] PN-EN 12390-3, 2011, Badanie betonu. Część 3: Wytrzymałość na ścislenie próbek do badań.
- [16] PN-EN 12390-7, 2011, Badanie betonu. Część 7: Gęstość betonu.
- [17] PN-EN 1538+A1, 2015-08, Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Ściany szczelinowe.
- [18] PN-EN 196-1:2006, 2006, Metody badania cementu – Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.
- [19] PN-EN 196-2:2006, 2006, Metody badania cementu - Część 2: Analiza chemiczna cementu.
- [20] PN-EN 196-3+A1:2011,2011, Metody badania cementu – Część 3: Oznaczanie czasów wiązania i stałości objętości.
- [21] PN-EN 196-6:2011, 2011, Metody badania cementu - Część 6: Oznaczenie stopnia zmielenia.
- [22] PN-EN 197-1:2012, 2012, Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [23] PN-EN 450-1:2012, 2012, Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności.
- [24] PN-EN 451-1:2004, 2004, Metoda badania popiołu lotnego – Część 1: Oznaczanie zawartości wolnego tlenku wapnia.
- [25] PN-EN 451-2:1998, 1998, Metoda badania popiołu lotnego – Oznaczanie mialkości przez przesiewanie na mokro.
- [26] Ostrowski M.. 2011. „Charakterystyka morfologii popiołów lotnych ze spalania węgla brunatnych”. Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, nr 4: 136-150.
- [27] Rajczyk Krystyna. 2012. *Popioły lotne z kotłów fluidalnych i możliwości ich uszlachetniania*. Opole. Wydawnictwo Instytut Śląski.
- [28] Szczygielski Tomasz. 2009. „Uboczne produkty spalania w drogownictwie”. Normy a aprobaty techniczne, Autostrady, nr 10: 72-81.

FLY ASH FROM THERMAL UTILIZATION OF MUNICIPAL SEWAGE SLUDGE AS A POTENTIAL BUILDING MATERIAL

S u m m a r y

In recent years there has been a rapid increase in by-products in the purification of waste water treatment – sewage sludge. It is a derivative of Polish civilization development and construction of modern sewage treatment plants. More stringent regulations and established strategic goals wastewater determine the development of modern methods of disposal of sewage sludge: thermal techniques. As a result of such actions amount resulting fly ash from thermal utilization of municipi-

pal sewage sludge has been growing significantly. Intensive work on the possibility of environmentally safe development of this type of waste.

The article presents the characteristics of ash formation as well as its basic physical and chemical properties against the background of the existing criteria for additives for concrete materials. The main part of the paper presents the results of technological and functional parameters of hardening slurries with the addition of fly ash from thermal treatment of municipal sewage sludge. As a comparative criterion applicable requirements in relation to slurries applied during the implementation of the cut-off walls in water embankment.

Key words: hardening slurry, fly ash from thermal utilization of municipal sewage sludge

Przesłano do redakcji: 25.06.2017 r.

Przyjęto do druku: 01.09.2017 r.