

Uszczelnianie obiektów hydrotechnicznych z użyciem zawiesin twardniejących z dodatkiem popiołów ze spalania odpadów komunalnych

Sealing of hydrotechnical structures using hardening slurries with the addition of ash from municipal waste incineration



dr hab. inż. Paweł Fałaciński, prof. PW

Politechnika Warszawska,
Wydział Inżynierii Środowiska,
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki
pawel.falacinski@pw.edu.pl
ORCID: 0000-0001-7090-5233



dr inż. Łukasz Szarek

Politechnika Warszawska,
Wydział Inżynierii Środowiska,
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki
lukasz.szarek@pw.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5794-9271

Streszczenie

W ostatnich latach w Polsce obserwuje się wyraźny wzrost objętości wytwarzanych odpadów komunalnych. W kontekście założeń gospodarki o obiegu zamkniętym kluczowe jest wypracowanie technologii umożliwiających bezpieczne przetwarzanie i wykorzystanie odpadów. Jednym z takich kierunków jest termiczne przekształcanie odpadów. W 2020 r. poddano temu procesowi 21,6% odpadów komunalnych. Jednym z obszarów wykorzystania materiałów odpadowych jest uszczelnianie ziemnych obiektów hydrotechnicznych takich jak: wały

przeciwpowodziowe, zapory wodne czy nasypy składowisk odpadów. W tym celu stosuje się przesłony przeciwfiltracyjne wykonane z zawiesin twardniejących. W artykule przedstawiono ocenę możliwości wykorzystania popiołów ze spalania odpadów komunalnych jako dodatku do zawiesin twardniejących. Opisano parametry technologiczno-użytkowe zawiesin twardniejących z dodatkiem przedmiotowych popiołów. Zaproponowano dalsze kierunki badań zawiesin twardniejących pod kątem ich wpływu na środowisko.

Słowa kluczowe stałe odpady komunalne, popiół lotny, zawiesina twardniejąca, przesłona przeciwfiltracyjna, obiekt hydrotechniczny, gospodarka o obiegu zamkniętym

Abstract

In recent years, there has been a marked increase in the amount of municipal waste generated in Poland. In the context of the assumptions of the circular economy, the key is the availability of technologies that would make it possible to safely process and reuse waste, especially when it is difficult to manage. One of such directions is the thermal treatment of waste. In 2020, 21.6% of municipal waste was subjected to this process. One of the areas of use of waste materials is the sealing of earth hydrotechnical structures, such as: flood

embankments, water dams, embankments of waste landfills. For this purpose, cut-off screens made of hardening slurries are used. The article presents an assessment of the possibility of using ashes from municipal waste incineration as an additive to hardening slurries. The technological and operational parameters of the hardening slurries with the addition of the subject ashes are presented. Further directions of research on hardening slurries were proposed in terms of their impact on the environment.

Keywords municipal solid waste, fly ash, hardening slurry, cut-off wall, hydrotechnical structure, circular economy



WPROWADZENIE

Gospodarka odpadami komunalnymi (OK) stanowi wyzwanie nawet dla krajów wysoko rozwiniętych. Istnieje dodatnia korelacja między rozwojem gospodarczym kraju a ilością wytwarzanych odpadów [1]. Według danych GUS [2] w Polsce od 2015 do 2018 r. odnotowano ponad 14% wzrost ilości wytworzonych OK, co przełożyło się na średnią 325 kg odebranych odpadów na mieszkańca kraju (OK są odpadami krytycznymi dla systemu gospodarowania odpadami w Polsce [3]). Wartość ta jest znacznie poniżej średniej unijnej (489 kg per capita w 2018 r. [3]). Podobną sytuację obserwujemy w innych krajach regionu: Rumunii, Słowacji, Estonii, Łotwie oraz Republice Czeskiej. Wydaje się, że problem ten jest bezpośrednio związany z dwoma zjawiskami: powstawaniem nielegalnych wysypisk oraz spalaniem odpadów w piecach domowych. Stopniowe uszczelnianie systemu odbioru OK oraz rosnąca świadomość ekologiczna mieszkańców pozwalają przypuszczać, że ilość odbieranych w Polsce OK będzie rosła.

System gospodarki OK w Polsce jest regulowany m.in. przez Ustawę z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach [6], im-

plementującą wiele unijnych dyrektyw z zakresu gospodarowania odpadami i ochrony środowiska [4, 5]. Ustawa ta wprowadziła hierarchię postępowania z odpadami, na której szczycie znajduje się „zapobieganie powstawaniu odpadów”, dalej: „przygotowanie do ponownego użycia”, „recykling”, „inne procesy odzysku” oraz „unieszkodliwianie”.

Termiczne przekształcanie odpadów komunalnych (TPOK) w celu odzyskania energii zaliczane jest do grupy odzysku [6]. W 2018 r. w Polsce zagospodarowano w ten sposób 23% OK [2] i obserwuje się tendencję do budowy kolejnych spalarni. Istotną rolę w spalaniu odpadów komunalnych mogłyby odgrywać cementownie, jednak ich wykorzystanie do tego celu ogranicza ilość odpadów nadających się do produkcji paliwa alternatywnego oraz słabo rozwinięty w kraju przemysł przetwarzania odpadów [7].

Proces TPOK powinien stanowić dopełnienie systemu ponownego użycia i recyklingu ze względów ekonomicznych lub techniczno-organizacyjnych [3], co pozwoli domknąć obiegi na poziomie odzysku zawartej w odpadach energii. Ubocznymi produktami procesu są m.in. żużle

i popioły paleniskowe oraz popioły lotne, które w myśl idei gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) oraz hierarchii postępowania z odpadami [6] należy tak zagospodarować, aby stanowiły pełnowartościowy produkt i przestały być traktowane jako odpad (obecnie odpady te są utylizowane, co stanowi duży koszt dla zakładów termicznego przekształcania). Oczekuje się, że przyczyni się to do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych oraz zużycia surowców naturalnych, a także wzmocnienia technologicznych aspektów GOZ. W tym celu konieczne jest rozpoznanie właściwości wytwarzanych odpadów oraz możliwości ich wykorzystania.

W pracy skupiono się na próbie zagospodarowania w zawieszinach twardniejących dwóch rodzajów popiołu z TPOK o kodach 19 01 07* oraz 19 01 13* według Rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów [8].

Zawieszina twardniejąca to tiksotropowa mieszanina (suspensja) wody, spoiwa i materiału ilastego, a także – w zależności od przeznaczenia – innych składników (np. żużla wielkopieczowego i popiołów lotnych) mających zastosowanie przy

Tab. 1. Wybrane właściwości zawieszin twardniejących stosowanych w realizacji przesłon przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych [11, 12]

Właściwości	Wartość	Metoda oznaczania
Właściwości w stanie płynnym		
Gęstość objętościowa:		
metoda szczelinowa (wykopu wąskoprzestrzennego) [g/cm ³]	1,15–1,40	[13]
deep soil mixing (DSM) [g/cm ³]	1,30–1,50	
metoda wibracyjna (wibracyjnie iniektowana przesłona szczelinowa – WIPS) [g/cm ³]	1,50–1,60	
Lepkość umowna (czas wyptywu z lejka Marsha) [s]	≤50	[13]
Odstój dobowy wody	≤4,0%	[9]
Wytrzymałość strukturalna po 10 min [Pa]	1,4–10,0	[13]
Właściwości po stwardnieniu po 28 dniach dojrzewania		
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	0,5–2,0	[14]
Współczynnik filtracji k [m/s]	≤10 ⁻⁸	metody laboratoryjne jak dla gruntów spoistych

wykonywaniu konstrukcji budowlanych w podłożu gruntowym lub przy wypełnianiu szczelin i otworów w gruncie [9, 10].

Wykonanie elementów z zawieszin twardniejących może być zrealizowane metodą jedno- lub dwufazową [9]:

- W metodzie jednofazowej w drążonym wykopie płynna zawieszina twardniejąca wywiera ciśnienie hydrostatyczne, zapewniając stateczność wykopu w trakcie głębenia, a jej składniki uszczelniają ściany wykopu i tym samym uniemożliwiają wnikanie zawiesziny w grunt. Po osiągnięciu zakładanej głębokości głębenia zawieszina pozostaje w wykopie. Dzięki zawartości spoiwa zawieszina twardniejąca wiąże i przechodzi w porowate ciało stałe.

- W metodzie dwufazowej wykorzystuje się zawiesziny rozpierające, najczęściej bentonitowe, bez dodatku spoiwa. Charakter i warunki drążenia wykopu są analogiczne jak w metodzie jednofazowej, ale po osiągnięciu projektowanej głębokości wykopu zawieszinę rozpierającą wymienia się na zawieszinę twardniejącą, dzięki czemu uzyskuje się większą homogeniczność budowli.

Zawiesziny twardniejące stosuje się zwłaszcza do budowy przesłon przeciwfiltracyjnych. Przesłony takie mają zastosowanie: do zabezpieczenia wykopów przed napływem wód gruntowych, w nasypach i podłożu zapór wodnych, w wałach przeciwpowodziowych, a także do uszczelniania składowisk odpadów (przeciw-

działają przedostawaniu się zanieczyszczeń do gruntu i wód gruntowych) [9].

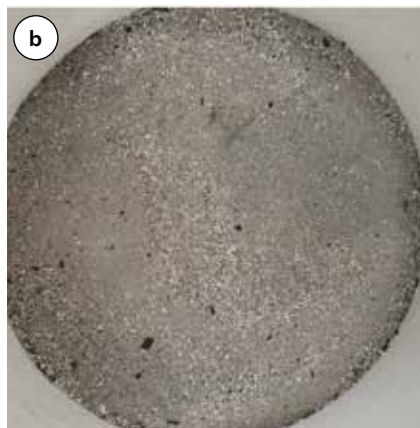
W tab. 1 przedstawiono uzyskane na podstawie doświadczeń krajowych konkretne wymagania dotyczące właściwości zawieszin twardniejących stosowanych do wykonania przesłon przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych wraz z metodami ich oznaczania.

MATERIAŁY I METODY

Popioły

Dodatki do zawiesziny stanowiły popioły o kodach 19 01 07* (odpady stałe z oczyszczania gazów odlotowych – P1) oraz 19 01 13* (popioły lotne zawierające substancje niebezpieczne – P2) według [8]. Popioły powstały w wyniku spalania OK w piecu rusztowym. Proces oczyszczania spalin polegał na:

- odazotowaniu spalin metodami pierwotnymi oraz wtórną metodą selektywnej niekatalizacyjnej redukcji tlenków azotu (SNCR);
- oczyszczeniu spalin metodą półsuchą z wykorzystaniem zawiesziny mleczka wapiennego, połączoną z metodą strumieniowo-pyłową z wykorzystaniem węgla aktywnego (w celu redukcji kwaśnych zanieczyszczeń, pyłów, metali ciężkich oraz dioksyn i furanów);
- odpylaniu spalin z wykorzystaniem filtra tkaninowego.



Rys. 1. Popioły o kodach: a) 19 01 07*, b) 19 01 13*

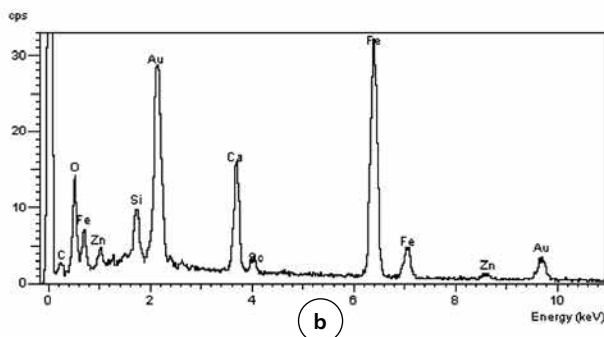
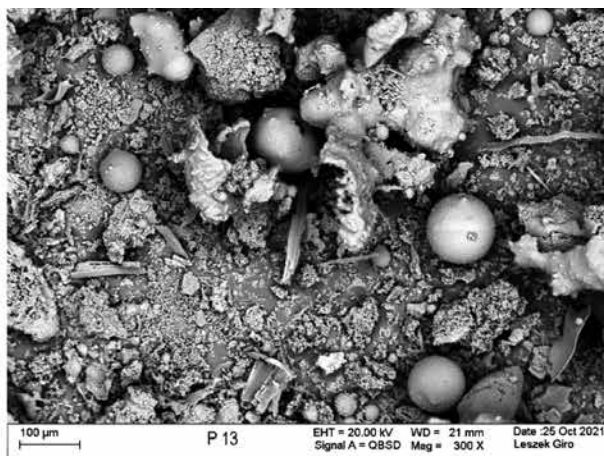
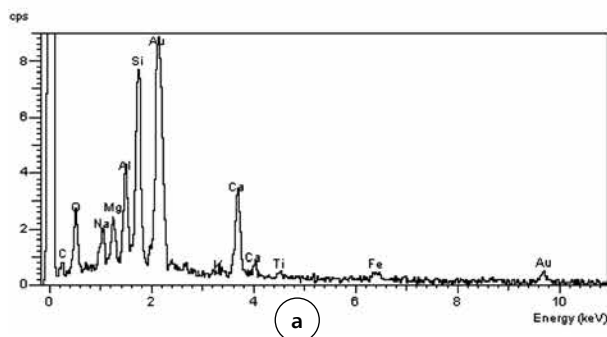
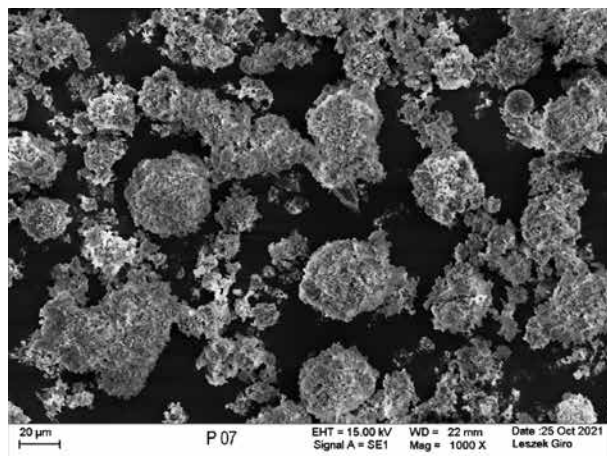
Popiół o kodzie 19 01 07* to bezwonny, jednorodny materiał koloru jasnoszarego, o bardzo drobnej, jednorodnej frakcji ziaren. Wykazywał właściwości pyłne i tendencję do zbrylania. Popiół o kodzie 19 01 13* charakteryzował się niejednorodną strukturą (rys. 1) o grubszym uziarnieniu niż popiół o kodzie 19 01 07*, a także występowaniem niedopalonych pozostałości procesu spalania. W tab. 2 przedstawiono skład chemiczny oraz wybrane właściwości fizyczne obu badanych popiołów.

Skład tlenkowy popiołów został oznaczony na próbkach stopionych przy użyciu fluorescencyjnej spektrometrii rentgenowskiej z dyspersją fali (WD-XRF). Odnośniki do metod badawczych zastosowanych przy badaniu wybranych właściwości fizycznych popiołów zamieszczono w tab. 2.

Badanych popiołów ze względu na pochodzenie, skład, a także właściwości fizyczne nie można zaliczyć do popiołów lotnych stosowanych do betonu [15, 18].

Tab. 2. Wybrane właściwości chemiczne i fizyczne popiołów

Właściwości	Popiół	
	P1 – 19 01 07*	P2 – 19 01 13*
	udział masowy [%]	
SiO ₂	5,43 ±1,09	23,56 ±4,71
Al ₂ O ₃	2,09 ±0,42	0,64 ±0,13
Fe ₂ O ₃	0,64 ±0,13	3,06 ±0,61
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	8,16 ±1,64	27,26 ±5,45
TiO ₂	0,54 ±0,108	2,119 ±0,424
MnO	0,040 ±0,008	0,139 ±0,028
MgO	1,31 ±0,26	3,08 ±0,62
CaO	39,16 ±7,83	34,91 ±6,98
Na ₂ O	1,78 ±0,36	1,16 ±0,23
K ₂ O	1,39 ±0,28	0,44 ±0,09
P ₂ O ₅	0,430 ±0,086	1,423 ±0,285
SO ₃	4,11 ±0,82	1,9 ±0,38
Cl	5,213 ±1,043	0,376 ±0,075
F	0,18 ±0,04	0,10 ±0,02
Strata prażenia [15]	21,4 ±2,14	11,1 ±1,11
Miałość [16]	17,81 ±1,66	78,82 ±1,72
Wodożądność [15]	108%	107%
Wskaźnik aktywności [15]	51%	33%
Odczyn wyciągu wodnego [17]	12,2	12,5



Rys. 2. Zdjęcie SEM wraz z analizą EDS popiołów o kodach: a) 19 01 07* i b) 19 01 13*

Cechuje je niska zawartość sumy tlenków krzemu, glinu i żelaza (zwłaszcza dla popiołu o kodzie 19 01 07*), będących – poza tlenkiem wapnia – głównymi składnikami cementu.

Strata prażenia, która może mieć wpływ na efektywność działania domieszek napowietrzających, w przypadku popiołu 19 01 13* znajduje się nieznacznie powyżej klasy C według [15], a w przypadku drugiego popiołu ponaddwukrotnie

Skład tlenkowy i fazowy popiołów po spalaniu OK jest bardzo zmienny i zależy od sposobu spalania oraz jakości i składu strumienia spalanych OK, na co wpływ mają m.in.: jakość i zaawansowanie selektywnego odbioru odpadów, stopień zaawansowania recyklingu oraz nawyki i świadomość ekologiczna mieszkańców. Dlatego ważne jest, aby określać parametry popiołów doświadczalnie, a nie na podstawie danych literaturowych.

Ważne jest, aby określać parametry popiołów doświadczalnie, a nie na podstawie danych literaturowych.

ją przewyższa. Pomimo znaczącego zróżnicowania wyników badania w mialkości nie stwierdzono dużych różnic w urabialności zapraw z dodatkiem popiołów ani znaczącej różnicy w wodożądności (w obu przypadkach podwyższonej). Natomiast oba odpady charakteryzują się niskim potencjałem hydraulicznym (pomimo stosunkowo wysokiej zawartości tlenu wapnia pochodzącego z procesu odsiarczania spalin) i pucolanowym (zwłaszcza ze względu na niską zawartość ditlenku krzemu w popiele o kodzie 19 01 07*). Obrazują to bardzo niskie wskaźniki aktywności ocenianej po 28 dniach dojrzewania zapraw na bazie badanych popiołów.

Na rys. 2 przedstawiono wybrane obrazy morfologii badanych popiołów wykonane w technice SEM wraz z analizą EDS. Oba popioły charakteryzują się zróżnicowaną morfologią. W przypadku popiołu o kodzie 19 01 13* (b) widoczne ziarna kuliste to nie znane z popiołów lotnych do betonu sfery zbudowane ze szkła glinokrzemianowego, ale sfery składające się głównie z żelaza, natomiast w przypadku popiołu o kodzie 19 01 07* (a) sfera charakteryzuje się typowym dla popiołów składem pierwiastkowym.

Badania wskazują, że zastosowanie popiołów w technologii betonu będzie problematyczne. W związku z tym zapropo-

nowano wykorzystanie ich w technologii zawiesin twardniejących.

Zawiesiny twardniejące

Do sporządzenia receptur zawiesin twardniejących zostały użyte następujące materiały:

- woda wodociągowa,
- bentonit sodowy,
- cement CEM I 42,5,
- popiół ze spalania odpadów komunalnych o kodzie 19 01 07* – P1,
- popiół ze spalania odpadów komunalnych o kodzie 19 01 13* – P2.

Receptury zaprojektowanych zawiesin twardniejących przedstawiono w tab. 3.

Metody badania zawiesin twardniejących

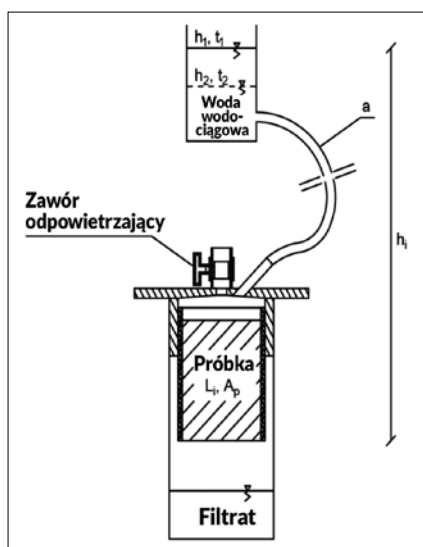
Zawiesiny w stanie płynnym badano pod kątem właściwości technologicznych w następujących zakresach:

- **Gęstość objętościowa** – ważna ze względu na zachowanie stateczności wykopu wąskoprzestrzennego oraz wypieranie zawiesiny przez docelowy materiał (w przypadku wbudowywania metodą dwufazową). Gęstość objętościową oznaczono z użyciem wagi ramiennej typu Baroida [13].
- **Lepkość umowna** – ważna ze względu na produkcję i technologię transportu zawiesiny (np. pompowanie), łatwość głębinienia wykopu pod jej osłoną, a także wypieranie jej z wykopu. Lepkość umowną

Tab. 3. Receptury zaprojektowanych zawiesin twardniejących na 1000 dm³ wody

Receptura	Składnik					Wskaźnik	
	woda wodociągowa [dm ³]	bentonit [kg]	cement [kg]	popiół P1 19 01 07* [kg]	popiół P2 19 01 13* [kg]	woda/suche składniki w/s	cement/popiół c/p
R1P1	1000	25	400	175	–	1,667	2,286
R2P1	1000	20	400	200	–	1,613	2,000
R3P1	1000	25	375	225	–	1,600	1,667
R4P1	1000	20	350	225	–	1,681	1,556
R5P1	1000	20	325	250	–	1,681	1,300
R1P2	1000	25	400	–	200	1,600	2,000
R2P2	1000	25	400	–	225	1,538	1,778
R3P2	1000	25	375	–	250	1,538	1,500
R4P2	1000	25	350	–	275	1,538	1,273
R5P2	1000	20	325	–	300	1,550	1,083

Tab. autorów



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego współczynnika filtracji zawiesziny twardniejącej

oznaczono z użyciem wiskozymetru wypływowego (lejk Marsha [13]). Mierzono czas (w sekundach) wypływu 1000 ml płynnej zawiesziny (z 1500 ml zawiesziny umieszczonej w lejku) [13].

• **Odstój dobowy wody** – będący procentową miarą sedymentacji zawiesziny (skłonności do segregacji), homogeniczności oraz jej stabilności. Odstój oznaczono jako procentowy udział objętości wody wydzielającej się samoistnie z 1,0 dm³ zawiesziny po dobie jej pozostawiania w bezruchu w kalibrowanym cylindrze pomiarowym [9].

• **Wytrzymałość strukturalna** (największa wartość naprężenia ścinającego, przy którym następuje zniszczenie struktury układu dyspersyjnego) odpowiadająca w głównej mierze za stateczność ścian wykopu – właściwość ta przeciwdziała odrywaniu się ziaren gruntu oraz zapewnia wymaganą stabilność zawiesziny zanieczyszczonych urabianym gruntem [9]. Wytrzymałość strukturalną oznaczono za pomocą sziometru po 10 min odstoju zawiesziny w bezruchu [13].

Po 28 dniach dojrzewania próbek zawiesziny twardniejącej w wodzie wodociągowej badano właściwości użytkowe:

• **Wytrzymałość na ściskanie** – jeden z podstawowych parametrów zawiesziny twardniejącej, na który projektuje się materiał. Wytrzymałość na ściskanie oznaczano na próbkach sześciennych według [14]. Podstawy próbek kontaktujące się z głowicami maszyny wytrzymałościowej wyrównywano w razie potrzeby gipsem.

• **Przepuszczalność hydrauliczna k_{10}** (współczynnik filtracji) – właściwość szczególnie ważna w przypadku wykorzystania zawiesziny do uszczelniania podłoża. Współczynnik filtracji zawiesziny twardniejącej (w temperaturze wody +10°C) określano przy zmiennym gradientie hydraulicznym. Wybór metody wynikał ze stosunkowo niskiej przewodności zawiesziny (podobnie jak w przy-

padku gruntów spoistych), która wymuszała długi czas potrzebny do uzyskania równowagi między dopływem wody do próbki a odpływem z niej, niezbędnej przy badaniu przepuszczalności metodą ze stałym spadkiem hydraulicznym. Badanie ze zmiennym gradientem polegało na określaniu w ustalonych chwilach 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 wysokości (długości) L_i i powierzchni przekroju poprzecznego A_p . Dla tych warunków przewodność hydrauliczną k_T (w temperaturze T) obliczano ze wzoru 1, który po uwzględnieniu wpływu temperatury cieczy filtrującej można było przeliczyć na przewodność hydrauliczną k_{10} (w temperaturze +10°C) według wzoru 2.

$$k_T = \frac{a \cdot L_i}{A_p \cdot \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

$$k_{10} = \frac{k_T}{0,7 + 0,03T} \quad (2)$$

gdzie:

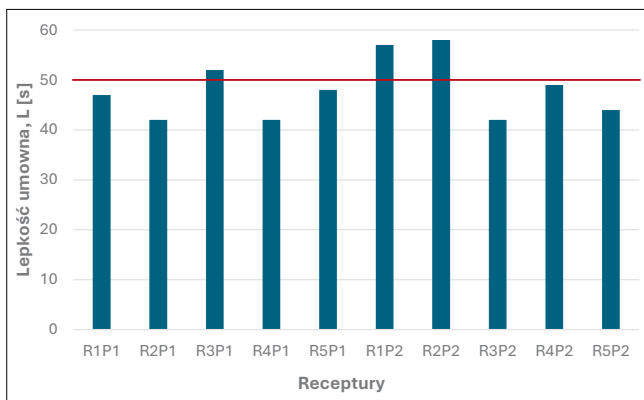
k_T – przewodność hydrauliczna w temperaturze T [m/s];

k_{10} – przewodność hydrauliczna w temperaturze 10°C [m/s];

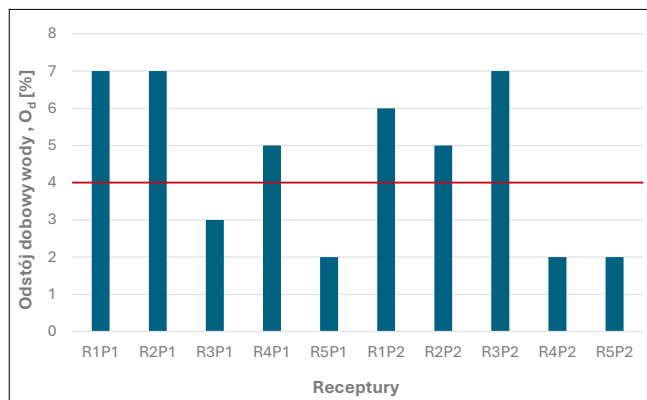
a – powierzchnia przekroju rurki zasilającej [m²];

Tab. 4. Parametry technologiczne badanych zawiesziny twardniejącej

Receptura	Parametr				
	gęstość ρ [g/cm ³]	lepkość umowna L [s]	odstój 24 h O_d	wytrzymałość strukturalna po 10 min τ [Pa]	wartość pH [–]
R1P1	1,330	47	7,0%	2,8	12,16
R2P1	1,320	42	7,0%	2,1	12,12
R3P1	1,320	52	3,0%	5,3	12,03
R4P1	1,315	42	5,0%	6,7	11,96
R5P1	1,310	48	2,0%	6,0	11,96
R1P2	1,340	57	6,0%	8,5	12,58
R2P2	1,350	58	5,0%	12,0	12,57
R3P2	1,315	42	7,0%	5,0	12,59
R4P2	1,360	49	2,0%	8,0	12,56
R5P2	1,345	44	2,0%	6,5	12,56



Rys. 4. Lepkość umowna dla badanych próbek zawiesiny twardniejącej; czerwona linia oznacza graniczną wartość lepkości umownej według tab. 1



Rys. 5. Odstój dobowy wody badanych receptur zawiesiny twardniejącej; czerwona linia oznacza graniczną wartość odstępu dobowego wody według tab. 1

L_i – wysokość badanej próbki [m];
 A_p – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki [m²];
 $\Delta t = t_2 - t_1$ – czas między pomiarami na porów h_1, h_2 [s];
 h_1, h_2 – wartość naporów hydraulicznych w chwilach t_2, t_1 [m];
 T – temperatura cieczy filtrującej [°C].

Na rys. 3 przedstawiono schemat stanowiska badawczego współczynnika filtracji zawiesin twardniejących.

WYNIKI I DISKUSJA

Wyniki właściwości technologicznych badanych zawiesin twardniejących przedstawiono w tab. 4.

Gęstość zawiesiny płynnej jest na poziomie wystarczającym do zapewnienia stateczności głębionego wykopu (tab. 1 i 4). Wzrost gęstości zawiesiny płynnej następuje wraz ze wzrostem wskaźnika cement/popioł (c/p) tylko dla receptur z popiołem P1 (19 01 07*). Dla tych zawiesin wartości gęstości zawierają się w granicach od 1,31 do 1,33 g/cm³. W przypadku popiołu P2 (19 01 13*) nie zaobserwowano zależności między dozowaniem odpadu a gęstością zawiesiny. Największą wartość gęstości 1,360 g/cm³ odnotowano dla receptury R4P2, a najmniejszą wartość gęstości 1,315 g/cm³ – dla receptury R3P2.

W nawiązaniu do założeń przyjętych dla projektowania receptur zawiesiny [9] lepkość umowna powinna się zawierać w zakresie umożliwiającym zastosowa-

nie transportu hydraulicznego zawiesiny do miejsca wbudowania (tab. 1, rys. 4). Najwyższą wartość lepkości osiągają zawiesiny zawierające dodatek popiołu P2 (receptury R1P2 oraz R2P2). Brak jest jednoznacznej korelacji tego parametru ze wskaźnikami dotyczącymi składu (w/s albo c/p). Z punktu widzenia przedstawionych kryteriów (tab. 1) należy ocenić negatywnie trzy receptury: R3P1, R1P2 oraz R2P2.

Wartości odstępu dobowego wody (tab. 4, rys. 5) badanych receptur zawiesin twardniejących zawierają się od 2,0 do 7,0%. Można zauważyć, że znaczący wpływ na wartość tego parametru ma ilość dozowanego popiołu. W przypadku wysokiej ilości popiołu (P1 lub P2) w składzie zawiesiny odnotowywano (generalnie) niższe wartości odstępu. Pozo-

tywną ocenę według kryteriów (tab. 1) przeszły jedynie receptury: R3P1, R5P1, R4P2 oraz R5P2.

Analizując wartości przedstawiające wytrzymałość strukturalną po 10 min (tab. 4), można zauważyć, że tylko w przypadku receptury R2P2 odnotowano wartość większą niż 10,0 Pa (wartość graniczna według kryterium z tab. 1). Pozostałe receptury spełniają warunek zapisany w tab. 1. Znaczący wpływ na wartość tego parametru ma ilość dozowanego cementu.

Przedstawione w tab. 4 wartości pH zawierają się w granicach od 11,96 (receptura R5P1) do 12,59 (receptura R3P2). Wartości te świadczą o wysokiej alkalizacji badanych zawiesin. Wyższe wartości pH odnotowano dla receptur z popiołem P2 (12,56–12,59), który ma

Tab. 5. Parametry użytkowe badanych zawiesin twardniejących

Receptura	Parametr	
	wytrzymałość na ściskanie f_c [MPa]	przepuszczalność hydrauliczna k_{10} [m/s]
R1P1	0,53 ±0,03	1,40 · 10 ⁻⁸ (±6%)
R2P1	0,52 ±0,07	5,02 · 10 ⁻⁸ (±12%)
R3P1	0,42 ±0,07	1,34 · 10 ⁻⁷ (±9%)
R4P1	0,32 ±0,02	1,70 · 10 ⁻⁷ (±15%)
R5P1	0,28 ±0,03	2,10 · 10 ⁻⁷ (±8%)
R1P2	0,33 ±0,04	1,47 · 10 ⁻⁷ (±8%)
R2P2	0,28 ±0,02	1,39 · 10 ⁻⁷ (±6%)
R3P2	0,21 ±0,03	2,86 · 10 ⁻⁷ (±4%)
R4P2	0,22 ±0,01	2,88 · 10 ⁻⁷ (±7%)
R5P2	0,21 ±0,01	1,01 · 10 ⁻⁶ (±18%)

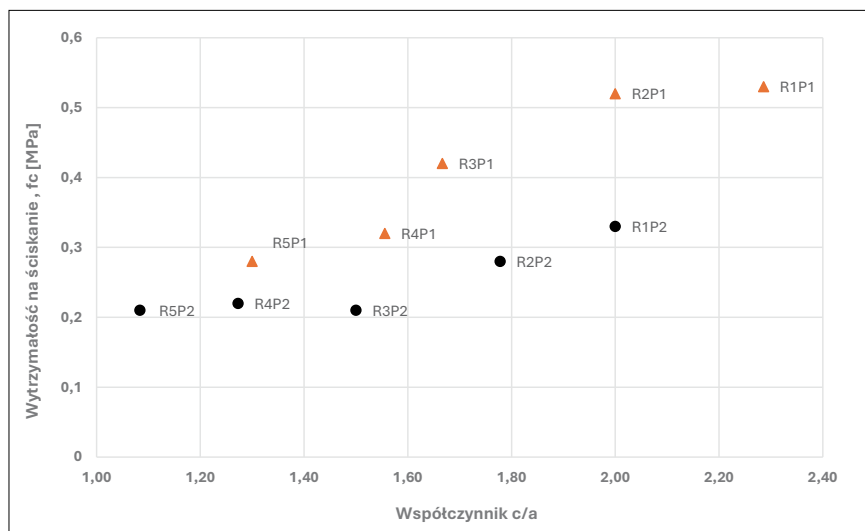
Tab. i rys. autorów

więcej alkaliów w swoim składzie (tab. 2). Dodatkowo w recepturach z popiołem P2 zastosowano nieco wyższe dozowanie samego popiołu i cementu (600–625 kg) w stosunku do zawieszin z dodatkiem popiołu P1 (575–600 kg).

Na podstawie wielkości uzyskanych w badaniach parametrów technologicznych zawiesziny płynnej (gęstości, lepkości umownej i odstępu dobowego wody oraz wytrzymałości strukturalnej) można stwierdzić, że trzy receptury spełniły postawione kryteria: R5P1, R4P2 oraz R5P2 i nadają się jako materiał na przesłony przeciwfiltracyjne wykonywane najpopularniejszymi metodami, tj. w wykopie wąskoprzestrzennym (metodą szczelinową), metodą wgłębnego mieszania (DSM) lub metodą wibracyjną (metodą wąskoszczelinową) [9].

Podstawowe parametry użytkowe badanych zawieszin twardniejących (po ich stwardnieniu) przedstawiono w tab. 5. W nawiasach podano odchylenie standardowe (dla f_c) oraz współczynnik zmienności (dla k_{10}).

Wartości wytrzymałości na ściskanie badanych zawieszin twardniejących zawierają się w granicach od 0,21 do 0,53 MPa. Wyższe wartości f_c odnotowano dla zawieszin z popiołem P1: 0,28–0,53 MPa. Na rys. 6 przedstawiono wartości wytrzymałości na ściskanie f_c zawieszin twardniejących w zależności od współczynnika c/p (cement/popioł) dla opracowanych receptur. Widać wzrost wartości f_c wraz ze wzrostem wartości współczynnika c/p dla wszystkich analizowanych receptur (niezależnie od rodzaju popiołu) zawieszin twardniejących. Należy zauważyć silną zależność wskaźnika c/p w kontekście wytrzymałości na ściskanie f_c . Dodatnią korelację potwierdza obliczony współczynnik korelacji Pearsona przy założonym przedziale ufności 95%. Wartości współczynnika r pozwalają uznać jako wystarczająco istotne statystycznie zależności związków $f_c = f(c/p)P1$ oraz $f_c = f(c/p)P2$ dla zawieszin twardniejących, gdzie wartość współczynnika wynosiła odpowiednio: $r(P1) = 0,95$ oraz $r(P2) = 0,91$. Nieco wyższa wartość wskaź-



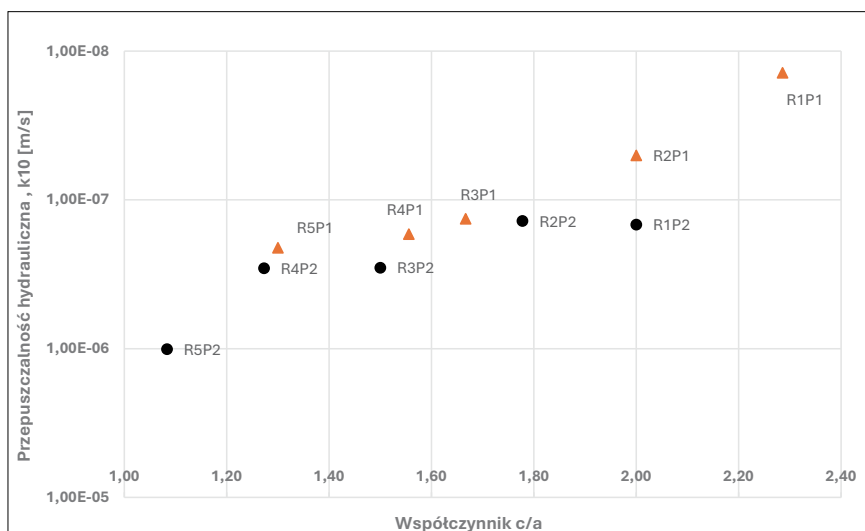
Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie f_c badanych zawieszin twardniejących w zależności od współczynnika cement/popioł: c/p

nika aktywności (tab. 2) w popiele P1 wpłynęła na uzyskanie wyższych wartości f_c w porównaniu z zawieszinami z dodatkiem popiołu P2. Jednak z uwagi na niskie wartości wskaźnika aktywności w obu rodzajach popiołu głównym składnikiem wpływającym na uzyskane wartości f_c w badanych zawieszinach twardniejących jest zastosowany cement. Pozytywną ocenę – według kryteriów stawianych zawieszinom w tab. 1 – uzyskały jedynie dwie receptury: R1P1 oraz R2P1.

Wartości przepuszczalności hydraulicznej k_{10} badanych zawieszin tward-

niejących zawierają się w granicach od $1,01 \cdot 10^{-6}$ do $1,40 \cdot 10^{-8}$ m/s. Zdecydowanie niższe wartości k_{10} odnotowano dla zawieszin z dodatkiem popiołu P1 (rys. 7).

Na rys. 7 przedstawiono wartości przepuszczalności hydraulicznej k_{10} badanych zawieszin twardniejących w odniesieniu do współczynnika c/p . Można zauważyć zależność wskaźnika c/p w kontekście analizowanej przepuszczalności hydraulicznej k_{10} . Ujemną korelację potwierdza obliczony współczynnik korelacji Pearsona przy założonym przedziale ufności 95%.



Rys. 7. Przepuszczalność hydrauliczna k_{10} badanych zawieszin twardniejących w zależności od współczynnika cement/popioł: c/p



Wartości współczynnika r pozwalają uznać jako wystarczająco istotne statystycznie zależności jedynie związków $k_{10} = f(c/p)P1$ dla zawiesin twardniejących z dodatkiem popiołu P1, gdzie wartość współczynnika $r(P1) = -0,99$. Analizując badane zawiesiny pod kątem wymagań kryterium postawionego w tab. 1, należy zauważyć, iż tylko receptura R1P1 jest bliska ich spełnienia.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przeprowadzonej analizy właściwości zawiesin twardniejących wykonanych z udziałem popiołu ze spalania odpadów komunalnych w połączeniu z cementem portlandzkim CEM I 42.5 wynika,

nych nie uzyskano granicznej wartości odstoju dobowego. Nie stanowi to jednak nieprzewidywalnego ograniczenia, a w pewnym stopniu zależy od szczegółowej specyfikacji dedykowanego materiału zawiesiny. W przypadku przepuszczalności hydraulicznej uzyskana wartość nieznacznie przekroczyła wymagane kryterium. Niewielka modyfikacja proporcji składników – przede wszystkim spoiwa – powinna doprowadzić do sukcesu.

Badania wykazały, że popioły ze spalania odpadów komunalnych o kodach 19 01 07* oraz 19 01 13* mają potencjał jako dodatek do komponowania zawiesin twardniejących pomimo swoich specyficznych właściwości i morfologii.

Popioły ze spalania odpadów komunalnych mają potencjał jako dodatek do komponowania zawiesin twardniejących.

że korzystniejsze parametry osiągnęły zawiesiny z dodatkiem popiołu P1 (kod 19 01 07*). Najbliższe spełnieniu wszystkich postawionych wymagań, w kontekście wykorzystania do modernizacji obwałowań przeciwpowodziowych z zastosowaniem różnych technologii wykonania, była zawiesina o recepturze R1P1. W przypadku właściwości technologicz-

Ze względu na trudności z wykorzystaniem takich odpadów w innych rodzajach materiałów budowlanych, badania nad możliwością ich użycia w technologii zawiesin twardniejących powinny być kontynuowane w rozwinięciu badań środowiskowych, tj. wymywania związków niebezpiecznych oraz ich immobilizacji. ■

Literatura

- [1] Wielgosiński G., „Spalarnie odpadów komunalnych w perspektywie 2020 r.” w: *Przegląd Komunalny*, nr 1, 2016, s. 30–32.
- [2] *Ochrona środowiska 2019*, Warszawa: Główny Urząd Statystyczny, 2019 [dostęp: 1.07.2026], w: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/sro-dowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2019,1,20.html>.
- [3] Kledyński Z. i in., „Condition of circular economy in Poland” w: *Archives of Civil Engineering*, t. 66, nr 3, 2020, s. 37–80.
- [4] Commission regulation, „Waste Management Directive” w: *Official Journal of the European Union*, t. 2014, nr 1357, 2014.
- [5] Commission regulation, „Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture”, t. 1881, nr February 1998, 2006, s. 1–5 [dostęp: 1.07.2026], w: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2006R1881:20100701:EN:PDF>.
- [6] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (t.j. Dz.U. z 2023 r. poz. 1587 ze zm.).
- [7] Uliasz-Bocheńczyk A., Deja J., Mokrzycki E., „The use of alternative fuels in the cement industry as part of circular economy” w: *Archives of Environmental Protection*, t. 47, nr 4, 2021, s. 109–117, <https://doi.org/10.24425/aep.2021.139507>.
- [8] Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów (Dz.U. z 2020 r. poz. 10).
- [9] Kledyński Z., Rafalski L., *Zawiesiny twardniejące*, Warszawa: KILiW PAN, IPPT PAN, 2009.
- [10] Rafalski L., *Właściwości i zastosowanie zawiesin twardniejących*, Warszawa: Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 1995.
- [11] Borys M., „Przegrody przeciwfiltracyjne z zawiesin twardniejących w korpusach i podłożu wałów przeciwpowodziowych” w: *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*, t. 55, nr 2, 2012, s. 89–95.
- [12] Borys M., Rycharska J., „Parametry zawiesin twardniejących stosowanych do wykonywania przegród przeciwfiltracyjnych w wałach przeciwpowodziowych”, 2006 [dostęp: 24.12.2021], w: BazTech, <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BATC-0005-0120>.
- [13] BN-90/1785-01:1990 Płuczka wiertnicza. Metody badań w warunkach polowych.
- [14] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [15] EN 450-1:2012 Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria. 2012.
- [16] PN EN 451-2:2017-06 Method of testing fly ash – Part 2: Determination of fineness by wet sieving.
- [17] EN 12457-4 Characterisation of waste – Leaching – Compatibility test on leaching of granular waste materials and sludges. Part 4: Singlestage batch testing with a ratio of the liquid to 10l/kg solid phase in case of materials with particle sizes of less t. 2002.
- [18] PN-EN 206+A2:2021-08 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.