



Źródło: Michał Braszczowski

# Wpływ popiołu lotnego ze spalania węgla brunatnego na właściwości zaczynów uszczelniających

*W artykule przedstawiono sposób wykonania i właściwości zaczynów uszczelniających wykonanych z użyciem popiołów lotnych. W badaniach zastosowano popiół lotny z węgla brunatnego w postaci surowej oraz wydzielonych z niego frakcji. Badania wykazały przydatność popiołów lotnych jako głównego składnika zaczynów uszczelniających. Dodatkowo stwierdzono korzystny wpływ drobnych frakcji (0 – 30 μm) popiołu lotnego na właściwości zaczynu, zwłaszcza porowatość i przepuszczalność.*

## 1. Wstęp

Wezbrania są zjawiskami naturalnymi. Największe z nich powodują jednak najczęściej dotkliwe straty materialne, a często także ofiary w ludziach. Zdarzenia tego rodzaju to powodzie, które wynikają z natury, ale mają swoje konsekwencje gospodarcze i społeczne.

Powodzie były, są i będą, o czym świadczą źródła historyczne i bieżące doświadczenia, a prognozy

klimatyczne wskazują na dynamizowanie się zjawisk meteorologicznych i hydrologicznych.

Wśród różnych koncepcji ochrony przed powodzią współcześnie dominuje podejście związane z szacowaniem ryzyka powodziowego i próbami zarządzania nim [1]. Wśród narzędzi służących do ograniczania ryzyka powodzi rosnącego znaczenia nabierają wprawdzie tzw. środki nietechniczne, ale intensywne zagospodarowanie dolin rzecznych w Europie sprawia, iż znaczący udział mają i będą wciąż miały środki techniczne, które dzielimy na środki ochrony czynnej i biernej.

W Polsce zagrożonych powodzią jest około 2 mln ha gruntów rolnych, co stanowi ok. 7% powierzchni kraju, z czego połowa jest chroniona wałami. Ich łączna długość wynosi około 8,5 tys. kilometrów. Szacuje się, że ich budowa zmniejszyła powierzchnię zalewanych obszarów o 25% [2]. Wiek obwałowań i związany z nim ich stan techniczny oraz niedostateczne środki przeznaczane na konserwację i remonty obwałowań przeciwpowodziowych sprawiają, że ryzyko powodziowe na terenach chronionych wałami jest wyższe niż wynikałoby to z geometrycznych parametrów wałów i wezbrań przyjmowanych do ich zaprojektowania [3].

Potrzeby w zakresie modernizacji wałów przeciwpowodziowych na tyle przewyższają dostępne środki na ten cel, że decyzje o alokacji nakładów na remonty muszą być przemyślane i związane z szacowaniem poziomu zagrożenia. Istotny jest także wybór skutecznych i efektywnych ekonomicznie technologii naprawy wałów. Duże znaczenie mają stosowane materiały, które – jak staramy się to dalej wykazać – mogą w znacznej mierze

Tabela 1. Składy zaczynów uszczelniających

oznaczenie próbki	woda kg	bentonit kg	CEM I kg	P30 kg	P100 kg	P0 kg	w/s [ ]
P30_2	1000	40	160	300	-	-	2,0
P100_2	1000	40	160	-	300	-	
P0_2	1000	40	160	-	-	300	
P30_17	1000	40	170	380	-	-	1,7
P100_17	1000	40	170	-	380	-	
P0_17	1000	40	170	-	-	380	
P30_15	1000	40	180	450	-	-	1,5
P100_15	1000	40	180	-	450	-	
P0_15	1000	40	180	-	-	450	

bazować na odpadach mineralnych generowanych m.in. w energetyce i hutnictwie.

Wobec dominującego udziału paliw stałych w polskiej energetyce kierunek poszukiwań jest szczególnie interesujący, gdyż kojarzy zabezpieczenia przeciwpowodziowe z ekonomią i ochroną środowiska, przyczyniając się do zagospodarowania odpadów w wielkokubaturowym budownictwie wodnym.

## 2. Materiały

Do sporządzenia spoiw uszczelniających wykorzystano następujące materiały:

- woda wodociągowa
- bentonit sodowy Zębic S45U
- cement CEM I 42,5 Górażdże
- lotny popiół konwencjonalny z węgla brunatnego z EC Pątnów:
  - frakcja 0 -30  $\mu\text{m}$  (P30)
  - frakcja 30 -100  $\mu\text{m}$  (P100)
  - bez podziału na frakcje (P0).

Frakcje popiołu lotnego wydzielone zostały metodą separacji powietrznej w aparacie APLINA. Dla każdego z popiołów sporządzono po trzy receptury różniące się między sobą stosunkiem wodno/spoiwowym. W tabeli 1 przedstawiono składy poszczególnych zaczynów.

## 3. Metody badań

Do wykonania zarobów zaczynów uszczelniających została wykorzystana mieszarka ręczna wolnoobrotowa. Pomiar gęstości objętościowej spoiwa uszczelniającego w stanie płynnym dokonywano przy użyciu wagi ramiennej Baroid. Lepkość umowną zaczynów oznaczano przy użyciu wiskozymetru wypływowego – *lejka Marsha*. Mierzono czas wypływu (w sek.) 1000 ml spoiwa z objętości 1500 ml umieszczonej w lejku. Pomiar odstoju dobowego wody przeprowadzano, mierząc (w % obj.) ilości wody wydzielonej samoistnie z zaczynu po upływie doby od wiania go do cylindra o pojemności 1000 ml i pozostawienia w bezruchu. Badanie filtracji zaczynów wykonywano z użyciem prasy filtracyjnej. Ubytek zaczynu spowodowany działaniem ciśnienia przedstawiono w % objętości wyjściowej zaczynu. Badanie przeprowadzano w zakresie ciśnień 1-5 barów. Próbkę spoiwa uszczelniającego do badań po stwardnieniu były formowane w cylindrycznych formach stalowych oraz PCV o  $d = h = 80$  mm. Do momentu związania, próbki były przechowywane w formach pod okryciem z folii, w pomieszczeniu laboratoryjnym. Po 2-3 dniach próbki były wyjmowane z form stalowych i zanurzane całkowicie w wodzie wodociągowej, w której dojrzewały do momentu badania. Próbkę wykonywane w formach z tworzywa sztucznego (PCV) 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  $+18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Gęstość objętościową stwardniałych zaczynów określano na próbkach walcowych z form stalowych. Po wyjęciu próbki z wody i jej powierzchniowym osuszeniu ważono i mierzono jej wymiary geometryczne (średnica i wysokość). Na podstawie tych pomiarów obliczano gęstość.

Tablica 2. Parametry technologiczne badanych receptur spoiw uszczelniających

Lp.	Receptura	Parametr			
		Gęstość objętościowa [g/cm <sup>3</sup> ]	Lepkość umowna [sek.]	Odstój dobowy wody [%]	Średni %owy ubytek zawiesiny [%]
	1	2	3	4	7
1	P30_2	1,29	47	2,0	58,4
2	P100_2	1,28	39	7,5	61,4
3	P0_2	1,29	40	11,0	61,9
4	P30_17	1,34	52	2,0	53,6
5	P100_17	1,33	41	13,0	56,8
6	P0_17	1,33	42	10,0	56,3
7	P30_15	1,37	60	2,0	49,9
8	P100_15	1,36	43	12,0	51,8
9	P0_15	1,36	45	6,0	52,9

Wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe określano na próbkach walcowych z form stalowych. Po wyjęciu próbki z pojemnika z wodą pozostawiano ją na kilka minut w celu osuszenia. Następnie powierzchnia górna (i w niektórych przypadkach dolna, jeżeli była nierówna) była wyrównywana (w przypadku niewielkich nierówności powierzchnię trasowano za pomocą stalowej szpachelki, w przypadku większych nierówności stosowano gips). Badanie wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe odbywało się w maszynie wytrzymałościowej typu ZD 20. Ściskanie próbki odbywało się z przyrostem naprężeń  $0,0026 \div 0,0020$  MPa/s, aż do momentu zniszczenia próbki. Wynik badania był średnią z 3 próbek. Przepuszczalność stwardniałych zaczynów badano z wykorzystaniem metody badania przepuszczalności hydraulicznej przy zmiennym gradiencie (spadku) hydraulicznym. Działanie na badaną próbkę medium filtrującego, jakim była woda wodociągowa, odbywało się w sposób grawitacyjny. Wartość przepuszczalności obliczono z wykorzystaniem zależności:

$$k_r = \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

gdzie:

$k_r$  – przepuszczalność hydrauliczna w temperaturze T, [m/s]

$a$  – powierzchnia przekroju poprzecznego rurki zasilającej, [m<sup>2</sup>]

$L$  – długość (wysokość) badanej próbki, [m]

$A$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki, [m<sup>2</sup>]

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

$h_{1,2}$  – wartości naporów hydraulicznych w chwilach  $t_1$  i  $t_2$ , [m]

Próbki do badań porozymetrycznych po odłupananiu suszone były w eksykatorze próżniowym z użyciem pompy próżniowej do stałej masy. Następnie po ewentualnym dalszym rozdrobnieniu były ważone i wykonywano na nich badania. Badania porozymetryczne przeprowadzono na aparacie Carlo Erba w zakresie ciśnień do 2000 atm.

## 4. Wyniki

### 4.1. Właściwości świeżych zaczynów

Gęstość objętościowa zaczynu nie zależy znacząco od frakcji popiołu użytego w badaniach. Jest na

poziomie wystarczającym do zapewnienia stateczności głębionego wykopu dla wszystkich badanych receptur. Gęstość zaczynów rośnie wraz ze spadkiem stosunku wodno-spoiwowego. Zgodnie z założeniami przyjętymi w projektowaniu receptur zaczynów, lepkość umowna zawiera się

w zakresie umożliwiającym zastosowanie transportu hydraulicznego zaczynu do miejsca wbudowania. Najwyższą wartość lepkości osiągają zaczyny wykonane z frakcjonowanego popiołu o wielkości ziarna 0-30  $\mu\text{m}$  (P30) – we wszystkich recepturach. Oznacza to, że zastosowanie popiołów o mniejszej frakcji do wykonania zaczynów w stosunku do popiołów o frakcji większej lub niefrakcjonowanych powoduje wzrost lepkości w zakresie 7-15 s. Analizując wartości lepkości zaczynów z popiołem o większej frakcji (30-100  $\mu\text{m}$ ) i z popiołem niefrakcjonowanym, można zauważyć, że zabieg separacji ziaren popiołu nie wpływa na wartość lepkości umownej.

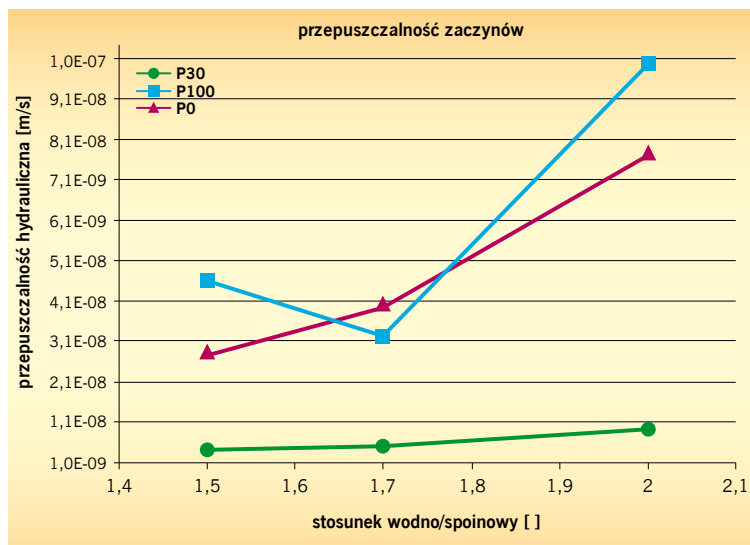
Analizując wartości odstoju dobowego wody poszczególnych zaczynów, można zauważyć, że najniższą wartość wykazują zaczyny wykonane z popiołem frakcji 0-30  $\mu\text{m}$  (P30), która to wartość praktycznie nie ulega zmianie dla różnych stosunków wodno-spoiwowych. W przypadku popiołu frakcji 30-100  $\mu\text{m}$  (P100) odnotowano znaczące wartości odstoju dobowego - w zakresie 7,5-13% w zależności od receptury. Równie wysokie wartości odstoju osiąga zaczyn z popiołem niefrakcjonowanym z El. Pątnów (PO), w zakresie 6-11%. Warto odnotowania jest to, że odstój zaczynów wykonanych z popiołu (P100) rośnie w miarę wzrostu dozowania spoiwa, co potwierdza znikomą zawartość cząstek koloidalnych w tym spoiwie.

Analizując ubytek procentowy zaczynu w miarę wzrostu działającego ciśnienia w zakresie 1-5 bar, można zauważyć, że ubytek wody z zaczynu maleje w miarę wzrostu dozowania spoiwa (malejącego stosunku wodno-spoiwowego). Zaczyn wykonany z dodatkiem popiołu frakcji 0-30  $\mu\text{m}$  (P30) jest bardziej odporny na oddawanie wody pod wpływem ciśnienia w stosunku do zaczynu z popiołem frakcji 30-100  $\mu\text{m}$  (P100) oraz z popiołem niefrakcjonowanym (PO). Spostrzeżenie to dobrze koresponduje z zachowaniem się zaczynu przy wydzielaniu wody w próbie odstoju.

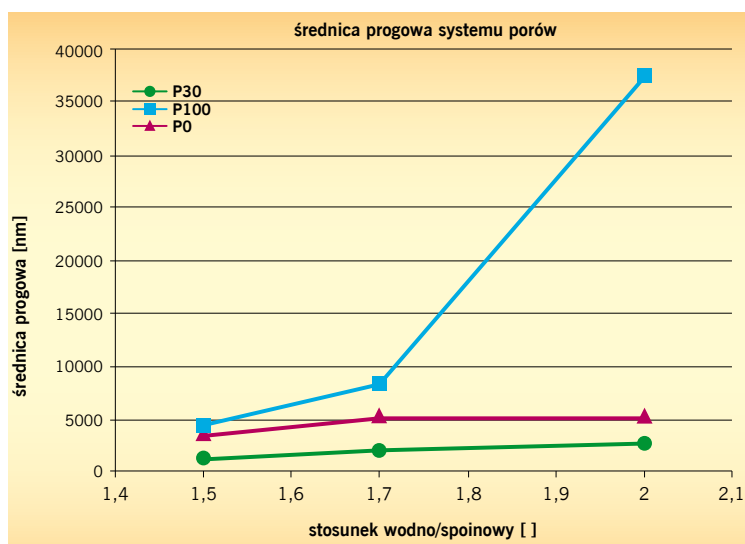
#### 4.2. Właściwości zaczynów stwardniałych

Na rys. 1 przedstawiono, jak zmienia się przepuszczalność zaczynów w zależności od frakcji popiołu lotnego w nich zastosowanego. Zauważyć można, iż zaczyny wykonane z użyciem frakcji 0-30  $\mu\text{m}$  wyseparowanej z popiołu lotnego Pątnów pozwalają na uzyskanie zdecydowanie niższych przepuszczalności w porównaniu z zaczynem z popiołem niefrakcjonowanym, a zwłaszcza z frakcją 30-100  $\mu\text{m}$ . Źródłem tego zjawiska szukać można w różnicach mikrostrukturalnych pomiędzy zaczynami wykonanymi z różnych frakcji popiołu. Na rys. 2 przedstawiono zależność wielkości średnicy progowej systemu porów wyznaczonej na podstawie pomiarów porozymetrii rtęciowej. Zauważyć można, że zaczyny z dodatkiem frakcji w wielkości ziaren poniżej 30  $\mu\text{m}$  wykazują najniższe wartości średnic progowych. Wiąca to można z korzystnym wpływem drobnej frakcji na upakowanie ziaren stosu okruszowego spoiwa.

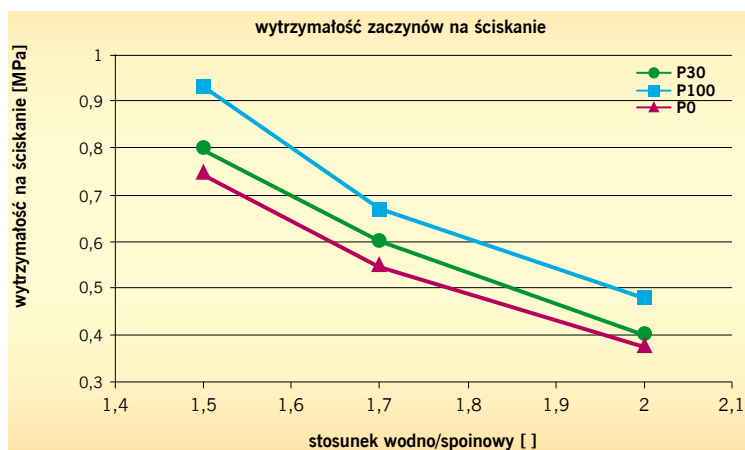
Badania wytrzymałości na ściskanie pokazują, iż najwyższe wytrzymałości uzyskano, stosując frakcję 30-100  $\mu\text{m}$ . Jest to obserwacją zaskakującą, ponieważ biorąc pod uwagę wyniki badań porozymetrycznych, jak również wiedzę z chemii ce-



Rysunek 1. Przepuszczalność zaczynów uszczelniających wykonanych z różnych frakcji popiołu lotnego w funkcji stosunku wodno-spoiwowego



Rysunek 2. Wartości średnic progowych zaczynów uszczelniających wykonanych z różnych frakcji popiołu lotnego w funkcji stosunku wodno-spoiwowego



Rysunek 3. Wytrzymałości 90-dniowe zaczynów uszczelniających wykonanych z różnych frakcji popiołu lotnego w funkcji stosunku wodno-spoiwowego



fol. Michał Braszczowski

mentu spodziewać by się można, iż to frakcja 0-30  $\mu\text{m}$  da najlepsze wyniki. Tak się jednak nie dzieje, i w badanych zaczynach zachodzi nietypowa sytuacja, gdy materiał wykonany z udziałem spoiwa o mniejszej aktywności pucolanowej (76% dla frakcji 30-100  $\mu\text{m}$  przy 96% dla frakcji 0-30  $\mu\text{m}$ ) wykazuje w praktyce lepsze wytrzymałości.

## 5. Dyskusja

Analizując uzyskane wyniki, zauważyć można, iż wprowadzenie frakcjonowania popiołu lotnego umożliwia poprawę właściwości zaczynów uszczelniających. Największe różnice dotyczą przepuszczalności stwardniałych zaczynów. Jak pokazano na rys. 1, różnice pomiędzy poszczególnymi zaczynami mogą sięgać nawet powyżej rzędu wielkości. Najkorzystniej wypadają zaczyny z popiołem o najdrobniejszej frakcji. Warto zauważyć, że poza najniższą przepuszczalnością charakteryzującą się również najmniejszą wrażliwością na zmiany stosunku wodno-spoiwowego, co jest korzystne z punktu widzenia ewentualnych wahań receptury w praktycznym stosowaniu materiału. Stosowanie drobnej frakcji popiołu wpływa również korzystnie na właściwości zaczynu w stanie świeżym. Drobna frakcja powoduje wzrost stabilności zawiesin, mierzonej zarówno odstojem jak i filtracją. Lepkość zaczynów z drobną frakcją popiołu nieznacznie wzrasta w porównaniu z popiołem niefrakcjonowanym, ale mieści się w zakresie wymaganym do hydraulicznego transportu świeżego zaczynu.

## 6. Podsumowanie

Wyniki uzyskane w badaniach wskazują na możliwość wykonywania zaczynów uszczelniających stosowanych w budowach wałów przeciwpowodziowych z użyciem odpadowego surowca, jakim jest popiół lotny ze spalania węgla brunatnego.

Stwierdzono również, iż najlepsze rezultaty uzyskuje się, stosując separację popiołu i wykorzystując do produkcji zaczynów najdrobniejszą frakcję 0-30  $\mu\text{m}$ . Jej użycie daje zaczyny o mniejszych przepuszczalnościach w porównaniu do zaczynów wykonanych z popiołu niefrakcjonowanego.

**prof. Jerzy Dyczek, dr inż. Łukasz Kotwica**  
**Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie**  
**Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki**  
**Katedra Technologii Materiałów Budowlanych**  
**prof. Zbigniew Kledyński,**  
**dr inż. Agnieszka Machowska,**  
**dr inż. Paweł Falaciński**  
**Politechnika Warszawska**  
**Wydział Inżynierii Środowiska**  
**Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki**

### Literatura

- 1 Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim
- 2 Z. Kledyński, P. Falaciński, A. Machowska: Uboczne produkty spalania w remontach i modernizacji wałów przeciwpowodziowych. SYMPOSIUM EUROPÉEN – SYMPOZJUM EUROPEJSKIE – EUROPEAN SYMPOSIUM PROBLEMES ACTUELS DE LA PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS. WSPÓŁCZESNE PROBLEMY OCHRONY PRZECIWPOWODZIOWEJ ANTI-FLOOD DEFENCES – TODAY'S PROBLEMS. Paris – Orléans 28-29-30.03.2012, s. 1-9
- 3 Z. Kledyński: Stan infrastruktury przeciwpowodziowej – obecny i potrzeby, ze szczególnym uwzględnieniem zbiorników wodnych: Świnna Poręba, Kąty Myscowa, Racibórz i Włocławek. Kancelaria Sejmu RP – Biuro Analiz Sejmowych, Warszawa 2010  
*Praca była finansowana w ramach projektu INI-TECH – adnotacja taka jak w artykule A. Łagosza i T. Zdeba w numerze 1/2013.*

Prezentowane badania zostały wykonane w ramach projektu badawczego IniTech Projekt nr ZPB/61/65832/IT2/10 pt.: „Analiza uwarunkowań oraz badania możliwości wykorzystania wybranych UPS w budownictwie i inżynierii lądowej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

