

**Stanisław Stryczek\*, Andrzej Gonet\*, Rafał Wiśniowski\*, Jacek Dvořák\***

## **WPLYW ODPADÓW Z FLUIDALNEGO SPALANIA PALIW NA PARAMETRY TECHNOLOGICZNE ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH SPORZĄDZONYCH NA OSNOWIE CEMENTU PORTLANDZKIEGO\*\***

### **1. WSTĘP**

W miarę rozwoju technologii uszczelniania i wzmacniania ośrodka gruntowego i masywu skalnego metodami iniekcji otworowej istnieje konieczność stosowania nowej generacji spoiw hydraulicznych oraz dodatków, z których można otrzymywać zaczyny uszczelniające o wymaganych parametrach technologicznych.

Właściwy dobór spoiwa hydraulicznego powinien zapewnić uzyskanie zaczynu, który powinien charakteryzować się między innymi [2, 3, 5]:

- dobrą współpracą z uszczelnionym ośrodkiem o różnym wykształceniu litologicznym, w tym także z minerałami typu ilastego;
- minimalną ekspansją;
- wysoką odpornością na działanie silnie zmineralizowanych wód gruntowych i złożowych;
- małym odstojem oraz niską filtracją;
- względnie niskim kosztem w odniesieniu do celu zadania, jakie ma spełniać w uszczelnianym ośrodku.

Spełnienie tych wymagań ma duże znaczenie dla uzyskania skutecznego efektu uszczelniania gruntów i skał. Z drugiej strony należy zauważyć, że specyficzne warunki panujące w górotworze wymagają udzielenia priorytetu niektórym z parametrów, nawet kosztem innych.

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

\*\* Praca wykonana w ramach badań statutowych WWNiG AGH

Aktualnie na rynku materiałów wiążących dostępne są krajowe oraz zagraniczne spoiwa hydrauliczne zarówno typu nieorganicznego, jak i organicznego. Spoiwa te charakteryzują się szerokim wachlarzem właściwości fizyczno-chemicznych i bardzo zróżnicowanymi cenami [1, 3, 4].

Generalnie można stwierdzić, że nie ma takiego spoiwa, z którego można sporządzić zaczyn uszczelniający, który byłby uniwersalny oraz wypełniał wszystkie wymagania technologiczne podczas wzmacniania lub uszczelniania gruntów i skał przy wykorzystaniu technologii wiertniczych. Spowodowane to jest między innymi różnymi wymaganiami inżynierskimi oraz zakresem wykonywanych prac.

Niejednokrotnie, stosowanie zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementu portlandzkiego nie jest korzystne, wykazują one bowiem wiele wad, m.in. długi czas wiązania, nieodpowiednie właściwości reologiczne. Niekorzystne właściwości zaczynów cementowych można w sposób istotny poprawić poprzez wprowadzenie mielonego granulowanego żużla oraz innych odpowiednio dobranych dodatków mineralnych. W związku z powyższym, w ostatnich latach prowadzone są intensywne badania nad rozwojem spoiw i zaczynów w celu uzyskania nowej generacji spoiw specjalnych. Zaczyny tego typu oparte są wyłącznie na składnikach pochodzenia nieorganicznego. Otrzymuje się je poprzez modyfikację składu odpowiednio zestawionych i przygotowanych zaczynów sporządzonych na osnowie bądź to wieloskładnikowych cementów powszechnego użytku, bądź mielonych granulowanych żużli wielkopieczowych z różnego rodzaju dodatkami o właściwościach pucolanowych. Do grupy pucolan sztucznych zalicza się zarówno różnego rodzaju popioły powstające w procesie spalania paliw, jak i zdehydratyzowane minerały ilaste [1, 4].

Wprowadzanie dodatków mineralnych do składu cementu modyfikuje szereg jego właściwości:

- wydłuża czas wiązania,
- obniża kinetykę wydzielania ciepła i dynamikę narastania wytrzymałości wczesnej,
- podwyższa odporność na korozyjne oddziaływanie środowiska [1, 3, 4].

Koszt zaczynu cementowego sporządzonego na samym cemencie portlandzkim byłby dość znaczny, dlatego poszukuje się odpowiednich i tanich dodatków, które w odpowiedni sposób zmodyfikowałyby parametry zaczynu niekiedy znacznie je poprawiając.

Jednym z takich rozwiązań jest dodanie popiołu fluidalnego, który w istotny sposób obniża koszty prowadzonych prac wzmacniających lub uszczelniających. Dodatek popiołu fluidalnego do suchego cementu obniża koszty od 30÷40% w zależności od wybranego cementu.

Zaostrzone dyrektywy unijne dotyczące ochrony środowiska i rosnące koszty składowania odpadów z elektrowni coraz bardziej wymuszają na producentach energii elektrycznej na bazie węgla, poszukiwania drogi do wykorzystania tych odpadów w racjonalny i ekonomiczny sposób. Jednym z produktów spalania węgla jest popiół. Sprzyjającym ochronie środowiska i jednocześnie tanim sposobem jest zastosowanie tych popiołów jako dodatków do cementów portlandzkich (cementy: portlandzki popiołowy, portlandzki

wieloskładnikowy, pucolanowy, wieloskładnikowy), stosowanych w budownictwie, przemysle naftowym lub w bardzo dynamicznie rozwijającej się dziedzinie, jaką jest geoinżynieria.

Wytwarzanie tego rodzaju spoiw hydraulicznych jest bardzo ekonomiczne, gdyż sprowadza się do przemielenia popiołu z cementem portlandzkim. Pomija się tu cały szereg operacji technologicznych, przede wszystkim bardzo kosztownych, a zarazem energochłonnych i szkodliwych dla środowiska, takich jak spiekanie w wysokich temperaturach w piecach przemysłowych.

## 2. POPIOŁY FLUIDALNE

Proces fluidyzacji polega na zawieszeniu ziaren ciała stałego unoszonego w płynącym do góry strumieniu płynu. Złoże ziaren ciała stałego jest intensywnie mieszane, przechodzi w stan półzawieszony, czyli fluidalny, i przyjmuje wiele właściwości cieczy. Taki stan zapewnia duże rozwinięcie powierzchni kontaktu między ziarnami i płynem, co znacznie ułatwia przebieg procesów cieplnych i dyfuzyjnych zachodzących między fazą stałą i ciekłą lub gazową. Stosując odpowiednie wymiary ziaren oraz właściwą prędkość gazu, można uzyskać duże stężenie ciała stałego w układzie: ciało stałe-gaz. W tych warunkach można stwierdzić intensywnie mieszanie ciała stałego, co w połączeniu z bardzo rozwiniętą powierzchnią tego ciała, stwarza doskonałe warunki dla przenikania ciepła oraz ruchu masy.

Stosując w kotłach palenisko z warstwą fluidalną, można spalać gorsze jakościowo, zasiarczone paliwa, przy jednoczesnym ograniczeniu emisji tlenków siarki i azotu już w trakcie procesu spalania. Charakterystycznym dla paleniska fluidalnego jest to, że węgiel w trakcie spalania wymieszany jest z materiałem inertnym, i w związku z tym można uzyskać niską temperaturę spalania wynoszącą ok. 850°C, a więc poniżej temperatury mięknięcia popiołu. Wpływa to na zmniejszenie zanieczyszczeń powierzchni grzewczych oraz ma duży wpływ na wielkość emisji tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) (im niższa temperatura, tym tworzenie tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) jest mniejsze). Podawany wraz z paliwem dolomit lub kamień wapienny wiąże w łożu powstały ze spalania siarki  $\text{SO}_2$ . Dzięki temu, już w palenisku można osiągnąć sześciokrotne zmniejszenie emisji dwutlenku siarki do atmosfery. Ponieważ w zakresie temperatur 800÷900°C znajduje się optimum wiązania  $\text{SO}_2$  przez kamień wapienny, jego zużycie jest znacznie mniejsze niż przy stosowaniu innych metod odsiarczania spalin poza kotłem. Dodatkową zaletą paleniska fluidalnego jest intensywna wymiana ciepła umożliwiająca zmniejszenie powierzchni ogrzewalnej kotła. Paleniska fluidalne mogą być stosowane zarówno w nowo budowanych jednostkach kotłowych jak i w przypadku modernizacji istniejących kotłów [2, 8, 9].

Prace nad fluidalnym spalaniem zostały rozpoczęte 16 grudnia 1921 roku, kiedy Fritz Winkler zauważył ruch ziarenek pod wpływem powietrza przypominający wrzącą ciecz. Ten niewielki eksperyment zapoczątkował rozwój nowego procesu zwanego fluidyzacją.

Jednakże dopiero w latach 60. XX w. pojawiło się szczególne zainteresowanie techniką fluidalnego spalania, dzięki usilnym wysiłkom Douglasa Elliota, który wspólnie z British Coal Utilization Research Association i National Coal Board zainicjował program badań fluidalnego spalania węgla w warstwie pęcherzykowej (*bubbling fluidized bed*).

Głównymi przesłankami decydującymi o wysokiej atrakcyjności zmielonych odpadów fluidalnych w przemyśle materiałów budowlanych jest przede wszystkim jej wysoka aktywność pucolanowa i bardzo dobra mielność. Wysoka aktywność pucolanowa popiołu fluidalnego wynika z dominującego udziału amorficznych i bardzo słabo skryształizowanych produktów dehydratacji minerałów ilastych, takich jak: illit, montmorylonit, kaolinit czy też chloryt. Aktywność pucolanowa popiołów fluidalnych zależy od zawartości w nich składników reaktywnych ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) w stosunku do wydzielającego się w trakcie hydratacji cementu wodorotlenku wapniowego. Zawartość wolnego wapnia, jako jednego ze składników popiołu fluidalnego, korzystnie wpływa na przyspieszenie czasu wiązania cementu, jednakże cement nie powinien zawierać nadmiernych ilości wolnego CaO. Wysoka mielność cementów wraz z popiołami fluidalnymi pozwala uzyskać bardzo dużą rozwiniętą powierzchnię właściwą, co wpływa pozytywnie na przesłanki ekonomiczne z tytułu mniejszej energii mielenia cementu. Duża powierzchnia właściwa zaczynów cementacyjnych zawierających popiół fluidalny wpływa na bardzo intensywny przebieg reakcji chemicznych już w początkowych okresach hydratacji cementu, co rzutuje na dobrą dynamikę przyrośną wytrzymałości cementu od pierwszych dni jego twardnienia. Wprowadzenie popiołu fluidalnego do zaczynu uszczelniającego kosztem cementu pozwala na obniżenie jego kosztów jednostkowych o 30÷40% w stosunku do klasycznych zaczynów cementowych.

Ze względu na to, że popioły fluidalne są materiałami odpadowymi, ich aplikacje przy produkcji spoiw specjalnego przeznaczenia wymagają stałej i rzetelnej kontroli ich fizykochemicznych właściwości.

### 3. BADANIA LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających przeprowadza się w oparciu o następujące normy:

- PN-EN 197-1: 2002. *Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.*
- PN-EN 196-1: 1996. *Metody badania cementu. Oznaczanie wytrzymałości. Grudzień 1996.*
- PN-EN 196-3: 1996. *Metody badania cementu. Oznaczanie czasów wiązania i stałość objętości. Grudzień 1996 r.*
- PN-EN ISO 10426-1. *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 1. Specyfikacja.*
- PN-EN ISO 10426-2. *Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2. Badania cementów wiertniczych. 2003.*

Przeprowadzone badania laboratoryjne miały na celu zbadania przydatności cementu portlandzkiego CEM I 32,5R oraz popiołu fluidalnego do zastosowania jako spoiw hydraulicznych do sporządzania zaczynów do prac związanych z uszczelnianiem i wzmacnianiem górotworu. W przeprowadzanych badaniach zmiennymi były:

- współczynnik  $w/c$ ,
- koncentracja popiołu fluidalnego w zaczynie.

Współczynnik wodno-mieszaninowy (cement wraz z popiołem) dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,4; 0,5; 0,6; oraz 0,7. Popiół fluidalny był przemielony do powierzchni  $400 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$ , zaś jego gęstość wynosiła  $2758 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

Popiół fluidalny był dodawany do cementu portlandzkiego w ilościach 5%; 7% i 10% wagowo w stosunku do masy suchego cementu [2].

Badania laboratoryjne związane z określeniem parametrów technologicznych świeżych i stwardniałych zaczynów uszczelniających obejmują niżej wymienione pomiary.

- Dla świeżych zaczynów uszczelniających określa się:
  - **gęstość** – za pomocą wagi Baroid;
  - **odstój** – za pomocą cylindra pomiarowego;
  - **rozlewność** – za pomocą stożka AzNII;
  - **lepkość względną** – za pomocą kubka Forda nr 4;
  - **filtrację** – za pomocą prasy filtracyjnej Baroid, stosowanej do badania filtracji płuczek wiertniczych; pomiar przeprowadzano do tzw. „momentu przebicia” zaczynu, tzn. do momentu, kiedy wypływający filtrat z fazy ciągłej przechodził w postać aerozolu;
  - **czas wiązania** – za pomocą aparatu Vicata;
  - **właściwości reologiczne** (lepkość plastyczną, lepkość pozorną, granicę płynięcia) – za pomocą lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach typu Chan – 35 API Viscometer – Tulusa, Oklahoma USA EG.G Chandler Engineering o dwunastu prędkościach obrotowych (600, 300, 200, 100, 60, 30, 20, 10, 6, 3, 2, 1 obr./min, co odpowiada następującym szybkościom ścinania: 1022,04; 511,02; 340,7; 170,4; 102,2; 51,1; 34,08; 17,04; 10,22; 5,11; 3,41;  $1,70 \text{ s}^{-1}$ );
  - **model reologiczny** – dobór optymalnego modelu reologicznego zaczynów uszczelniających polegał na określeniu krzywej reologicznej umożliwiającej najlepsze opisanie wyników pomiarów w układzie współrzędnych: naprężenia styczne ( $\tau$ ) – szybkość ścinania ( $\dot{\gamma}$ ).

Wykorzystując metodę analizy regresji, wyznaczano parametry reologiczne dla poszczególnych modeli. Następnie za pomocą przeprowadzonych testów statystycznych, określono optymalny model reologiczny dla danej receptury zaczynu uszczelniającego.

Celem ułatwienia obliczeń związanych z ustaleniem optymalnych modeli reologicznych dla badanych zaczynów, skorzystano z programu komputerowego „Flow – Fluid Coef” [6, 7]. Program ten jest własnością Katedry Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH i jest wykorzystywany w pracach naukowo-badawczych.

- Dla stwardniałych zaczynów uszczelniających mierzy się:
  - wytrzymałość na ściskanie – za pomocą prasy hydraulicznej pozwalającej na wywieranie obciążenia do 200 kN;
  - wytrzymałość na zginanie – za pomocą aparatu Michaelisa.

#### 4. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Receptury zaczynów uszczelniających wytypowanych do badań laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 1. Parametry technologiczne świeżych zaczynów z dodatkiem popiołów fluidalnych zawarte są w tabelach 2, 3 i 4. W tabeli 5 zamieszczono parametry wytrzymałościowe stwardniałych zaczynów.

**Tabela 1**  
Rodzaje receptur zaczynów uszczelniających

Oznaczenie zaczynu	Współczynnik wodno-cementowy	Dodatek popiołu fluidalnego [%]
CEM I 32,5R	0,4	0
CEM I 32,5R	0,5	0
CEM I 32,5R	0,6	0
CEM I 32,5R	0,7	0
CEM I 32,5R	0,4	5
CEM I 32,5R	0,5	5
CEM I 32,5R	0,6	5
CEM I 32,5R	0,7	5
CEM I 32,5R	0,4	7
CEM I 32,5R	0,5	7
CEM I 32,5R	0,6	7
CEM I 32,5R	0,7	7
CEM I 32,5R	0,4	10
CEM I 32,5R	0,5	10
CEM I 32,5R	0,6	10
CEM I 32,5R	0,7	10

Opracowanie statystyczne wyników z badań laboratoryjnych polegało na określeniu stopnia istotności współczynnika wodno-mieszaninowego i koncentracji popiołu fluidalnego na parametry technologiczne świeżego stwardniałego zaczynu uszczelniającego.

Starano się uzyskać korelację pomiędzy koncentracją popiołu fluidalnego (przy różnych współczynnikach wodno-mieszaninowych) a zmierzonymi parametrami.

W obliczeniach pominięto wartości parametrów zmian wytrzymałości na zginanie po 2 dniach dojrzewania kamienia cementowego dla  $w/m$  równym 0,6 i 0,7, gdyż pojawiły się problemy z określeniem wytrzymałości otrzymanych próbek, zmiany wytrzymałości na zginanie nie przekroczyły wartości 1,286 MPa.

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelach 6 i 7. W równaniu funkcji przyjęto że:

$x$  – zmienna niezależna – dodatek popiołu fluidalnego,

$y$  – zmienna zależna – wynik pomiarów.

**Tabela 2**

Parametry technologiczne zaczynów uszczelniających określane laboratoryjnie w temperaturze 20 ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) [293 K]

Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Dodatek popiołu fluidalnego [%]	Współczynnik wodno-mieszaninowy [-]	Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ]	Rozlewność wg stożka AzNII [mm]	Lepkość względna wg Kubka Forda nr 4 [s]	Odstój [%]	Filtracja właściwa $\Delta P = 0,7\text{MPa}$ [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
CEM I 32.5R	0	0,4	1990	134	–	0,00	45/11
CEM I 32.5R	0	0,5	1850	157	–	0,00	69/12
CEM I 32.5R	0	0,6	1770	210	21	1,2	84/11
CEM I 32.5R	0	0,7	1700	>260	14	3	100/14
CEM I 32.5R	5	0,4	1970	140	–	0,00	54/14
CEM I 32.5R	7	0,4	1980	140	–	0,00	55/12
CEM I 32.5R	10	0,4	1960	150	21	0,00	75/11
CEM I 32.5R	5	0,5	1860	190	32	0,2	62/11
CEM I 32.5R	7	0,5	1870	220	31	0,4	69/17
CEM I 32.5R	10	0,5	1860	>260	20	1	70/15
CEM I 32.5R	5	0,6	1790	>260	17	3,18	84/16
CEM I 32.5R	7	0,6	1800	>260	14	3,2	86/16
CEM I 32.5R	10	0,6	1810	>260	15	3,56	90/17
CEM I 32.5R	5	0,7	1680	>260	13	3,8	110/16
CEM I 32.5R	7	0,7	1670	>260	12	4,4	130/20
CEM I 32.5R	10	0,7	1660	>260	10	4,8	150/18

**Tabela 3**  
Czasy wiązania zaczynów uszczelniających

w/c	Zawartość popiołu fluidalnego %	Początek wiązania	Koniec wiązania	Czas wiązania
		CEMI 32.5 R	CEMI 32.5 R	CEMI 32.5 R
0,4	0	4 h 20 min	6 h 30 min	2 h 10 min
0,5	0	5 h 50 min	8 h 50 min	3 h 00 min
0,6	0	3 h 10 min	6 h 20 min	3 h 20 min
0,7	0	6 h 00 min	9 h 50 min	3 h 50 min
0,4	5	4 h 40 min	7 h 20 min	2 h 30 min
0,5	5	6 h 00 min	9 h 10 min	3 h 10 min
0,6	5	6 h 10 min	9 h 40 min	3 h 30 min
0,7	5	6 h 40 min	10 h 40 min	4 h 00 min
0,4	7	4 h 50 min	7 h 30 min	2 h 40 min
0,5	7	6 h 10 min	9 h 40 min	3 h 30 min
0,6	7	6 h 30 min	10 h 20 min	3 h 50 min
0,7	7	7 h 10 min	12 h 30 min	4 h 20 min
0,4	10	5 h 00 min	7 h 50 min	2 h 50 min
0,5	10	6 h 50 min	11 h 50 min	5 h 00 min
0,6	10	7 h 00 min	12 h 10 min	5 h 10 min
0,7	10	7 h 30 min	12 h 50 min	5 h 30 min



**Tabela 4**

Parametry reologiczne dla różnych modeli reologicznych cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R

w/c	Zawar- tość popiołu flui- dalnego %	Typ modelu reologicznego															
		Bingham				Oswalda-de Waele				Casson				Herschela-Bulkleya			
		Lep- kość plastycz- na $\eta$ [Pa·s]	Gra- nica ply- niecia $\tau$ [Pa]	Współ- czynnik korelacji $r$ [-]	Współ- czynnik konsy- stencji $k$ [Pa·s <sup>n</sup> ]	Wy- kładnik potę- gowy $n$ [-]	Współ- czynnik kore- lacji $r$ [-]	Lep- kość plas- tyczna $\eta$ [Pa·s]	Gra- nica ply- niecia [Pa]	Współ- czynnik kore- lacji $r$ [-]	Współ- czynnik konsy- stencji $k$ [Pa·s <sup>n</sup> ]	Wy- kładnik potę- gowy $n$ [-]	Gra- nica ply- niecia [Pa]	Współ- czynnik kore- lacji $r$ [-]			
0,4	0	0,2516	9,4266	0,9835	1,1895	0,7601	0,9712	0,2204	2,1602	0,9873	2,4332	0,6169	-1,4414	0,9986			
0,5	0	0,0290	8,9048	0,8531	2,8373	0,3666	0,9673	0,0172	5,0029	0,9057	5,7005	0,2742	-3,9306	0,9708			
0,6	0	0,0410	7,6128	0,9704	2,3067	0,4201	0,9984	0,0245	4,1386	0,9865	0,7422	0,5862	3,5001	0,9899			
0,7	0	0,0134	5,6087	0,9556	3,0298	0,2339	0,9774	0,0099	4,1634	0,9880	0,5200	0,4766	3,4744	0,9932			
0,4	5	0,1935	15,2744	0,9601	3,9487	0,5291	0,9926	0,1369	6,2618	0,9755	9,2952	0,4813	-2,3335	0,9932			
0,5	5	0,0812	9,2775	0,9754	1,8037	0,5534	0,9979	0,0614	3,4300	0,9869	1,4287	0,5870	1,1125	0,9981			
0,6	5	0,0254	4,7704	0,9788	1,9161	0,3598	0,9403	0,0132	2,9929	0,9817	0,0659	0,8614	4,2322	0,9802			
0,7	5	0,0180	2,4340	0,9887	0,8047	0,4313	0,9640	0,0109	1,3061	0,9944	0,0747	0,7932	1,8075	0,9929			
0,4	7	0,1389	16,7424	0,9966	2,6155	0,5927	0,9931	0,1103	5,6719	0,9750	4,2861	0,5093	-2,7832	0,9998			
0,5	7	0,0630	9,8885	0,9655	2,6971	0,4550	0,9964	0,0422	4,6797	0,9851	1,6701	0,5302	1,8057	0,9993			
0,6	7	0,0301	4,7891	0,9913	0,3460	2,1925	0,9139	0,0156	3,0607	0,9877	0,0393	0,9608	4,6299	0,9915			
0,7	7	0,0223	2,9290	0,9535	0,4657	0,5802	0,9893	0,0176	1,0214	0,9681	0,8680	0,4779	-0,6785	0,9979			
0,4	10	0,2181	8,8279	0,9837	1,3380	0,7476	0,9923	0,1874	1,8205	0,9877	2,3903	0,6402	-2,4109	0,9984			
0,5	10	0,0438	6,2767	0,9871	2,1350	0,4199	0,9677	0,0266	3,3949	0,9953	0,2604	0,7415	4,2117	0,9942			
0,6	10	0,0240	4,3600	0,9841	1,7013	0,3683	0,9636	0,0133	2,5945	0,9949	0,1889	0,7012	2,9650	0,9938			
0,7	10	0,0143	1,2569	0,9909	0,3655	0,5030	0,9622	0,0052	0,5649	0,9946	0,0462	0,8295	0,8658	0,9941			

**Tabela 5**

Wytrzymałość mechaniczna na ściskanie i zginanie kamienia uszczelniającego w temperaturze 20 ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) [293 K]

Lp.	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Zawartość dodatku popiołu fluidalnego [%]	Współczynnik wodno- mieszaniowy [-]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]		Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
				po czasie utwardzania [doba]		po czasie utwardzania [doba]		
				2	7	2	2	7
1	CEM I 32.5R	0	0.4	5,838	7,852	2,153	4,706	4,706
2	CEM I 32.5R	0	0.5	3,081	6,780	0,683	2,39	2,39
3	CEM I 32.5R	0	0.6	1,916	4,843	0,53	1,616	1,616
4	CEM I 32.5R	0	0.7	1,204	3,203	0,313	0,936	0,936
5	CEM I 32.5R	5	0.4	4,228	8,106	1,266	2,33	2,33
6	CEM I 32.5R	7	0.4	3,146	7,826	1,22	2,32	2,32
7	CEM I 32.5R	10	0.4	3,176	4,808	1,246	1,673	1,673
8	CEM I 32.5R	5	0.5	1,624	5,852	0,63	1,06	1,06
9	CEM I 32.5R	7	0.5	1,569	4,011	0,586	0,986	0,986
10	CEM I 32.5R	10	0.5	1,460	2,514	0,566	0,766	0,766
11	CEM I 32.5R	5	0.6	1,286	4,470	0,366	1,043	1,043
12	CEM I 32.5R	7	0.6	1,286	3,252	0,3	0,923	0,923
13	CEM I 32.5R	10	0.6	1,286	3,729	0,28	0,663	0,663
14	CEM I 32.5R	5	0.7	1,286	3,426	0,246	0,82	0,82
15	CEM I 32.5R	7	0.7	1,286	2,361	0,22	0,45	0,45
16	CEM I 32.5R	10	0.7	1,286	2,043	0,18	0,44	0,44

**Tabela 6**

Parametry regresji linowej dla przebiegu zmian gęstości zaczynów w funkcji zmian dodatku popiołu fluidalnego przy różnych  $w/c$

MODEL LINIOWY $y = a \cdot x + b$					
$w/c$	Współczynniki równania regresji		Współczynnik korelacji $r$ [-]	Współczynnik $R^2$ [-]	Współczynnik Fishera-Snedecora $F$ [-]
	$a$	$b$			
0,4	-2,6415	1989,5283	-0,8600	0,7396	5,6811
0,5	1,3208	1852,7358	0,6799	0,4622	1,7192
0,6	4,0566	1770,1887	0,9983	0,9967	616,3333
0,7	-4,0566	1699,8113	-0,9984	0,9968	616,3333

**Tabela 7**

Parametry regresji linowej dla przebiegu zmian wytrzymałości na ściskanie stwardniałych zaczynów po 7 dniach dojrzewalności w funkcji zmian dodatku popiołu fluidalnego przy różnych  $w/c$

MODEL LINIOWY $y = a \cdot x + b$					
$w/c$	Współczynniki równania regresji		Współczynnik korelacji $r$ [-]	Współczynnik $R^2$ [-]	Współczynnik Fishera-Snedecora $F$ [-]
	$a$	$b$			
0,4	-0,3856	4,5336	0,9881	0,9763	82,6067
0,5	-0,1263	2,5406	0,8742	0,7642	6,4843
0,6	-0,0016	0,9391	0,0583	0,0034	0,0068
0,7	-0,0264	0,7390	0,6088	0,3707	1,1783

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że wraz ze wzrostem koncentracji popiołu fluidalnego w zaczynie uszczelniającym sporządzanym na osnowie cementu portlandzkiego występuje:

- obniżenie gęstości zaczynu,
- wzrost odstoju,
- zwiększenie rozlewności,
- wzrost filtracji właściwej,
- wydłużenie zarówno początku jak i końca wiązania,
- istotne obniżenie lepkości plastycznej oraz pozornej,
- obniżenie parametrów wytrzymałościowych stwardniałych zaczynów zwłaszcza w początkowym okresie ich twardnienia.

W wyniku dokonanych badań można stwierdzić, że dodatek popiołu fluidalnego o koncentracji nieprzekraczającej 10% w zaczynach cementowych o współczynnikach wodno-mieszaninowych 0,5 i 0,6 modyfikuje w taki sposób parametry technologiczne zaczynu, że mogą być zastosowane do uszczelniania zarówno ośrodka gruntowego, jak i masy skalnego.

## LITERATURA

- [1] Brylicki W., Małolepszy J.: *Własności cementów zawierających odpady z fluidalnego spalania paliw w paleniskach cyrkulacyjnych-atmosferycznych*. Biuletyn Wydziału Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, nr 66/2001
- [2] Dvořák J.: *Wpływ odpadów z fluidalnego spalania paliw na parametry technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na osnowie cementów portlandzkich CEM I 32,5R*. Kraków, Wydział WNiG AGH 2007 (praca dyplomowa magisterska)
- [3] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.: *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Opole, Górażdże Cement 2002
- [4] Kurdowski W.: *Chemia Materiałów budowlanych*. Kraków, UWND 2003
- [5] Stryczek S., Gonet A.: *Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych*. Sympozjum Naukowo-Techniczne, Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynieryjnych oraz hydrotechnice, Piła – Płotki 2001
- [6] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modelu reologicznego cieczy wiertniczej*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), t. 18/1, 2001
- [7] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow Fluid Coef*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, nr 2–3, Kraków, 2001
- [8] <http://www.ct-kotly.bci.pl/fluidyzacja.html>.
- [9] <http://www.popiol.pl/>