

Stanisław Stryczek*, Andrzej Gonet*, Jakub Zieliński*

**MODYFIKOWANIE PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH
ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH
SPORZĄDZONYCH NA OSNOWIE CEMENTÓW
PORTLANDZKO-POPIOŁOWYCH POPIOŁAMI FLUIDALNYMI****

1. WSTĘP

Stosowane do cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych zaczyny uszczelniające projektuje się między innymi ze względu na szeroki zakres temperatur panujących w górotworze. Dotyczy to także zakresu ciśnienia – od atmosferycznego w otworach płytkich, aż do ciśnień rzędu 200 MPa. Niezależnie od tego cementy muszą być odporne na silnie zmineralizowane płyny złożowe, jak również spełniać warunki uszczelniania skał o bardzo wysokim gradiencie ciśnienia złożowego [12, 13].

Zatem prawidłowy dobór zaczynu i jego parametrów technologicznych ma wpływ na pomyślność przeprowadzenia prac uszczelniających, uzyskanie zgodności zaczynu z otoczeniem, kontrolowany i ściśle określony czas wiązania, zapewnienie odpowiedniej mechanicznej wytrzymałości oraz długoletniej trwałości i odporności na korozję stwardniałych zaczynów. Spełnienie tych wszystkich wymagań może być zrealizowane tylko i wyłącznie przez stosowanie odpowiednich dodatków do cementu.

Jest to nie tylko kwestia wymagań, lecz także aspekt ekonomiczny przedsięwzięcia. Obniżenie kosztów inwestycji przy jednoczesnym zachowaniu parametrów technologicznych, a nierzadko nawet przy ich polepszeniu, jednoznacznie wskazuje na zasadność ich stosowania przy produkcji materiałów wiążących.

Zaczyny uszczelniające sporządzone na osnowie cementu portlandzkiego wykazują wiele wad: długi czas wiązania, nieodpowiednie właściwości reologiczne, mała odporność na czynniki korozyjne [2, 3]. W związku z powyższym w ostatnich latach prowadzone są intensywne badania nad dalszym rozwojem spoiw i nieorganicznych dodatków o właściwościach hydraulicznych bądź pucolanowych w celu uzyskania nowej generacji spoiw specjalnych o zwiększonej trwałości.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca wykonana w ramach badań statutowych WwNiG AGH

Otrzymuje się je poprzez modyfikację składu odpowiednio zestawionych i przygotowanych zaczynów sporządzonych na osnowie bądź to cementów portlandzkich, bądź wieloskładnikowych cementów powszechnego użytku.

Zgodnie z normami PN-EN-197-1. *Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku* oraz PN-EN-197-2. *Cement. Część 2: Ocena zgodności* w bardzo dużej grupie cementów z udziałem składników pucolanowych wyodrębnia się cementy popiołowe zawierające popiół lotny krzemionkowy (V) ze spalania węgla kamiennego.

Popiół lotny (V) stosowany jest jako składnik:

- drugorzędny cementu portlandzkiego CEM I (do 5% wagowo);
- główny cementu:
 - portlandzkiego popiołowego CEM II;
 - pucolanowego CEM IV;
 - wieloskładnikowego CEM V.

Powyższe normy wyróżniają:

- cementy portlandzkie popiołowe w dwóch odmianach CEM II/A-V i CEM II/B-V zawierające odpowiednio do 20 i 35% (wagowo) popiołu lotnego krzemionkowego;
- cementy pucolanowe w dwóch odmianach CEM IV /A i CEM IV/B mogące w swym składzie zawierać odpowiednio do 35 i 55% (wagowo) popiołu lotnego krzemionkowego;
- cementy wieloskładnikowe w dwóch odmianach CEM V/A i CEM V/B, zawierające odpowiednio do 30 i 50% dodatków o właściwościach pucolanowych.

2. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE POPIOŁÓW LOTNYCH I ICH MECHANIZM DZIAŁANIA W PROCESIE HYDRATACJI

Popioły lotne składają się w przeważającej części z kulistych cząstek o średnicy od ułamka μm do około $150 \mu\text{m}$. Średnie wartości ziarn popiołów kształtują się na poziomie $7\div 12 \mu\text{m}$. Pozostałości niespalonego węgla w formie okruchów o nieregularnych kształtach, zawarte są we frakcji powyżej $45 \mu\text{m}$. Ze względu na obecność znacznej liczby cząstek bardzo drobnych, o średnicach nie przekraczających $3 \mu\text{m}$, powierzchnie właściwe popiołów osiągają wysokie wartości, od $200 \text{ m}^2/\text{kg}$ do $1000 \text{ m}^2/\text{kg}$ według Blane'a. Gęstości właściwe popiołów, zawarte są na ogół w granicach $1700\div 2700 \text{ kg}/\text{m}^3$ i są one niższe od gęstości cementu, zaś gęstości nasypowe mogą wynosić $600\text{--}900 \text{ kg}/\text{m}^3$. Ich porowatość wewnętrzna wynosi od $0,6$ do $0,7 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Popiół lotny krzemionkowy (V) wykorzystywany do produkcji cementu portlandzkiego popiołowego CEM II oraz cementów CEM IV oraz CEM V musi spełniać określone kryteria jakościowe. Popiół V powinien zawierać maksymalnie 5% reaktywnego tlenu wapniowego CaO, a zawartość strat prażenia nie powinna przekraczać 5%.

Popiół lotny krzemionkowy jest materiałem chemicznie czynnym, ponieważ zawiera aktywną krzemionkę, która nadaje mu właściwości pucolanowe, tj. zdolność do reagowania z wodorotlenkiem wapniowym w środowisku wodnym, z utworzeniem związków o właściwościach hydraulicznych.

Wpływ popiołów lotnych na proces hydratacji jest stale badany i jak dotąd nie przedstawiono pełnego podsumowania zjawisk zachodzących w układzie cement-popiół-woda [1–3].

Niemniej jednak wiadomo, że składniki popiołu wykazują skłonność do wchodzenia w reakcję z jonami Ca^{2+} , pochodzącymi z hydrolizy krzemianów wapniowych w środowisku wodnym z utworzeniem tzw. faz C-S-H – produktów bardzo podobnych do hydratów powstających wskutek uwodnienia alitu i belitu. Fazy C-S-H wykazują w obecności popiołu niższą średnią zawartość CaO. Zawartość $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w produktach hydratacji ulega generalnie zmniejszeniu, nie tylko na skutek reakcji pucolanowej wiązania jonów Ca^{2+} przez krzemionkę z popiołu, ale również w efekcie obniżenia udziału klinkieru w cemencie. Aktywny tlenek glinu z popiołu tworzy uwodnione gliniany, etryngit, monosiarczanoglinian wapniowy i hydrogelenit.

Efekt działania popiołu zależy od jego rozdrobnienia i zawartości substancji aktywnej. Powierzchnie ziarn popiołu, zwłaszcza przy wysokiej zawartości frakcji drobnych, ułatwiają nukleację produktów hydratacji z fazy ciekłej, podobnie jak każdy, nawet nieaktywny wypełniacz o mikronowej wielkości cząstek.

W celu zwiększenia tempa przebiegu reakcji pucolanowej popioły poddaje się wspólnemu przemiałowi z klinkierem portlandzkim. Wywołuje to mikropełnienia w szklistej otoczce na kulistych ziarnach popiołu, a tym samym zwiększa ich reaktywność.

Ponadto w czasie wspólnego przemiału drobne ziarna popiołu ulegają dobremu wymieszaniu z klinkierem, co zapewnia uzyskanie cementu o wysokim stopniu jednorodności. Natomiast grubsze nie domielone frakcje popiołu, podobnie jak ziarna popiołu nie poddanego procesowi mielenia, wykazują zdecydowanie mniejszą aktywność pucolanową. Wprowadzone do zaczynu pełnią, praktycznie rzecz biorąc, tylko rolę „mikrokruszywa”, przyczyniając się tym samym jedynie do pewnej poprawy stopnia upakowania tekstury stwardniałego zaczynu [3].

Pamiętać należy również, że wprowadzenie dodatku popiołu do cementu jest zawsze związane z obniżeniem zawartości klinkieru w cemencie, a więc z podwyższeniem współczynnika wodno-cementowego. Wprowadzenie popiołu do hydratyzującego układu wiąże się również zawsze z zakłóceniem istniejących równowag – obecne w niewielkich ilościach w popiele alkalia i siarczany przechodząc do roztworu wywierają wielorakie działanie – nie tylko przyspieszające, ale również opóźniające pewne procesy. Stąd obserwuje się na ogół mniejsze lub większe opóźnienie wiązania i szybkości wzrostu wytrzymałości w początkowym okresie twardnienia, jak również obniżenie ciepła hydratacji cementów z dodatkiem popiołów [1–3].

3. CHARAKTERYSTYKA POPIOŁÓW FLUIDALNYCH

Popioły fluidalne są rezultatem spalania fluidalnego. Spalanie węgla w złożu fluidalnym należy do najbardziej korzystnych sposobów wytwarzania energii zapewniających niską emisję NO_x , z wysokim stopniem odsiarczania spalin i wysoką skutecznością wypalania paliwa. Popioły otrzymany w kotłach fluidalnych składają się z nieregularnych ziaren zdehydratyzowanych minerałów tworzących pierwotnie skałę płoną i mających niemal amorficzną strukturę o dużej powierzchni właściwej. Ma on dużo lepsze właściwości fizyczne w odróżnieniu od popiołu z kotłów konwencjonalnych i może wchodzić w reakcje chemiczne. Istotnie wyższa zawartość wapna stanowi o różnicy między nimi. Wykazują również różnice w składzie mineralnym.

Proces spalania w kotle fluidalnym przebiega w temperaturze 860°C, czyli w takiej gdzie nie tworzą się stałe cząstki tlenków azotu. Materiał złoża jest utworzony z popiołu powstającego ze spalania paliwa oraz z kamienia wapiennego, który jest stosowany do wychwytywania siarki uwalnianej w procesie spalania. Poprzez dodanie kamienia wapiennego do złoża osiąga się wysoki stopień retencji siarki, przy niskim stosunku molowym Ca/S.

Popioły fluidalne składają się najczęściej z:

- amorficznych lub słabo skryształizowanych produktów całkowitej lub częściowej dehydroksylacji substancji ilastych w łupkach stanowiących skałę płonną w złożach węgla;
- anhydrytu stanowiącego produkt odsiarczania;
- w niewielkich ilości siarczynu wapnia CaSO_3 ;
- nieprzereagowanego sorbent CaCO_3 ;
- CaO i produktów jego hydratacji;
- niespalonego węgla.

Odpady paleniskowe z kotłów fluidalnych mają inny skład chemiczny oraz fizyczne właściwości niż odpady paleniskowe z kotłów pyłowych. Wynika to z niższej temperatury spalania oraz dodawania do węgla kamienia wapiennego i innych dodatków. W zależności od zawartości w węglu siarki i popiołu, w kotłach fluidalnych powstaje więcej odpadów niż w kotłach pyłowych (o 20÷80%). Zawierają one głównie związki krzemu, wapnia, siarki i glinu.

Udział poszczególnych składników w całkowitej masie odpadów wynosi:

- gips bezwodny (anhydryt), CaSO_4 : 6÷35%,
- trójtlenek siarki, SO_3 : 3÷20%,
- wolny tlenek wapnia, CaO : 1÷25%,
- związek krzemu i glinu (illit): do 50%,
- składniki bezpostaciowe: 20÷30%,
- części palne: 1÷3%.

Gęstość właściwa popiołów fluidalnych zawarta jest w granicach 2500÷2750 kg/m³. Przeważają w nich ziarna blaszkowate o średnicy (zastępczej) poniżej 20 μm, których udział w masie odpadów stanowi 50÷70% [8].

Popiół fluidalny jako materiał w chwili obecnej zdobył uznanie wśród firm budowlanych, drogowych i geotechnicznych jako dobry surowiec do:

- ulepszania gruntów,
- do wzmacniania nawierzchni,
- do budowy nawierzchni twardej,
- do wykonania podbudowy zasadniczej i pomocniczej,
- do wykonania stabilizacji podbudowy pomocniczej i zasadniczej.

Prowadzone badania laboratoryjne w kraju i za granicą nad wykorzystaniem popiołów fluidalnych jako dodatku do cementów powszechnego użytku wykazały, że popioły fluidalne wywierają swój wpływ na niektóre parametry użytkowe cementów takie jak czas wiązania oraz wytrzymałości mechaniczne w przeciwieństwie do tradycyjnie stosowanego popiołu lotnego z kotłów pyłowych.

4. BADANIA LABORATORYJNE

Celem przeprowadzonych badań laboratoryjnych było udowodnienie następującej tezy: „dodatek popiołu fluidalnego w odpowiednich koncentracjach w stosunku do masy suchego cementu portlandzko-popiołowego rodzaju CEM II/B-V 32,5 R powinien wpłynąć dodatnio na parametry technologiczne świeżego i stwardniałego zaczynu cementowego przeznaczonego do wzmacniania i uszczelniania ośrodka gruntowego i masywu skalnego z zastosowaniem technologii wiertniczych”.

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 stałości 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.*

W przeprowadzanych badaniach zmiennymi były:

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

Współczynnik wodno-mieszaninowy (cement wraz z popiołem fluidalnym) 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.

5. OPRACOWANIE WYNIKÓW Z BADAŃ LABORATORYJNYCH

Receptury oraz parametry technologiczne świeżych zaczynów uszczelniających wytypowanych do badań laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 1. W tabelach 2 i 3 zamieszczono wyniki wytrzymałości stwardniałych zaczynów po dwóch i siedmiu dniach ich utwardzania w środowisku wodnym w temperaturze 20°C.

W celu wyboru optymalnego modelu reologicznego zaczynu uszczelniającego sporządzonego według określonej receptury, poddawano analizie najczęściej stosowane w praktyce modele płynów wiertniczych. Parametry reologiczne poszczególnych modeli obliczano wykorzystując analizę regresji, stosując metodę najmniejszych kwadratów.

Tabela 1

Wyniki badań laboratoryjnych świeżego zaczynu uszczelniającego z różną koncentracją popiołu fluidalnego

Lp.	Oznaczenia zaczynu uszczelniającego [-]	Gęstość [kg/m ³]	Odstój [%]	Rozlewność wg stożka Az N II [mm]	Lepkość względna wg kubka Forda nr 4 [s]	Filtracja właściwa [cm ³ /s]
1	04÷0%	1860	n.m.	120	n.m.	52/16
2	04÷5%	1845	n.m.	130	n.m.	59/20
3	04÷7%	1840	n.m.	135	n.m.	60/21
4	04÷10%	1840	n.m.	145	n.m.	61/22
5	05÷0%	1750	0,2	150	38	62/17
6	05÷5%	1745	0,25	170	29	71/21
7	05÷7%	1740	0,3	175	28	72/23
8	05÷10%	1735	0,45	185	28	74/22
9	06÷0%	1690	0,6	190	23	77/17
10	06÷5%	1680	3,5	195	21	82/21
11	06÷7%	1670	4	200	19	84/23
12	06÷10%	1655	4,4	210	17	86/24
13	07÷0%	1620	1,5	n.m.	16	88/17
14	07÷5%	1610	6	n.m.	14	94/21
15	07÷7%	1600	9,4	n.m.	13	95/22
16	07÷10%	1600	14	n.m.	13	97/23

n.m. – nie mierzone.

Tabela 2

Parametry wytrzymałościowe stwardniałego zaczynu dla współczynnika wodno-mieszaninowego 0,4

Lp.	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Współczynnik wodno-mieszaninowy [-]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]		Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	
			Okres twardnienia [doba]			
			2	7	2	7
1	04÷0%	0,4	4,59	7,20	17,99	28,54
2	04÷5%	0,4	3,73	5,75	11,67	25,83
3	04÷7%	0,4	3,62	5,53	11,04	19,42
4	04÷10%	0,4	3,48	5,39	9,22	17,64

Tabela 3

Parametry wytrzymałościowe dla współczynnika wodno-mieszaninowego 0,7

Lp.	Oznaczenie zaczynu uszczelniającego [-]	Współczynnik wodno-mieszaninowy [-]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]		Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	
			Okres twardnienia [doba]			
			2	7	2	7
1	07÷0%	0,7	n.m	2,60	3,83	7,63
2	07÷5%	0,7	n.m	2,19	2,92	5,42
3	07÷7%	0,7	n.m	2,00	2,29	4,25
4	07÷10%	0,7	n.m	1,81	1,79	3,21

n.m. – nie mierzone.

Tabela 4

Parametry reologiczne zaczynu cementowego o współczynniku wodno-mieszaninowym 0,4

Parametry reologiczne		Oznaczenie zaczynu cementowego			
		04÷0%	04÷5%	04÷7%	04÷10%
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2208	0,216	0,2144	0,2047
	Współczynnik korelacji [-]	0,7132	0,7761	0,8011	0,8241
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	n.m	n.m	n.m	n.m
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1675	0,17	1,1715	0,1643
	Granica płynięcia [Pa]	34,4215	29,7692	27,6498	26,0764
	Współczynnik korelacji [-]	0,8819	0,8968	0,9029	0,9249
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	n.m	n.m	n.m	n.m
Model Ostwalda-de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	7,7929	5,8666	5,2731	4,7181
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4648	0,5057	0,5193	0,5344
	Współczynnik korelacji [-]	0,9745	0,9754	0,9756	0,9859
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1214	0,1302	0,1336	0,1270
	Granica płynięcia [Pa]	14,8477	11,4985	10,2099	9,7611
	Współczynnik korelacji [-]	0,9156	0,9230	0,9266	0,9463
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	-21,0249	-17,8629	-15,4314	-12,2485
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	20,7491	16,1173	13,5747	11,6536
	Wykładnik potęgowy [-]	0,32293	0,3624	0,3854	0,3987
	Współczynnik korelacji [-]	0,9813	0,9827	0,9816	0,9944

n.m. – nie mierzone.

W Katedrze Wiertnictwa i Geoinżynierii na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH opracowano zasady wyznaczania parametrów reologicznych oraz metodykę doboru optymalnego modelu reologicznego cieczy wiertniczej. Został również opracowany program numeryczny Rheo Solution, wspomagający proces doboru modelu reologicznego dla rzeczywistej cieczy wiertniczej w tym również różnego typu zaczynów uszczelniających [7, 8]. W tabelach 4, 5 i 6 przedstawiono obliczone parametry reologiczne dla analizowanych modeli z zaznaczeniem modelu optymalnego dla każdej z receptur.

Tabela 5
Parametry reologiczne określone dla zaczynu cementowego
o współczynniku wodno-mieszaninowym 0,5

Parametry reologiczne		Oznaczenie zaczynu cementowego			
		05÷0	05÷5	05÷7	05÷10
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,1222	0,1092	0,0948	0,1009
	Współczynnik korelacji [-]	0,7097	0,9102	0,9102	0,9244
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	0,096	0,0915	0,0830	0,0900
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0912	0,0884	0,0792	0,0852
	Granica płynięcia [Pa]	20,0077	13,4327	10,1111	10,1218
	Współczynnik korelacji [-]	0,9115	0,9609	0,9778	0,9830
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	0,0960	0,0915	0,0830	0,0900
Model Ostwalda-de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	4,2229	3,2167	2,3764	2,4920
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4788	0,4847	0,5067	0,5046
	Współczynnik korelacji [-]	0,9767	0,9994	0,9968	0,9928
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0631	0,0620	0,0557	0,0596
	Granica płynięcia [Pa]	9,2331	5,9290	4,3769	4,4200
	Współczynnik korelacji [-]	0,9419	0,9802	0,9911	0,9942
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	-10,6573	0,6913	2,7336	3,7227
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	11,9582	2,8454	1,2554	0,9681
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3198	0,5035	0,6017	0,6488
	Współczynnik korelacji [-]	0,9967	0,9995	0,9991	0,9986

Tabela 6

Parametry reologiczne określone dla zaczynu cementowego
o współczynniku wodno-mieszaniowego 0,7

Parametry reologiczne		Oznaczenie zaczynu cementowego			
		07÷0	07÷5	07÷7	07÷10
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,0310	0,0264	0,0250	0,0231
	Współczynnik korelacji [-]	0,8988	0,9291	0,9271	0,9464
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	0,0270	0,0250	0,0235	0,0220
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0254	0,0222	0,0207	0,0199
	Granica płynięcia [Pa]	3,6221	2,7511	2,7799	2,1228
	Współczynnik korelacji [-]	0,9842	0,9940	0,9938	0,9941
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	0,0270	0,0250	0,0235	0,0220
Model Ostwalda-de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,3340	1,1257	1,1717	0,7848
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4007	0,3953	0,3802	0,4327
	Współczynnik korelacji [-]	0,9628	0,9286	0,9236	0,9388
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0158	0,0129	0,0115	0,0123
	Granica płynięcia [Pa]	1,9149	1,5902	1,6640	1,1388
	Współczynnik korelacji [-]	0,9969	0,9932	0,9917	0,9943
Model Herschela-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	1,8887	2,5087	2,6074	1,8777
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,2483	0,0377	0,0312	0,0359
	Wykładnik potęgowy [-]	0,6707	0,9227	0,9398	0,9138
	Współczynnik korelacji [-]	0,9990	0,9945	0,9941	0,9948

6. 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 portlandzko-popiołowego CEM II/B-V 32,5R 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 nie przekraczającej 5% w zaczynach cementowych o współczynnikach wodno-mieszaninowych (w/m) 0,4 i 0,5 modyfikuje w taki sposób parametry technologiczne zaczynu, że mogą być zastosowane do uszczelniania zarówno ośrodka gruntowego jak i masywu skalnego. Wzrost współczynnika w/m powyżej 0,5 oraz koncentracji popiołu fluidalnego powyżej 5% (w stosunku do masy suchego cementu) powoduje bardzo istotne wydłużenie czasu wiązania oraz gwałtowne obniżenie wytrzymałości mechanicznej stwardniałych zaczynów, a zwłaszcza w początkowym okresie ich twardnienia. Dalsze prace badawcze powinny być ukierunkowane nad określeniem wpływu wysokiej temperatury na kształtowanie się cech użytkowych zaczynów z dodatkiem popiołów fluidalnych.

LITERATURA

- [1] Giergiecny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.: *Cement z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Opole, Górażdże Cement 2002
- [2] Jamróży Z.: *Beton i jego technologie*. Warszawa-Kraków, Wydawnictwo Naukowe PWN 2000
- [3] Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M.: *Energetyka a ochrona środowiska*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 1997
- [4] Małolepszy J., Deja J., Brylicki W., Gawlicki M.: *Technologia betonu. Metody badań*. Kraków, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne 2000
- [5] Neville A.M.: *Właściwości betonu*. Kraków, Cement Polski 2000
- [6] Stryczek S., Gonet A.: *Wymagania odnośnie zaczynów uszczelniających stosowanych w technologiach wiertniczych*. Sympozjum Naukowo-Techniczne, Cementy w budownictwie, robotach wiertniczych i inżynierskich oraz hydrotechnice”, Piła – Płotki 2001
- [7] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modelu reologicznego cieczy wiertniczej*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), R. 18/1, 2001
- [8] Wiśniowski R., Skrzypaszek K.: *Komputerowe wspomaganie wyznaczania modelu reologicznego cieczy – program Flow Fluid Coef*. Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, nr 2–3, Kraków, 2001
- [9] Zieliński J.: *Wpływ odpadów z fluidalnego spalania paliw na parametry technologiczne zaczynów uszczelniających sporządzanych na podstawie cementów portlandzko popiołowych CEM II/B-V32,5R*. Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, AGH Kraków, 2007 (praca dyplomowa magisterska)
- [10] <http://www.ct-kotly.bci.pl/fluidyzacja.html>. Z dnia: 4 marca 2008
- [11] <http://www.popiol.pl/>. Z dnia: 4 marca 2008