

**Stanisław Stryczek*, Andrzej Gonet*,
Rafał Wiśniowski*, Mariusz Sadłos***

**WPLYW KONCENTRACJI
PYŁÓW CEMENTOWYCH Z CEMENTOWNI RUDNIKI
NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE
ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH****

1. WSTĘP

W ostatnich latach przemysł wiertniczy uległ bardzo dużemu postępowi. Objęło to jego wszystkie dziedziny w tym także opracowywanie nowej generacji receptur zaczynów przeznaczonych do uszczelnianiem i wzmacnianiem ośrodka gruntowego i masywu skalnego. Obecnie stosowane zaczyny uszczelniające nie składają się tylko z jednego spoiwa hydraulicznego, jakim najczęściej bywa cement, i wody, lecz są mieszaniną wielu dodatków oraz domieszek regulujących ich właściwości technologiczne, takie jak: gęstość, szybkość wiązania, parametry reologiczne, czas przetłaczalności oraz wytrzymałość mechaniczna po określonym czasie.

Każdy otwór wiertniczy jest inny (ze względu na warunki geologiczne, głębokość, przeznaczenie) i w związku z tym nie można mówić o jednym uniwersalnym zaczynie, który spełniałby wszystkie postawione mu wymagania natury techniczno-technologicznej.

Dobór odpowiedniej receptury zaczynu uszczelniającego stanowi nie lada wyzwanie. Zaczyny muszą spełniać szereg wymagań normowych odnośnie do ich właściwości technologicznych w tym szczególnie parametrów reologicznych.

Jedną z dróg rozwoju w tym zakresie jest opracowywanie coraz to doskonalszych receptur zaczynów uszczelniających, z czym związane jest poszukiwanie nowych składników, które będzie można zastosować podczas przygotowania zaczynów uszczelniających. Celem stosowania nowych dodatków jest poprawa zarówno parametrów technologicznych, jak i ekonomicznych zaczynu uszczelniającego.

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca została wykonana w ramach badań statutowych nr. 11.11.190.01 na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

W dobie, gdy zagadnienia ochrony środowiska zyskują coraz to większe znaczenie, korzystne jest szukanie potencjalnych dodatków do zaczynów pośród produktów odpadowych z innych gałęzi przemysłu, jak choćby w przemyśle produkującym cement. Ogólnie przyjęto, że nowoczesny proces produkcji cementu jest procesem bezodpadowym, tym niemniej powstają jednak w niewielkich ilościach produkty uboczne, uzyskiwane w postaci alkalicznych pyłów, i są one sporadycznie wykorzystywane w różnych etapach procesu produkcji cementu [1, 2, 6].

Z tego powodu zrodziło się zagadnienie, czy zastosowanie ich jako dodatku w większych ilościach w połączeniu z innymi składnikami zaczynu uszczelniającego nie przyczyni się do uzyskania zaczynu uszczelniającego o korzystniejszych parametrach.

W niniejszym artykule na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych określono wpływ koncentracji pyłów cementowych z cementowni Rudniki na właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R.

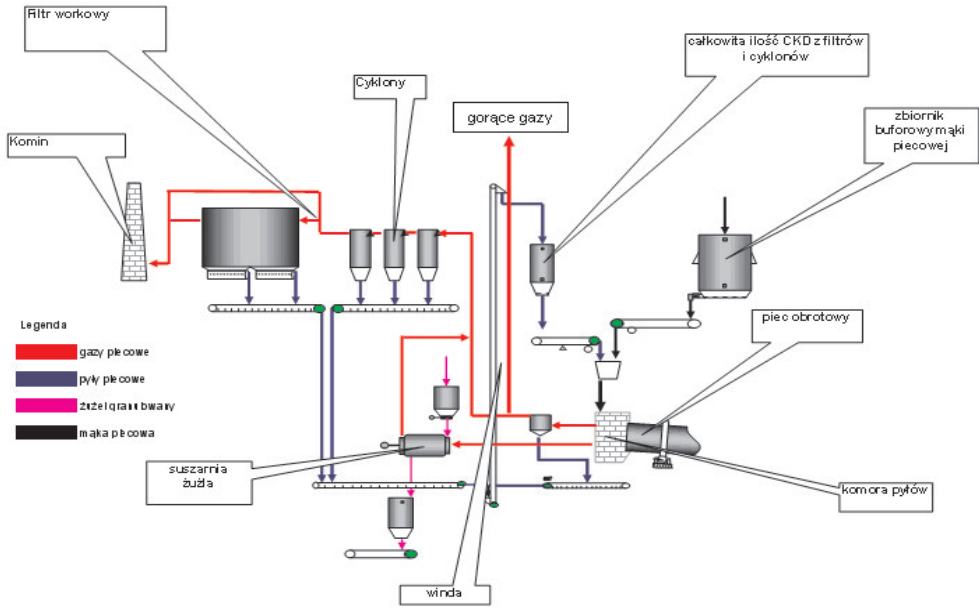
2. PYŁY CEMENTOWE

Pył cementowy jest to drobny materiał pozyskiwany jako odpad w produkcji cementu. Pył ten składa się z cząstek klinkieru, związków wapnia i innych alkalicznych związków chemicznych. Zawartość tych związków w znacznej mierze zależy od surowców użytych do produkcji cementu. Głównymi źródłami emisji pyłów są piece obrotowe, młyny surowca, chłodniki klinkieru oraz młyny cementu. Konstrukcja i niezawodność nowoczesnych elektrofiltrów i filtrów workowych zapewniają redukcję emisji pyłów do takiego poziomu, że przestają one być znaczące; w niektórych instalacjach uzyskano poziom emisji 10 mg/m^3 .

Pyły z produkcji cementu zawierają niewielkie ilości związków takich metali, jak: arsen (As), kadm (Cd), rtęć (Hg), ołów (Pb), tal (Tl) i cynk (Zn). Głównym źródłem bogatych w metale pyłów jest instalacja piecowa, w tym: podgrzewacze, precalcynatory, piece obrotowe i chłodniki klinkieru. Stężenie metali zależy od rodzaju obrabianego materiału i od recyrkulacji w instalacji piecowej. W szczególności przychód metali do procesu może wzrastać przy stosowaniu węgla i paliw z odpadów. Ponieważ metale wchodzące do pieca mają różną lotność, a także z uwagi na wysoką temperaturę, gorące gazy w piecu cementowym zawierają także gazowe związki metali.

Odpady z procesu produkcji klinkieru, które nie podlegają recyrkulacji, składają się głównie z nieużytecznego kamienia odrzuconego z surowca w trakcie przygotowywania mąki surowcowej oraz pyłu piecowego usuniętego z instalacji by-passu i komina. Filtrat z pras filtracyjnych stosowanych w metodzie półmokrej jest mocno alkaliczny i zawiera zawieszane cząstki stałe.

Wychwycone pyły (rys. 1) powinny być zawrócone do procesu produkcyjnego, tam gdzie jest to możliwe. Ten zawrót może mieć miejsce bezpośrednio do pieca lub nadawy piecowej (czynnikiem ograniczającym jest tutaj zawartość alkalicznych metali) bądź przez mieszanie z gotowym produktem końcowym (cementem). Dla materiałów, które nie mogą być zawrócone można znaleźć alternatywne zastosowanie, np. jako dodatek wchodzący w skład receptur zaczynów uszczelniających [1, 2, 3, 4, 5].



Rys. 1. Schemat pozyskiwania pyłów cementowych (CKD)[5]

3. WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ZACZYNÓW USZCZELNIAJĄCYCH

Właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających są bardzo istotne zarówno podczas projektowania, jak i realizacji prac związanych z uszczelnianiem i wzmacnianiem ośrodka gruntowego i masywu skalnego z wykorzystaniem technologii wiertniczych. Celem zapewnienia wysokiej skuteczności wykonywanych prac przy uszczelnianiu kolumn rur okładzinowych w głębokich otworach wiertniczych, jak również przy uszczelnianiu górotworu metodami iniekcji otworowej, należy dobrać parametry reologiczne zaczynów uszczelniających w zależności od [6, 7]:

- warunków złożowych uszczelnianych gruntów i skał,
- geometrii otworu wiertniczego oraz systemu cyrkulacyjnego,
- wzajemnych relacji pomiędzy strumieniem objętości tłoczonego zaczynu a oporami przepływu powstającymi podczas jego tłoczenia, zwłaszcza w uszczelnianym ośrodku.

Spełnienie wymienionych kryteriów związane jest z doбором modelu reologicznego, a następnie określeniem jego parametrów reologicznych. Prawidłowo wyznaczone parametry reologiczne umożliwiają obliczenia dla konkretnego przypadku oporów przepływu przy założonych:

- parametrach technologicznych zaczynu,
- zakresach przepływu (laminarny, turbulentny lub tłokowy).

Znajomość oporów hydraulicznych pozwala na:

- racjonalny dobór technologii uszczelniania górotworu,
- określenie strat ciśnień w układzie cyrkulacyjnym,

- ocenę rozkładu gradientu ciśnienia hydrostatycznego słupa zaczynu uszczelniającego przy jego wytłaczaniu poza kolumnę rur okładzinowych,
- określenie prędkości opadania zaczynu poza rurami okładzinowymi,
- projektowanie strumienia objętości tłoczenia zaczynu uszczelniającego, zapewniającego dobre usunięcie płuczki wiertniczej z przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego,
- określenie promienia zasięgu rozchodzenia się zaczynu w górotworze w przypadku stosowania otworowej iniekcji ciśnieniowej.

Właściwości reologiczne świeżych zaczynów cementowych stanowi przedmiot zainteresowań ze względu na ich związek z:

- przebiegiem procesów wiązania zaczynów,
- konsystencją,
- stabilnością,
- wyborem technologii zatłaczania zaczynów w uszczelniony ośrodek,
- oporami przepływu zaczynu przez system cyrkulacyjny.

Stosowane w praktyce wiertniczej płyny najczęściej opisuje się następującymi modelami reologicznymi [7, 8]:

- Newtona:

$$\tau = \eta \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right) \quad (1)$$

- Binghamia:

$$\tau = \tau_y + \eta \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right) \quad (2)$$

- Ostwalda de Waele:

$$\tau = k \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (3)$$

- Cassona:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\eta} \cdot \sqrt{\left(-\frac{dv}{dr} \right)} \quad (4)$$

- Herschell Bulkleya:

$$\tau = \tau_y + k \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (5)$$

gdzie:

- n – wykładnik potęgowy [-];
- k – współczynnik konsystencji [$\text{Pa}\cdot\text{s}^n$];
- τ_y – granica płynięcia, [Pa];
- η – dynamiczny współczynnik lepkości dla modelu Newtona, lepkość plastyczna dla modelu Bingham, lepkość plastyczna Cassona dla modelu Cassona [$\text{Pa}\cdot\text{s}$];
- dv/dr – gradient prędkości ścinania [s^{-1}].

Stosowanie dodatków i domieszek umożliwiających modyfikację właściwości fizycznych i parametrów reologicznych zaczynów uszczelniających powoduje, że zaczyny mogą wykazywać zarówno cechy cieczy plastycznych, plastycznolepkich, jak i cieczy pseudoplastycznych. Model reologiczny jest bowiem tylko przybliżeniem rzeczywistych zależności pomiędzy naprężeniami stycznymi występującymi w zaczynie a szybkością jego ścinania. Przyjęcie właściwego modelu reologicznego wpływa na dokładności obliczeń oporów przepływu płuczki wiertniczej w systemie cyrkulacyjnym.

W celu określenia strat ciśnienia powodowanych przepływem strumienia objętości zaczynu ustala się makroskopowo jednorodne elementy cyrkulacji, a następnie dla każdego z nich określa się:

- prędkość przepływu zaczynu w przestrzeni pierścieniowej otworu wiertniczego;
- reżim przepływu (w zależności od przyjętego modelu charakteryzowany liczbą Reynoldsa lub uogólnioną liczbą Reynoldsa).

W zależności od charakteru przepływu:

- dla przepływu laminarnego wyznacza się opory przepływu z odpowiednich wzorów (Newtona, Bingham, Cassona, Ostwalda de Waele Herschel–Bulkleya);
- dla przepływu turbulentnego określa się współczynnik strat na tarcie Fanninga, a następnie ze wzoru Fanninga oblicza się opory przepływu.

Dobór optymalnego modelu reologicznego zaczynów uszczelniających polegał na określeniu krzywej reologicznej umożliwiającej najlepsze opisanie wyników pomiarów w układzie współrzędnych: naprężenia styczne (τ) – szybkość ścinania ($\dot{\gamma}$).

Wykorzystując metodę analizy regresji, wyznaczono 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 numerycznego „Rheo Solution”. Program ten jest własnością Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH i jest wykorzystywany w pracach naukowo-badawczych [7, 8].

4. BADANIA LABORATORYJNE

Celem badań laboratoryjnych było określenie wpływu koncentracji pyłów cementowych z cementowni Rudniki na właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzonych na osnowie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R.

4.1. Metodyka badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne związane z pomiarem parametrów reologicznych świeżych zaczynów uszczelniających przeprowadzono według następujących norm:

1. API Recommended Practice for Testing Oil-Well Cements and Cement Additives. API RP 10 B. April 1997.
2. PN-EN 197-1: 2002, Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
3. PN-EN ISO 10426-2. Przemysł naftowy i gazowniczy. Cementy i materiały do cementowania otworów. Część 2: Badania cementów wiertniczych. 2003.

Wykonane badania laboratoryjne świeżych zaczynów uszczelniających obejmowały pomiar następujących parametrów:

- właściwości reologicznych (lepkości plastycznej, lepkości pozornej, granicy płynięcia, współczynnika konsystencji, parametru wyznaczającego miarę odchylenia badanej cieczy od cieczy newtonowskiej) – za pomocą lepkościomierza obrotowego Chan 35 API Viscometer o dwunastu prędkościach obrotowych oraz płynnej regulacji obrotów,
- rozlewności – za pomocą stożka ściętego (AzNII),
- lepkości umownej (względnej) za pomocą kubka Forda nr 4 [6].

4.2. Charakterystyka surowców służących do sporządzania zaczynów uszczelniających

Do sporządzenia zaczynów uszczelniających użyto następujących materiałów wyjściowych:

- cement portlandzki CEM I 42,5R,
- pył cementowy z cementowni Rudniki.

Badania zostały sporządzone na bazie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, którego głównym składnikiem jest klinkier portlandzki (min. 95%). Jako regulator czasu wiązania stosowany jest siarczan wapnia (maks. 5%) [3]. Wymagania oraz właściwości cementu portlandzkiego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1
Wymagania i właściwości cementu portlandzkiego CEM I 42,5R [3]

Właściwości		Wymagania wg PN-EN 197-1	CEM I 42,5R Górażdze	CEM I 42,5R Strzelce Op.
Wytrzymałość na ścislenie [N/mm ²]	2 dni	min. 20,0	27,8	28,8
	28 dni	min. 42,5 maks. 62,5	52,7	55,3
Początek wiązania [min]		min. 60	180	127
Koniec wiązania [h, min]		maks. 12	3,57	3,12
Stałość objętości [mm]		maks. 10,0	0,0	0,5
Siarczany jako SO ₃ [%]		maks. 4,0	3,1	3,1
Straty prażenia [%]		maks. 5,0	3,2	2,4
Części nierozpuszczalne [%]		maks. 5,0	0,5	0,5
Chlorki [%]		maks. 0,1	0,012	0,025

Pył cementowy użyty w badaniach pochodził z cementowni Rudniki. Był to pył z filtra workowego wychwycony z pieca obrotowego podczas wypalania klinkieru. Skład chemiczny pyłu został przedstawiony w tabeli 2.

Tabela 2
Skład chemiczny pyłu z filtra workowego

Składnik	Zawartość składnika % masy
CaO	37,5
SiO ₂	8,27
Al ₂ O ₃	3,12
Fe ₂ O ₃	0,95
MgO	1,64
Na ₂ O	1,08
K ₂ O	13,05
Cl ⁻	0,78
strata prażenia	27,11
wolne wapno	0,46
SO ₃	8,71

4.3. Sporządzanie zaczynu uszczelniającego

Współczynnik wodno-mieszaninowy dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił odpowiednio: 0,5; 0,6; 0,7. Pył cementowy dodawany był w ilościach 5%, 10%, 15% oraz 20% w stosunku do masy suchego cementu. Cieczą zarobową była woda z sieci wodociągowej o temperaturze 293 K (± 2 K). Wszystkie materiały wchodzące w skład zaczynów uszczelniających przechowywane były zgodnie z instrukcjami producenta. Odmierzoną ilość cieczy zarobowej wynikającą z założonego współczynnika wodno-mieszaninowego wlewano do plastikowego naczynia i uruchamiano elektryczne mieszadło szybkoobrotowe o obrotach od 20 obr./s do 120 obr./s. Następnie w ciągu 15 sekund dodawano do wody uprzednio odważoną ilość cementu wraz z pyłem cementowym równocześnie mieszając zaczyn przy małej prędkości obrotowej mieszadła (20 obr./s). Czas mieszania tak sporządzonego zaczynu wynosił nie dłużej niż 3 minuty. Bezzwłocznie po wyłączeniu mieszadła przystępowano do wykonywania pomiarów w następującej kolejności: właściwości reologicznych, gęstości, rozlewności i lepkości umownej.

5. WYNIKI Z BADAŃ LABORATORYJNYCH

W tabelach 3, 4 i 5 przedstawiono wyniki obliczeniowe z programu Rheosolution odnośnie doboru modeli reologicznych oraz ich parametrów dla badanych zaczynów w funkcji współczynnika wodno-mieszaninowego oraz koncentracji dodawanych popiołów cementowych z cementowni Rudniki.

Tabela 3

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających przy w/m wynoszącym 0,5

Parametry reologiczne		Koncentracja pyłu [%]				
		0	5	10	15	20
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,0763	0,0787	0,0968	0,1532	0,1705
	Współczynnik korelacji [-]	0,8302	0,8277	0,5472	0,5073	0,4888
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0595	0,0612	0,0678	0,1061	0,1181
	Granica płynięcia [Pa]	10,9018	11,2954	18,7864	30,4472	33,7877
	Współczynnik korelacji [-]	0,9752	0,9747	0,8991	0,8893	0,8507
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	3,6855	3,8505	4,9937	8,6426	8,3646
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3979	0,3953	0,4138	0,3967	0,4235
	Współczynnik korelacji [-]	0,9853	0,9860	0,9827	0,9865	0,9665
Model Cassona	Lepkość Cassone [Pa·s]	0,0351	0,0362	0,0420	0,0652	0,0788
	Granica płynięcia [Pa]	6,0473	6,2646	10,0064	16,4365	16,7926
	Współczynnik korelacji [-]	0,9924	0,9926	0,9389	0,9328	0,8972
Model Herschel–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	5,0531	5,0675	-12,0154	-20,425	-38,9582
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,0358	1,1237	14,3843	24,2577	38,5129
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5882	0,5809	0,2619	0,2542	0,2176
	Współczynnik korelacji [-]	0,9962	0,9972	0,9988	0,9975	0,9897
Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]		0,0665	0,0680	0,0750	0,1175	0,1225

Tabela 4

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających przy w/m wynoszącym 0,6

Parametry reologiczne		Koncentracja pyłu [%]	0	5	10	15	20
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,0284	0,0305	0,0498	0,0734	0,1386	
	Współczynnik korelacji [-]	0,9046	0,8797	0,7897	0,4307	0,6275	
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0232	0,0244	0,0379	0,0497	0,1001	
	Granica płynięcia [Pa]	3,3660	3,9528	7,7014	15,2502	24,8472	
	Współczynnik korelacji [-]	0,9945	0,9932	0,9710	0,8973	0,8914	
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,4406	1,7660	2,6427	4,5535	5,9459	
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3689	0,3484	0,3860	0,3827	0,4421	
	Współczynnik korelacji [-]	0,9351	0,9353	0,9863	0,9856	0,9803	
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0131	0,0133	0,0216	0,0289	0,0672	
	Granica płynięcia [Pa]	1,9951	2,4075	4,4168	8,6864	12,0821	
	Współczynnik korelacji [-]	0,9978	0,9986	0,9900	0,9407	0,9288	
Model Herschel–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	2,7268	3,0814	3,5577	-9,0439	-17,6932	
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,0755	0,1038	0,7861	11,8388	18,8760	
	Wykładnik potęgowy [-]	0,8283	0,7894	0,5635	0,2484	0,2769	
	Współczynnik korelacji [-]	0,9976	0,9981	0,9944	0,9978	0,9959	
Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]		0,0260	0,0275	0,0430	0,0570	0,1045	

Tabela 5

Parametry reologiczne zaczynów uszczelniających przy w/m wynoszącym 0,7

Parametry reologiczne		Koncentracja pyłu [%]				
		0	5	10	15	20
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,0252	0,0267	0,0304	0,0555	0,0594
	Współczynnik korelacji [-]	0,8543	0,8343	0,8826	0,7594	0,5773
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,0197	0,0206	0,0244	0,0417	0,0417
	Granica płynięcia [Pa]	3,5534	3,9393	3,8524	8,9356	11,4538
	Współczynnik korelacji [-]	0,9971	0,9966	0,9889	0,9613	0,9349
Model Ostwalda de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	1,8607	2,0789	1,5119	3,0846	3,8535
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3039	0,2963	0,3794	0,3795	0,3658
	Współczynnik korelacji [-]	0,8992	0,9045	0,9589	0,9933	0,9942
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,0096	0,0100	0,0141	0,0242	0,0231
	Granica płynięcia [Pa]	2,3810	2,6386	2,2041	5,0595	6,7720
	Współczynnik korelacji [-]	0,9939	0,9967	0,9987	0,9864	0,9687
Model Herschel–Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	3,2958	3,4678	2,5463	2,8038	0,4513
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,0367	0,0567	0,1706	1,3977	3,7731
	Wykładnik potęgowy [-]	0,9093	0,8527	0,7184	0,4976	0,3645
	Współczynnik korelacji [-]	0,9979	0,9990	0,9984	0,9987	0,9947
Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]		0,0230	0,0240	0,0270	0,0460	0,0485

Dodatkowo w tabeli 6 zamieszczono wyniki badań dotyczące gęstości, rozlewności oraz lepkości umownej badanych zaczynów. Z punktu widzenia technologii wykonywania zabiegów uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych oraz wzmocnienia górotworu pomierzone parametry są przydatnymi dla zgrubnego oszacowania ich właściwości odnośnie przetłaczalności w ośrodku gruntowym.

Tabela 6

Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiające parametry technologiczne świeżych zaczynów cementowych

Współczynnik wodno-mieszaninowy	Koncentracja pyłu [%]	Gęstość [kg/m ³]	Rozlewność [mm]	Lepkość umowna [s]
w/m=0,5	0	1840	230	20
	5	1830	230	19
	10	1850	210	22
	15	1850	135	n.m.
	20	1840	130	n.m.
w/m=0,6	0	1760	>260	14
	5	1740	>260	15
	10	1760	>260	20
	15	1750	210	23
	20	1750	165	n.m.
w/m=0,7	0	1670	>260	14
	5	1680	>260	15
	10	1660	>260	15
	15	1650	>260	13
	20	1660	220	16

„n.m.” – pomiar niemożliwy do przeprowadzenia ze względu na konsystencję zaczynu.

6. WNIOSKI

Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić co następuje:

- dla współczynnika wodno-mieszaninowego wynoszącego 0,5 oraz dla wszystkich badanych koncentracji pyłów, modelem najdokładniej opisującym parametry reologiczne jest model Herschela–Bulkeya;
- dla współczynnika wodno-mieszaninowego wynoszącego 0,6 przy czystym cemencie i 5% koncentracji pyłów, modelem najdokładniej opisującym parametry reologiczne

jest model Cassona, natomiast przy 10%, 15% i 20% koncentracji pyłów najlepiej parametry opisuje model Herschela–Bulkeya;

- dla współczynnika wodno-mieszaninowego wynoszącego 0,7 przy czystym cemencie oraz 5%, 15% i 20% koncentracji pyłów, modelem najdokładniej opisującym parametry reologiczne jest model Herschela–Bulkeya. Jedynie przy 10% koncentracji pyłu modelem najlepiej opisującym jest model Cassona.

Wraz ze wzrostem koncentracji pyłów cementowych zauważono wzrost lepkości plastycznej. Dla współczynnika wodno-mieszaninowego wynoszącego 0,6 lepkość plastyczna cementu bez dodatku wyniosła 0,0232 [Pa·s], natomiast przy 20% koncentracji pyłu cementowego lepkość ta wyniosła 0,1001 [Pa·s]. Dodatek pyłu cementowego powoduje także zwiększenie lepkości pozornej zaczynu. Największą lepkość pozorną równą 0,1225 [Pa·s] odnotowano dla współczynnika wodno-mieszaninowego równego 0,5 i 20% koncentracji pyłu. Wzrost współczynnika wodno-mieszaninowego badanych zaczynów cementowych powoduje obniżenie zarówno lepkości plastycznej jak i pozornej.

Uogólnienie powyższej analizy wyników upoważnia do podania następujących wniosków o charakterze ogólnym:

- 1) Koncentracja pyłów cementowych z cementowni Rudniki w zaczynach cementowych oddziałuje na parametry świeżych zaczynów i powoduje:
 - wzrost lepkości plastycznej,
 - wzrost lepkości pozornej,
 - pogorszenie parametrów reologicznych,
 - wzrost lepkości względnej,
 - obniżenie rozlewności.
- 2) Wzrost wartości współczynnika wodno-mieszaninowego powoduje:
 - zmniejszenie gęstości zaczynu,
 - zmniejszenie lepkości plastycznej,
 - zmniejszenie lepkości pozornej,
 - zwiększenie rozlewności,
 - obniżenie lepkości względnej.
- 3) Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można stwierdzić, że znaczny dodatek pyłów cementowych z cementowni Rudniki wpływa na zmianę modelu oraz na parametry reologiczne badanych zaczynów cementowych sporządzonych na osnowie cementu CEM I 42,5R, w związku z czym jego aplikacje mogą dotyczyć jedynie likwidacji stref chłonnych górotworu w otworach wiertniczych oraz uszczelniania ośrodka gruntowego o dużej wodochłonności.

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] Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J.: *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Górażdże Cement, Opole 2002

- [3] Kurdowski W.: *Chemia Materiałów budowlanych*. Uczelniane wydawnictwa naukowo-dydaktyczne, Kraków 2003
- [4] Neville A.M.: *Właściwości betonu*. Polski Cement, Kraków 2000
- [5] Sadło M.: *Wpływ koncentracji pyłów cementowych z cementowni Rudniki na właściwości reologiczne zaczynów uszczelniających sporządzanych na osnowie cementu CEM I – 42,5R*. WWiNiG AGH, Kraków 2008 (praca niepublikowana)
- [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, 2001 R, 18/1, Kraków 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