

**Stanisław Stryczek*, Rafał Wiśniowski*, Andrzej Gonet*,
Łukasz Połowniak***

**WPLYW WYBRANYCH SUPERPLASTYFIKATORÓW
NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE
ZACZYŃNÓW USZCZELNIAJĄCYCH
SPORZĄDZANYCH NA OSNOWIE CEMENTU HUTNICZEGO****

1. WSTĘP

Zabieg cementowania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych jest procesem bardzo istotnym i zasadniczym pod względem przyszłego udostępnienia danego złoża do eksploatacji i efektywnego oraz pozbawionego komplikacji wykorzystania go w celu wydobycia płynu złożowego na powierzchnię. Efektywne uszczelnienie przestrzeni między kolumną rur okładzinowych a odwierconym odcinkiem otworu jest bardzo istotnym warunkiem bezproblemowej eksploatacji odwiertu.

Cały zabieg cementowania oraz odpowiednia receptura zaczynu uszczelniającego posiada kluczowy wpływ na jakość oraz skuteczność uszczelnienia kolumny rur okładzinowych. Dobór stosownych dodatków oraz domieszek do sporządzenia zaczynu oraz ich odpowiednich proporcji zależy jest od indywidualnych wymagań i warunków panujących w otworze przeznaczonym do zabiegu cementowania [7, 8, 9].

Przy wyborze technologii cementowania kolumny rur okładzinowych, zależnie od warunków geologiczno-złożowych i technicznych, niesłychanie ważną rolę odgrywają parametry fizyczne i chemiczne spoiw hydraulicznych oraz ich jakość, a także właściwości fizyko-chemiczne zarówno świeżego jak i stwardniałego cementu. Istotny wpływ ma również prawidłowe rozwiązanie problemów projektowych, technologicznych i wykonawczych zabiegu. Zaczyny uszczelniające powinny odznaczać się odpowiednimi właściwościami, aby w najwyższym stopniu spełniały swoje zadanie w odwiercie. Zaczyny powinny wykazywać

* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

** Praca została wykonana w ramach finansowania z projektu badawczego własnego nr rejestracyjny N N524 369637 (Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego)

ściśle określony czas wiązania, powinny mieć dobrą przetłaczalność przez cały okres trwania zabiegu cementacyjnego. Ich właściwości reologiczne oraz technologiczne powinny odznaczać się minimalną zmiennością pod wpływem dużych zmian temperatur oraz ciśnienia, jakie panują w warunkach otworowych na znacznych głębokościach. Stwardniały kamień cementowy nie może ulegać wszelkiego rodzaju korozjom. Musi wykazywać brak przepuszczalności, duże właściwości przyczepne do przewierconych skał i rur okładzinowych oraz powinien posiadać niezmiennie w czasie parametry wytrzymałościowe przez cały okres eksploatacji złoża z danego odwiertu.

Głównymi zadaniami parametrów reologicznych świeżego zaczynu uszczelniającego, modyfikowanego różnego rodzaju domieszkami, jest zapewnienie skutecznego wytlóczenia płuczki wiertniczej [7, 8, 9, 10, 11].

2. DOMIESZKI REGULUJĄCE WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ZACZYNU USZCZELNIAJĄCEGO

Według PN-EN 934-2: 2002 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 2: Domieszki do betonu. Definicje, wymagania, zgodność, znakowanie i etykietowanie” domieszką nazywa się materiał dodawany podczas wykonywania zaczynu uszczelniającego w ilości nie większej niż 5% masy suchego cementu. Domieszki wprowadza się w celu zmodyfikowania właściwości świeżego i stwardniałego zaczynu.

Biorąc za kryterium sposób oddziaływania, wyróżnia się domieszki [1, 2, 5]:

- modyfikujące właściwości reologiczne oraz wiązanie i twardość związanego zaczynu;
- ekspansywne;
- zwiększające odporność stwardniałego zaczynu na działanie czynników fizycznych i chemicznych;
- zwiększające przyczepność zaczynu.

Na szczególną uwagę ze względu na skuteczność uszczelniania kolumn rur okładzinowych w otworach wiertniczych zasługują domieszki uplastyczniające (plastyfikatory PL) i upłynniające (superplastyfikatory SP tradycyjne i nowej generacji) wpływające na cechy reologiczne świeżych zaczynów uszczelniających.

Przyjęty w normie PN-EN934-2 podział domieszek redukuje ilość wody wyróżnia grupę uplastyczniających (A) oraz grupę upłynniających (B) [3, 4, 8].

Grupa domieszek uplastyczniających (PL) była już stosowana w latach 30. i obejmuje niżej wymienione domieszki.

- **Sole kwasów lignosulfonowych** (lignosulfoniany wapniowe, potasowe, sodowe) np. Klutan A, Kluta P, Addiment BV1, Addiment BV3. Związki lignosulfonowe powstają jako produkt uboczny przy produkcji celulozy z drewna metodą siarczynową. Problemem tych domieszek są cukry znajdujące się w wywarze posiarczynowym, w ilości do 30% w przeliczeniu na substancje stałe, podczas, gdy domieszka tego typu nie powin-

na zawierać więcej niż 12% cukrów. Wywar przeznaczony do produkcji domieszki zostaje, więc poddany odcukrzeniu. Lignosulfoniany wprowadzają zwykle małe ilości powietrza (2–3%) i wykazują także działanie opóźniające. Opóźnienie wiązania wzrasta znacznie, gdy dodatek plastyfikatora jest zbyt duży. Opóźniający wpływ na początek wiązania zachodzi w sytuacji, gdy nie zmniejszamy ilości wody zarobowej. Natomiast, gdy redukujemy ilość wody mając na celu podniesienie wytrzymałości – proces wiązania ulega przyspieszeniu (np. w przypadku Klutenu P. o około godzinę).

- **Kwas hydroksykarboksylowy** (Ca, Na, trietanolaminy) np. kwas glikonowy. Związki z tej grupy nie wykazują działania napowietrzającego, także opóźniają wiązanie. Do domieszek grupy A i B wprowadza się dodatki modyfikujące ich działanie, a mianowicie zwiększające wpływ napowietrzający lub przyspieszający wiązanie.
- **Polimery hydroksylowe** (np. ze skrobi).
- **Związki karbominowe.**
- **Nonylofenyle oksyetylowe.**

Skuteczność ich działania ocenia się na podstawie redukcji wody na poziomie $5 \pm 15\%$.

Do grupy upłynniaczy (SP) można zaliczyć niżej wymienione domieszki.

- **Sulfonowane kondensaty melaminowo-formaldehadowe (SMF)** np. Addiment FMF i FM1, Sikament FF. Są to syntetycznie wyprodukowane polimery z żywicy melaminowej. Osiągają pełną skuteczność dopiero przy wyższym dozowaniu. Nie zauważa się ubocznych działań typu napowietrzającego, czy opóźniającego.
- **Sulfonowane kondensaty naftalenowo-formaldehadowe (SNF)** np. Addiment FM9, Sikament NN, Betoplast 1, Betoplast 6. Sulfonaty naftalenowe są to, podobnie jak żywice melaminowe, polimery wyprodukowane syntetycznie z naftalenu (produkt przeróbki węgla i ropy naftowej). Związki te już w niewielkich ilościach działają plastyfikująco na zaczyn. Naftaleny działają skutecznie przy wysokiej zawartości środków wiążących, przy zastosowaniu drobnego wypełniacza. Superplastyfikatory na bazie naftalenu są efektywniejsze w dyspergowaniu cementu i mają pewne właściwości opóźniające. Upłynniacze naftalenowe SNF okazują się także skuteczniejsze w oddziaływaniu na właściwości reologiczne zaczynu cementowego (granicę płynięcia i lepkość pozorną) w stosunku do upłynniaczy melaminowych SMF. Różnica ta jest tym większa, im bardziej jest opóźnione dozowanie superplastyfikatora.
- **Mieszanki sulfonatów melaminowo-naftalenowych** np. Addiment FM6. Ponieważ dla uzyskania zaczynu oraz betonu ciekłego dozowanie preparatów melaminowych jest stosunkowo wysokie, kombinacja melaminowo-naftalenowa daje ten sam efekt przy o połowę niższym dozowaniu. Efekt działania superplastyfikatora zanika w czasie najszybciej dla preparatów melaminowych (ok. 20 min), najwolniej dla preparatów naftalenowych (ok. 60 min). Mieszanki tych dwóch związków dają efekt dokładnie wypośredkowany.
- **Modyfikowane lignosulfoniany wapniowe lub sodowe.**
- **Estry kwasu sulfonowego i węglowodorów.**

- **Inne produkty** – polimery o niezbadanych szerzej właściwościach, których charakterystykę podają tylko wytwórcy, np. kopolimery kwasu mrówkowego z kwasem naftaleno-sulfonowym lub z kwasem metylnaftaleno-sulfonowym, kopolimery kwasu metakrylowego z solą sodową lub z glikolem polietylenowym, wielkopierścieniowe sulfoniany, kwasy, sulfonowane polistyreny i inne.

Skuteczność ich działania ocenianą na podstawie redukcji wody określa się na poziomie 10÷25%.

W latach 90. ubiegłego wieku wprowadzone zostały szczególnie efektywne domieszki tzw. III-ciej generacji (KAE) na bazie:

- **polikarboksylianów (akrylany);**
- **eteru karboksylowego.**

Efektywność redukcji wody w zaczynie przez tę grupę upłynniaczy (zwaną super superplastyfikatorami) określa się na poziomie 20÷40%.

Koncentracje dozowania domieszek plastyfikujących zmieniają się zwykle w granicach 0,2 do 0,5% w stosunku do masy cementu.

3. BADANIA LABORATORYJNE

Badania laboratoryjne parametrów reologicznych zaczynów uszczelniających przeprowadzono w oparciu o następujące normy:

1. PN-EN 197-1: 2002, Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
2. 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 udowodnienie następującej tezy: odpowiednio dobrany rodzaj oraz koncentracja superplastyfikatorów [firmy BASF Polska Sp. z o.o. (The Chemical Company) – Dział Domieszek do Betonu], wpływa korzystnie na parametry reologiczne zaczynu uszczelniającego sporządzanego na osnowie cementu hutniczego CEM III /A 32,5 R [6, 8, 12].

W przeprowadzanych badaniach zmiennymi były:

- a) współczynnik w/c;
- b) koncentracja superplastyfikatorów;
- c) rodzaj superplastyfikatora.

Współczynnik wodno-cementowy dla badanych zaczynów uszczelniających wynosił: 0,35; 0,4.

Podstawowym superplastyfikatorem w badaniach laboratoryjnych była domieszka w postaci nowego eteru polikarboksylianowego o nazwie handlowej Glenium 115 firmy BASF.

Koncentracja tego superplastyfikatora w zaczynie wynosiła: 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0; 1,2 [%].

W następnej kolejności określano wpływ stałej koncentracji (0,5%) innych superplastyfikatorów opartych na eterach polikarboksyłanowych, na właściwości reologiczne zaczynu cementowego o współczynniku w/c = 0,4. Wykorzystano do badań następujące superplastyfikatory firmy BASF [6, 12]:

- SKY 591;
- SKY 501;
- SKY 503;
- Glenium 430.

Badania laboratoryjne związane z określeniem parametrów reologicznych świeżych zaczynów uszczelniających obejmują pomiary [9, 10, 11]:

- właściwości reologicznych (lepkość plastyczna, lepkość pozorną, granica płynięcia) – za pomocą lepkościomierza obrotowego o współosiowych cylindrach typu Chan – 35 API Viscometer – Tulsa, 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 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 s⁻¹);
- określenie modelu reologicznego – 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 wyznaczano parametry reologiczne dla poszczególnych modeli. Następnie za pomocą przeprowadzonych testów statystycznych, określono optymalny model reologiczny dla danej receptury zaczynu uszczelniającego.

Analizie poddano następujące modele reologiczne:

- model Newtona
$$\tau = \eta \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right),$$
- model Binghama
$$\tau = \tau_y + \eta \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right),$$
- model Ostwalda–de Waele
$$\tau = k \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n,$$
- model Cassona
$$\tau = \sqrt{\tau_y} + \sqrt{\eta} \cdot \sqrt{\left(-\frac{dv}{dr} \right)},$$
- model Herschella–Bulkleya
$$\tau = \tau_y + k \cdot \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n,$$

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 Binghama, lepkość plastyczna Cassona dla modelu Cassona [$\text{Pa}\cdot\text{s}$],

dv/dr – gradient prędkości ścinania – $\dot{\gamma}$ [s^{-1}].

W celu ułatwienia obliczeń związanych z ustaleniem optymalnych modeli reologicznych dla badanych zaczynów, skorzystano z programu komputerowego „Rheo Solution”. Program ten jest własnością Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH i jest wykorzystywany w pracach naukowo-badawczych [9, 10, 11].

4. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH

Tabela 1 przedstawia parametry reologiczne zaczynu cementowego sporządzonego na podstawie cementu hutniczego CEM III 32,5 R o współczynniku $w/c = 0,35$.

Na podstawie danych liczbowych zawartych w tabeli 1 można zauważyć, że już przy małej ilości superplastyfikatora (0,2%) wprowadzonego do zaczynu uszczelniającego parametry reologiczne zaczynu ulegają gwałtownemu spadkowi. Również wraz ze zwiększaniem koncentracji superplastyfikatora parametry reologiczne zaczynu stopniowo maleją. Wyjątek stanowi wykładnik potęgowy dla współczynnika konsystencji, który stopniowo wzrasta. Granica płynięcia wykazuje gwałtowny spadek przy zmianie koncentracji superplastyfikatora z 0,3% na 0,4% (wg modelu Binghama, Cassona i Herschella–Bulkleya) – nawet kilkukrotny, a także z 0,5% na 0,6% (wg modelu Binghama i Cassona). Wtedy też spadkowi ulega współczynnik konsystencji (wg modelu Binghama i Herschella–Bulkleya). Lepkości ulegają nieznacznemu spadkowi.

Modelem reologicznym optymalnie opisującym parametry reologiczne tych zaczynów jest model Herschella–Bulkleya. Posiada on najwyższe współczynniki korelacji ze wszystkich modeli. Bardzo wysokie współczynniki korelacji posiadają również modele Binghama i Cassona.

Tabela 2 przedstawia parametry reologiczne zaczynu cementowego sporządzonego na podstawie cementu hutniczego CEM III 32,5R o współczynniku $w/c = 0,40$.

Na podstawie wyników zawartych w tabeli 13 możemy wysnuć podobne wnioski jak poprzednio. W tym przypadku granica płynięcia wykazuje gwałtowny spadek przy zmianie koncentracji superplastyfikatora z 0,6% na 0,7% (wg modelu Binghama, Cassona i Herschella–Bulkleya). Również wtedy spadkowi ulega współczynnik konsystencji. Parametry reologiczne zaczynu o $w/c = 0,40$ są odpowiednio niższe w porównaniu z zaczynem o $w/c = 0,35$. Dla koncentracji Glenium115 równej 1,2% wartość lepkości pozornej przy 600 [obr/min] wynosi 0,1190 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

Tabela 1

Parametry reologiczne zacyznu uszczelniającego ($w/c = 0,35$) określone dla różnych modeli reologicznych płynów w temperaturze 20 °C przy różnych koncentracjach superplastyfikatora

Koncentracja superplastyfikatora		0,2%	0,3%	0,4%	0,5%	0,6%	0,7%	0,8%	1,0%	1,2%
Parametry reologiczne		czysty zacyzn								
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	2,2998	0,7805	0,5476	0,4181	0,3266	0,3120	0,2811	0,2706	0,2515
	Współczynnik korelacji [-]	0,7597	0,9549	0,9885	0,9960	0,9973	0,9965	0,9961	0,9939	0,9948
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	1,5733	0,6591	0,5002	0,3978	0,3288	0,3203	0,2899	0,2818	0,2614
	Granica płynięcia [Pa]	24,9221	13,4135	5,2316	4,4012	-0,4867	-1,8016	-1,9118	-3,7894	-3,3362
	Współczynnik korelacji [-]	0,9954	0,9984	0,9998	0,9998	0,9973	0,9975	0,9975	0,9963	0,9969
Model Ostwald-de Waele	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	18,0085	7,0515	2,8921	2,3046	0,8849	0,3551	0,2381	0,1251	0,1271
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4135	0,5121	0,6246	0,6476	0,7633	0,9350	0,9990	1,0936	1,0782
Model Cassona	Współczynnik korelacji [-]	0,9776	0,9701	0,9701	0,9495	0,9271	0,9622	0,9783	0,9721	0,9714
	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,7857	0,4299	0,3768	0,3199	0,2872	0,3117	0,2881	0,2931	0,2714
	Granica płynięcia [Pa]	14,1696	6,0118	1,7704	1,3264	0,1080	0,0284	0,0692	0,3982	0,3310
Model Herschella-Bulkleya	Współczynnik korelacji [-]	0,9969	0,9994	0,9991	0,9987	0,9936	0,9941	0,9877	0,9528	0,9581
	Granica płynięcia [Pa]	19,8834	10,3013	4,5136	3,9086	2,2107	0,6574	0,3829	0,0401	-0,0779
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	3,4604	1,2738	0,6248	0,4530	0,1121	0,1186	0,1034	0,0632	0,0686
	Wykładnik potęgowy [-]	0,8092	0,8731	0,9570	0,9777	1,1856	1,1712	1,1778	1,2421	1,2167
	Współczynnik korelacji [-]	0,9977	0,9997	1,0000	0,9999	1,0000	0,9998	1,0000	1,0000	1,0000

Tabela 2

Parametry reologiczne zaczynu uszczelniającego (w/c = 0,4) określone dla różnych modeli reologicznych płynów w temperaturze 20 °C przy różnych koncentracjach superplastyfikatora

Koncentracja superplastyfikatora		0,2%	0,3%	0,4%	0,5%	0,6%	0,7%	0,8%	1,0%	1,2%
Parametry reologiczne		Czysty zaczyn	0,2181	0,1978	0,1805	0,1761	0,1677	0,1587	0,1490	0,1341
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,3018	0,1978	0,1805	0,1761	0,1677	0,1587	0,1490	0,1341	0,1156
	Współczynnik korelacji [-]	0,7817	0,9464	0,9794	0,9889	0,9916	0,9998	0,9983	0,9980	0,9978
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1190
Model Binghama	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,2237	0,1861	0,1624	0,1634	0,1572	0,1586	0,1514	0,1359	0,1182
	Granica płynięcia [Pa]	26,3430	10,8200	9,9500	6,1245	4,2891	3,5444	0,0513	-0,8105	-1,6937
	Współczynnik korelacji [-]	0,9789	0,9946	0,9928	0,9982	0,9980	0,9983	0,9998	0,9986	0,9982
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Model Ostwalda-de Waele	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	11,9372	4,1029	3,7205	2,3325	1,4301	1,0637	0,3817	0,1983	0,1498
	Wykładnik potęgowy [-]	0,3598	0,4806	0,4809	0,5367	0,6189	0,6665	0,8134	0,9201	0,9516
	Współczynnik korelacji [-]	0,9802	0,9721	0,9753	0,9620	0,9728	0,9816	0,9606	0,9730	0,9771
Model Cassona	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1191	0,1224	0,1120	0,1166	0,1295	0,1295	0,1470	0,1465	0,1355
	Granica płynięcia [Pa]	15,7535	5,1045	4,5973	2,4931	1,3334	0,9503	0,0426	0,0021	0,0108
	Współczynnik korelacji [-]	0,9953	0,9993	0,9993	0,9999	0,9998	0,9997	0,9990	0,9980	0,9962
Model Herschella-Bulkleya	Granica płynięcia [Pa]	13,2274	6,7117	5,1591	4,1191	2,1919	1,7884	0,6181	0,5042	0,2129
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	3,1482	0,7512	0,8996	0,3906	0,4044	0,3522	0,1148	0,0639	0,0752
	Wykładnik potęgowy [-]	0,5814	0,7764	0,7321	0,8589	0,8544	0,8704	1,0522	1,1394	1,0957
	Współczynnik korelacji [-]	0,9985	0,9990	0,9999	0,9999	0,9999	0,9997	1,0000	1,0000	0,9989

Tabela 3

Parametry reologiczne zaczynu uszczelniającego (w/c = 0,4; koncentracja = 0,5%) określone dla różnych modeli reologicznych płynów w temperaturze 20 °C przy różnych rodzajach superplastyfikatorów

Rodzaj superplastyfikatora		SKY591	SKY501	SKY503	Glenium430	Glenium115
Model Newtona	Lepkość dynamiczna Newtona [Pa·s]	0,2022	0,3269	0,2983	0,2057	0,1761
	Współczynnik korelacji [-]	0,9659	0,9194	0,9918	0,9987	0,9889
	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	-	-	-	-	-
Model Bingham	Lepkość plastyczna [Pa·s]	0,1766	0,2704	0,2792	0,2001	0,1634
	Granica płynięcia [Pa]	8,6411	19,0515	6,4480	1,8965	4,2891
	Współczynnik korelacji [-]	0,9976	0,9855	0,9988	0,9999	0,9980
Model Ostwalda-de Waele	Lepkość pozorna przy 600 obr/min [Pa·s]	-	-	-	-	-
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	3,4899	6,5730	2,1555	0,9148	1,4301
	Wykładnik potęgowy [-]	0,4882	0,4781	0,6391	0,7104	0,6189
Model Cassona	Współczynnik korelacji [-]	0,9593	0,9892	0,9734	0,9587	0,9728
	Lepkość Cassona [Pa·s]	0,1181	0,1787	0,2247	0,1731	0,1295
	Granica płynięcia [Pa]	4,0127	8,8351	1,9090	0,4357	1,3334
Model Herschella-Bulkleya	Współczynnik korelacji [-]	0,9997	0,9963	1,0000	0,9995	0,9998
	Granica płynięcia [Pa]	6,1963	6,6248	3,6977	1,4721	2,1919
	Współczynnik konsystencji [Pa·s ⁿ]	0,4638	2,6823	0,5758	0,2381	0,4044
Model Herschella-Bulkleya	Wykładnik potęgowy [-]	0,8449	0,6353	0,8836	0,9719	0,8544
	Współczynnik korelacji [-]	0,9997	0,9999	0,9999	0,9999	0,9999

Modele reologiczne najdokładniej opisujące parametry reologiczne tych zaczynów to model Cassona oraz Herschella–Bulkleya. Posiadają one najwyższe współczynniki korelacji ze wszystkich przedstawionych modeli. Bardzo wysokie współczynniki korelacji posiadają również modele Bingham i Newtona (przy koncentracji superplastyfikatora wyższej niż 0,6%).

W tabeli 3 zestawione są parametry reologiczne zaczynu cementowego o współczynniku $w/c = 0,40$ i koncentracji różnych superplastyfikatorów równej 0,5%. Wykorzystano z całej gamy produkowanych superplastyfikatorów: SKY591, SKY501, SKY503, Glenium430 i Glenium115.

Analizując dane z tabeli 3 można stwierdzić, że:

- najwyższą wartość lepkości dynamicznej Newtona posiada zaczyn z dodatkiem SKY501 – praktycznie dwukrotnie wyższą niż zaczyn z dodatkiem Glenium115;
- najwyższą wartość lepkości plastycznej (wg modelu Bingham) posiada zaczyn z dodatkiem SKY503, a najniższą z Glenium115;
- najwyższą wartość lepkości Cassona posiada zaczyn z dodatkiem SKY503, a najniższą ze SKY591;
- najwyższą wartość granicy płynięcia posiada zaczyn z dodatkiem SKY501 – wg modelu Cassona ponad dwudziestokrotnie wyższą (wg modelu Bingham ponad dziesięciokrotnie) od zaczynu z dodatkiem Glenium430;
- najwyższą wartość współczynnika konsystencji posiada zaczyn z dodatkiem SKY501 – ponad dziesięciokrotnie wyższą od zaczynu z dodatkiem Glenium430, który posiada najwyższy wykładnik potęgowy dla współczynnika konsystencji.

Modelem reologicznym najdokładniej opisującym parametry reologiczne zaczynów z dodatkami SKY591 i SKY503 jest model Cassona, a dla zaczynów z dodatkami SKY503, Glenium430 i Glenium115 model Herschella–Bulkleya. Posiadają one najwyższe współczynniki korelacji ze wszystkich przedstawionych modeli.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analizy danych zawartych w tabelach 1, 2, 3 można wnioskować, że wraz ze wzrostem koncentracji badanych superplastyfikatorów na osnowie eterów polikarboksylianowych (o nazwie handlowej Glenium) w zaczynie uszczelniającym sporządzanym na osnowie cementu hutniczego CEM III/A 32,5R występuje istotne poprawienie właściwości reologicznych w tym szczególnie obniżenie lepkości plastycznej oraz pozornej.

Pod względem reologicznym badane zaczyny opisywane powinny być modelem Herschella-Bulkleya.

Skuteczność badanych superplastyfikatorów nowej generacji jest szczególnie widoczna dla zaczynów o niskich współczynnikach wodno-cementowych, przy koncentracjach ich w zaczynie nieprzekraczających 1% wagowo w stosunku do masy cementu.

LITERATURA

- [1] Czarnecki L., Łukowski P.: *Wpływ dodatków i domieszek polimerowych na trwałość betonu*. Politechnika Warszawska
- [2] Gołaszewski J.: *Superplastyfikatory w kształtowaniu urabialności mieszanek betonowych*. Mat-Bud., Nr 11/2008
- [3] Kon E., Józwiak H.: *Klasyfikacje i wymagania dla domieszek do betonu, zaprawy i zaczynu*. Cem-Wap-Bet., Nr 1/2000
- [4] Kucharska L.: *Tradycyjne i współczesne domieszki do betonu zmniejszające ilość wody zarobowej*. Cem- Wap-Bet., Nr 2/2000
- [5] Kurdowski W.: *Chemia cementu*. PWN, 1991
- [6] Materiały informacyjne firmy BASF, The Chemical Company, BASF Polska Sp. z o.o. Dział Domieszek do Betonu
- [7] Pinka J., Wittenberger G., Engel.: *Dobywanie łóżisk vrtni*. AMS F BERG, TU v Kosciciach, Kosice 2006
- [8] Połowniak Ł.: *Wpływ polikarboksylanów na własności reologiczne zaczynów sporządzonych na osnowie cementu hutniczego*. Praca niepublikowana, WWNiG AGH, Kraków 2009
- [9] Wiśniowski R., Stryczek S., Skrzypaszek K.: *Wyznaczanie oporów laminarnego przepływu zaczynów cementowych, opisywanych modelem Herschella–Bulkeleya*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), t. 23, z. 1, 2006
- [10] Wiśniowski R.: *Metodyka określania modeli reologicznych cieczy wiertniczej*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), t. 18, z. 1, 2001
- [11] Wiśniowski R.: *O oporach przepływu cieczy wiertniczych*. Wiertnictwo Nafta Gaz (rocznik AGH), t. 20, z. 2, 2003
- [12] www.basf-admixtures.pl