

Eco-friendly drilling fluid with the addition of a new amine inhibitor for drilling clay rocks

Ekologiczna płuczka wiertnicza z nowym inhibitorem aminowym do przewiercania skał ilastych



DOI: 10.15199/62.2026.8.2

A novel low-molecular-weight anionic-cationic polymer contg. primary amine groups in the side chains as a clay hydration inhibitor and a potential alternative to conventionally used inhibitors such as KCl and PHPA polymer, was evaluated. Formulations of drilling fluids intended for drilling through clay formations were developed using the investigated inhibitor, and their technol. parameters were subsequently detd. (rheology, linear swelling, resistance to temperature and contamination with monovalent and multivalent ions). The developed drilling fluids exhibited very good technol. properties and may provide an effective alternative to drilling fluids currently used in industrial practice.

Omówiono problemy związane z przewiercaniem skał ilastych, ze szczególnym uwzględnieniem niestabilności ścian otworu wiertniczego wywołanej hydratacją minerałów ilastych. Oceniono przydatność nowego polimeru anionowo-kationowego o niskiej masie cząsteczkowej, zawierającego w łańcuchach bocznych pierwszorzędowe grupy aminowe, jako inhibitora hydratacji skał ilastych i potencjalnej alternatywy dla standardowo stosowanych inhibitorów, takich jak chlorek potasu oraz polimer PHPA. Opracowano receptury płuczek wiertniczych przeznaczonych do przewiercania skał ilastych z udziałem badanego inhibitora, a następnie przeprowadzono ocenę ich parametrów technologicznych (reologia, pęcznienie liniowe, odporność na temperaturę i skażenie jonami jedno- i wielowartościowymi). Opracowane płuczki wiertnicze charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami technologicznymi i mogą stanowić skuteczną alternatywę dla płuczek stosowanych obecnie w praktyce przemysłowej. Ich zastosowanie może przyczynić się zarówno do ograniczenia oddziaływania na środowisko naturalne, jak i do obniżenia kosztów operacyjnych związanych z przewiercaniem skał ilastych oraz utylizacją odpadów płuczkowych.

Keywords: drilling fluid, clay formations, hydration inhibition, amine polymer, eco-friendly inhibiting agents, environmental protection

Słowa kluczowe: płuczka wiertnicza, skały ilaste, inhibicja hydratacji, polimer aminowy, ekologiczne środki inhibicyjne, ochrona środowiska

Współczesny rozwój sektora poszukiwawczo-wydobywczego w coraz większym stopniu koncentruje się na efektywnej eksploatacji złóż węglowodorów występujących w złożonych formacjach geologicznych, wśród których istotną rolę odgrywają skały ilaste. Łupki stanowią ok. 75% wszystkich przewiercanych formacji skalnych, a ich przewiercanie wiąże się z licznymi trudnościami wynikającymi z niestabilności ścian otworu wiertniczego¹⁾.

Głównym wyzwaniem podczas prowadzenia prac wiertniczych w tego typu utworach jest wysoka reaktywność skał ilastych w kontakcie z fazą wodną płuczek wiertniczych, wynikająca z obecności aktywnych minerałów ilastych, takich jak smektyt i montmorylonit²⁾. Interakcja chemiczna pomiędzy wodnodispersyjną płuczką wiertniczą (WBDF, *water-based drilling fluid*) a reaktywnym łupkiem prowadzi do hydratacji. Proces ten przebiega dwuetapowo.



Dr Sławomir WYSOCKI (ORCID: 0000-0002-5251-7285) jest chemikiem-wiertnikiem z 25-letnim doświadczeniem w prowadzeniu projektów badawczych. Jest adiunktem na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie, gdzie pełni funkcję kierownika Laboratorium Fizykochemii Płuczek Wiertniczych. Jego działalność naukowa koncentruje się na badaniach nad nowymi polimerami i ich zastosowaniem w technologiach wiertniczych.



Mgr inż. Robert DRZYMAŁA (ORCID: 0009-0002-5689-4210) w roku 2023 ukończył studia na Wydziale Wiertnictwa Nafty i Gazu AGH w Krakowie, gdzie obecnie jest doktorantem. Specjalność – inżynieria wiertnicza, płyny wiertnicze.

*** Adres do korespondencji:**

Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, AGH w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: +48 607-763-705, e-mail: rdrzymala@agh.edu.pl

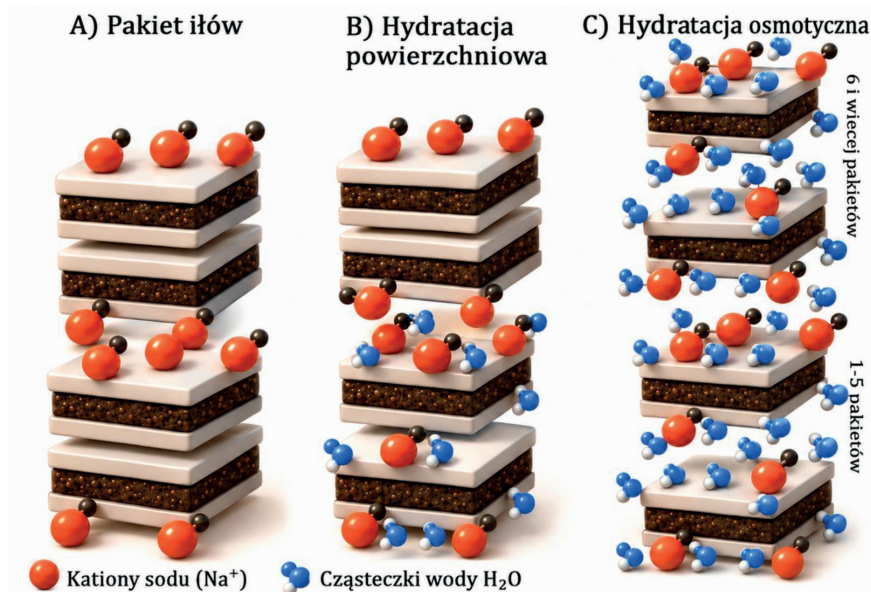


Fig. 1. Hydration of clay minerals

Rys. 1. Hydratacja minerałów ilastych

Pierwszy etap obejmuje hydratację powierzchniową, polegającą na wnikanii cząsteczek wody do skały pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego płuczki. Proces ten zachodzi szybko i ma ograniczony zasięg, obejmując kilka warstewek pakietów iltowych przylegających bezpośrednio do ściany otworu. Drugi etap jest wolniejszy i polega na dyfuzji wody w głąb górotworu na zasadzie osmozy (rys. 1)¹⁻⁴⁾. Hydratacja prowadzi do pęcznienia skały, co powoduje zaciskanie otworu wiertniczego, wzrost oporów podczas wiercenia, zwiększone ryzyko uwięzienia przewodu oraz trudności przy zapuszczaniu rur okładzinowych. W wielu przypadkach ciśnienie pęcznienia przekracza wytrzymałość mechaniczną formacji, prowadząc do jej dezintegracji i dyspersji iltu do płuczki, co powoduje niekontrolowany wzrost parametrów reologicznych oraz pogorszenie właściwości filtracyjnych^{3, 5)}. Dodatkowo hydratacja zwiercin zwiększa ich kleistość, sprzyjając oblepianiu świdra i obniżeniu mechanicznego postępu wiercenia (*bit balling*). W konsekwencji zjawiska te mogą prowadzić do poważnych komplikacji i awarii wiertniczych, bezpośrednio zwiększając koszty operacyjne oraz ryzyko prowadzenia prac. Z tego względu zachowanie stabilności ścian otworu stanowi kluczowy warunek efektywnego wiercenia w skałach ilastych^{4, 6)}.



Prof. dr hab. inż. Rafał WIŚNIEWSKI (ORCID: 0000-0002-9976-6406) jest prorektorem AGH ds. współpracy. Był kierownikiem i wykonawcą ośmiu grantów. Jest autorem ponad 300 artykułów i referatów, 10 monografii, 11 fragmentów książek. Jest również współautorem ponad 100 opracowań i ekspertyz wykonanych dla przemysłu i jednostek administracji państwowej. Specjalność – techniczno-technologiczne problemy wykonywania otworów kierunkowych dla potrzeb górnictwa, inżynierii naftowej, ochrony środowiska, inżynierii środowiska i energetyki.

W celu ograniczenia niekorzystnych zjawisk związanych z hydratacją skał ilastych stosuje się specjalistyczne płuczki wiertnicze przeznaczone do przewiercania takich warstw, w tym płuczki olejowe oraz układy wodnodispersyjne o podwójnym i potrójnym systemie inhibicji hydratacji.

Choć płuczki olejowe (OBM, *oil-based mud*) charakteryzują się bardzo wysoką skutecznością inhibicyjną, są kosztowne i stanowią większe obciążenie dla środowiska, dlatego ich stosowanie jest uzasadnione głównie w otworach, w których temp. przekracza 150°C. W otworach o niższej temperaturze wykorzystuje się odpowiednio dobrane wodnodispersyjne płuczki wiertnicze zawierające inhibitory jonowe, inhibitory polimerowe, układy o podwójnym systemie inhibicji oraz dodatkowe inhibitory, najczęściej gli-

kolowe, stosowane w płuczkach o potrójnym systemie inhibicji^{1, 3)}.

Inhibicja jonowa opiera się przede wszystkim na zastosowaniu jonów potasu, najczęściej pochodzących z chlorku potasu (KCl). Mechanizm działania polega na zastąpieniu jonów sodowych, charakteryzujących się dużą liczbą hydratacyjną, jonami potasu o niskiej energii hydratacji i promieniu dopasowanym do luk w strukturze pakietów krzemianowych, co prowadzi do ich stabilizacji^{4, 7)}. Rozwiązanie to skutecznie ogranicza hydratację i pęcznienie skał ilastych. Inhibicja polimerowa opiera się głównie na zastosowaniu PHPA (częściowo hydrolizowanego poliakrylamidu), który adsorbuje się na powierzchni ścian otworu oraz zwiercin, ograniczając wnikanie cząsteczek wody w głąb skały i zwiercin^{3, 8)}. Trzecią grupę inhibitorów stanowią poliglikole, których działanie polega na zamykaniu porów w skale i ograniczaniu migracji wody w głąb przestrzeni porowej. Ich charakterystyczną cechą jest spadek rozpuszczalności wraz ze wzrostem temperatury, co umożliwia migrację do wnętrza porów i wytrącanie się w warunkach podwyższonej temperatury^{2, 9)}.

Obecnie stosowane w płuczkach wodnodispersyjnych systemy inhibicji wykorzystują przede wszystkim chlorki, w szczególności KCl (chlorek potasu) oraz CaCl₂ (chlorek wapnia), które wykazują silne działanie korozyjne i są niekorzystne z punktu widzenia środowiskowego^{1, 5)}. Wysoka zawartość jonów chlorkowych (Cl⁻) prowadzi do trwałego zasolenia gleb i zanieczyszczenia wód podziemnych, natomiast nadmiar potasu zaburza równowagę kationową, utrudniając rekultywację odpadów. W konsekwencji utylizacja odpadów płuczkowych staje się procesem złożonym i kosztownym¹⁰⁻¹²⁾. Z technicznego punktu widzenia wysoka zawartość chlorków w płuczce przyspiesza korozję elektrochemiczną przewodu wiertniczego, rur okładzinowych

oraz uzbrojenia w głębny skutek powstawania licznych wżerów. Prowadzi to do wzrostu kosztów wiercenia, związanego z koniecznością stosowania inhibitorów korozji oraz ewentualną wymianą uszkodzonego sprzętu^{10, 13–15}. Dlatego, mimo wysokiej skuteczności KCl jako inhibitora hydratacji skał ilastych, dąży się obecnie do ograniczenia jego stosowania w płczkach wiertniczych^{1, 5, 6}.

Równocześnie poszukuje się nowych inhibitorów hydratacji skał ilastych, które mogłyby zastąpić chlorek potasu. Obiecującą grupę stanowią inhibitory aminowe, ponieważ jon amonowy wykazuje właściwości zbliżone do jonu potasowego (rys. 2). Montmorylonit należy do minerałów ilastych o najwyższej zdolności pęcznienia, a tym samym do najtrudniejszych w przewiercaniu. Odległości międzypakietowe w montmorylonicie w obecności jonów potasowych oraz amonowych są porównywalne i wyraźnie mniejsze niż w przypadku jonów sodowych. Oznacza to, że jony amonowe są skutecznymi inhibitorami hydratacji. Istotnym ograniczeniem ich praktycznego zastosowania pozostaje jednak niestabilność w warunkach otworowych, wynikająca z alkalicznego odczynu płczki wiertniczej (pH 9,0–10,5). W takich warunkach zachodzi reakcja deprotonacji: $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$. W efekcie jon amonowy przekształca się w amoniak, który nie wykazuje właściwości inhibicyjnych wobec hydratacji skał ilastych^{16–18}. Odpowiedzią na przedstawione wyzwania może być nowo zsyntetyzowany inhibitor aminowy Venom 2.0 SU. Jest to polimer anionowo-kationowy o niskiej masie cząsteczkowej, zawierający w grupach bocznych pierwszorzędowe grupy aminowe. Taka architektura cząsteczki sprzyja wielopunktowej adsorpcji na powierzchni iłu oraz wykazuje działanie kapsułkujące, zbliżone do efektu uzyskiwanego przy zastosowaniu polimeru PHPA. Mechanizm ten może

sprzyjać tworzeniu bariery sterycznej skutecznie ograniczającej dyfuzję filtratu w głąb struktury ilastej^{5, 6, 16, 19}. Jednocześnie zachowana zostaje stabilność grup aminowych, dzięki czemu reakcja deprotonacji nie zachodzi. W efekcie Venom 2.0 SU może wykazywać jednocześnie cechy inhibitora polimerowego i jonowego, co zwiększa jego potencjalną skuteczność w ograniczaniu hydratacji skały. Istotną właściwością tego polimeru jest także zdolność do zapewnienia stabilności płczki przez 10–14 dni, po czym ulega on biodegradacji. Umożliwia to prowadzenie skutecznych prac wiertniczych bez stosowania biocydów, co dodatkowo zwiększa przyjazność płczki dla środowiska.

Podjęto szczegółowe badania mające na celu ocenę możliwości zastosowania polimeru Venom 2.0 SU jako inhibitora hydratacji stanowiącego alternatywę dla chlorku potasu.

Część doświadczalna

Materiały

W badaniach wykorzystano surowce płczkowe stosowane w technologii płczek wiertniczych oraz nowo zsyntezowane polimery. Do sporządzenia płczek wykorzystano techniczny chlorek potasu KCl (Avantor Performance Materials Poland SA), jako inhibitor hydratacji skał ilastych; Base XP-46 (Polymer Technologies), techniczny, jako środek strukturotwórczy; węglan sodu (Avantor Performance Materials Poland SA), techniczny, jako regulator pH; Venom 2.0 SU (Polymer Technologies), techniczny, jako anionowo-kationowy inhibitor hydratacji skał ilastych; Mikhart 65 (BDC Poland), techniczny – jako blokator węglanowy stosowano do skażenia płczki fazą stałą. Do badań pęcznienia liniowego wykorzystano łożysko popielaty pozyskany z Niżu Polskiego.

Metodyka badań

Badania laboratoryjne przeprowadzono zgodnie z normami^{20, 21} oraz metodykami własnymi. Program badawczy obejmował oznaczenie gęstości, parametrów reologicznych, filtracji API, zawartości jonów potasu oraz ocenę liniowego pęcznienia skał ilastych. Płczki do badań sporządzano w naczyniu o pojemności 1500 mL, do którego wprowadzano 1000 mL wody wodociągowej, a następnie kolejno dodawano odważone ilości poszczególnych składników zgodnie z recepturą przedstawioną w tabeli 1. Po każdorazowym dodaniu składnika układ mieszano przez co najmniej 10 min za pomocą mieszadła mechanicznego z prędkością 3500 rpm. Gęstość płczek oznaczano za pomocą wagi płczkowej typu Baroid w temperaturze otoczenia, zgodnie z procedurą normową. Parametry reologiczne wyznaczano za pomocą lepkościomierza obrotowego Grace Instruments M3500 w układzie współosiowych cylindrów, wyposażonego w przystawkę temperaturową i sterowanego komputerowo (rys. 3a). Badania prowadzono zgodnie z procedurami obowiązującymi w Laboratorium

Próbka	Kationy międzypakietowe									
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Ba ²⁺	H ⁺	Li ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Rb ⁺	Cs ⁺
Powierzchnia sucha	14,8	16,1	12,9	14,5	13,4	11,9	12,0	12,1	12,3	12,9
Powierzchnia wilgotna	20,7	17,9	18,5	19,3	23	24	13,2	13,2	12,3	b.d.

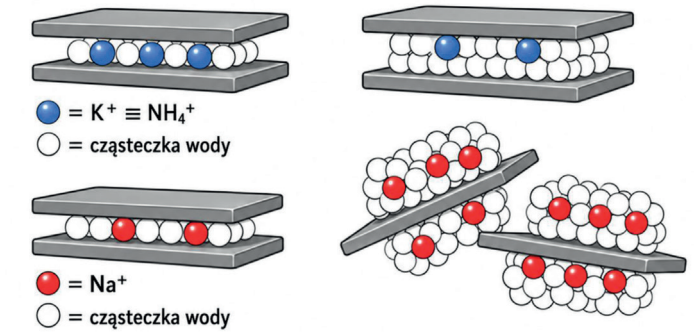


Fig. 2. d_{001} Plane spacing values in montmorillonite for different interlayer cations
Rys. 2. Wartości odstępów płaszczyzn d_{001} w montmorylonicie dla różnych kationów międzypakietowych

Table 1. Composition of the drilling fluid modified with Venom 2.0 SU amine and the potassium chloride-based fluid used as an inhibitor

Tabela 1. Skład płuczki modyfikowanej aminą Venom 2.0 SU i płuczki z chlorkiem potasu jako inhibitorem

Surowiec płuczkowy	Mud 2-V	Mud 2-K
Woda, mL	1000	1000
Mikhart 65, g/L	10	10
Base XP-46, g/L	7,5/10/12,5	7,5/10/12,5
Venom 2.0 SU, g/L	2,5	
Chlorek potasu, g/L		51,5
Węglan sodu	do pH ok. 9,5	

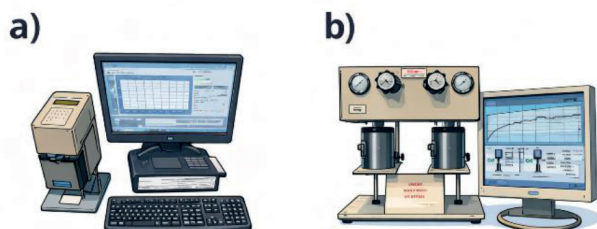


Fig. 3. Testing equipment used to evaluate the technological and rheological properties of the tested slurries: (a) Grace M3500 viscometer, (b) Grace M4600 HPHT Linear Swell Meter

Rys. 3. Aparatura badawcza wykorzystana do oceny właściwości technologicznych i reologicznych badanych płuczek: a) lepkościomierz Grace M3500, b) Grace M4600 HPHT Linear Swell Meter

Fizykochemii Płynów Wiertniczych Katedry Wiertnictwa i Geoinżynierii. Zawartość jonów potasu oznaczano refleksyjnie z wykorzystaniem urządzenia RQflex 20 oraz pasków testowych Reflectoquant, zgodnie z instrukcją producenta. Filtrację oznaczano za pomocą prasy filtracyjnej API w warunkach statycznych, przy ciśnieniu 0,35 MPa i w temperaturze otoczenia. Liniowe pęcznienie skał ilastych mierzono za pomocą aparatu M4600 HPHT Linear Swell Meter (rys. 3b), zgodnie z procedurami obowiązującymi w laboratorium. Pastylki do badań pęcznienia, przygotowywano, zgniatając przez 60 min sproszkowaną skałę ilastą (iłołupek popielaty) pod ciśnieniem.

Wyniki badań

W pierwszym etapie badań opracowano recepturę wodnodispersyjnej płuczki wiertniczej stanowiącej bazę do dalszych modyfikacji i testów laboratoryjnych. W tym

celu sporządzono płuczki wiertnicze o stężeniu środka strukturotwórczego Base XP-46 w zakresie 2,5–20 g/L, a następnie przeprowadzono badania parametrów technologicznych. Na podstawie wyników uzyskanych w badaniach wstępnych, do kolejnych badań wytypowano 3 płuczki różniące się stężeniem polimeru strukturotwórczego Base XP-46 (Mud 1 – 7,5 g/L; Mud 2 – 10 g/L; Mud 3 – 12,5 g/L).

Analiza właściwości technologicznych wytypowanych płuczek wykazała, że systemy te charakteryzują się korzystnym profilem technologicznym: relatywnie niską lepkością plastyczną (PV) przy jednoczesnym zachowaniu wysokich wartości granicy płynięcia (YP) (rys. 4). Taka zależność parametrów jest pożądana w praktyce wiertniczej, ponieważ zapewnia dużą zdolność płuczki do wynoszenia zwiercin z otworu przy jednoczesnej minimalizacji oporów przepływu w przewodzie wiertniczym. Uzyskana wartość filtracji API (poniżej 7 mL/30 min) stanowi przesłankę wskazującą na wysoki potencjał aplikacyjny płuczki w zakresie kontroli filtracji.

W drugim etapie oceniono wpływ dodatku polimeru Venom 2.0 SU na parametry technologiczne wytypowanych płuczek bazowych. W tym celu sporządzono płuczki bazowe Mud 1–3, a następnie wprowadzono do nich polimer Venom 2.0 SU w stężeniu 2,5 g/L. Przeprowadzono badania parametrów technologicznych sporządzonych płuczek. Wyniki badań przedstawiono na przykładzie płuczki Mud 2, oznaczonej po modyfikacji polimerem jako Mud 2-V. Z wykorzystaniem oprogramowania RheoSolution 3.2 opracowano krzywe płynięcia dla płuczki bazowej oraz płuczki z dodatkiem polimeru Venom 2.0 SU. Uzyskane wyniki wskazują, że dodatek Venom 2.0 SU nie wpływał istotnie

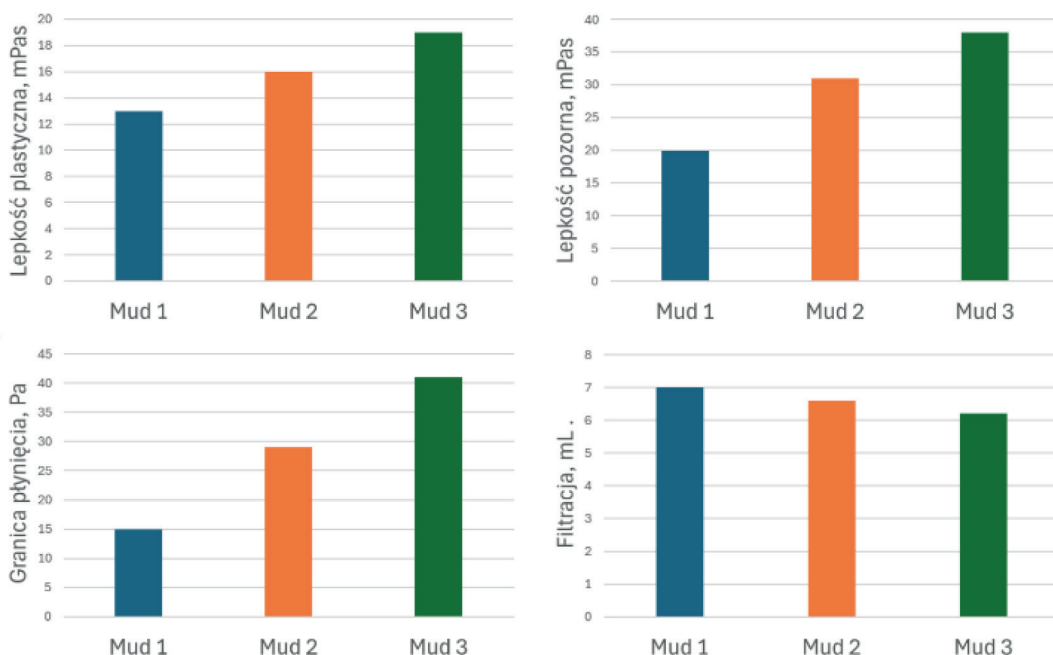


Fig. 4. Results of technological tests on example of Mud 1-3

Rys. 4. Wyniki badań technologicznych na przykładzie płuczek bazowych Mud 1-3

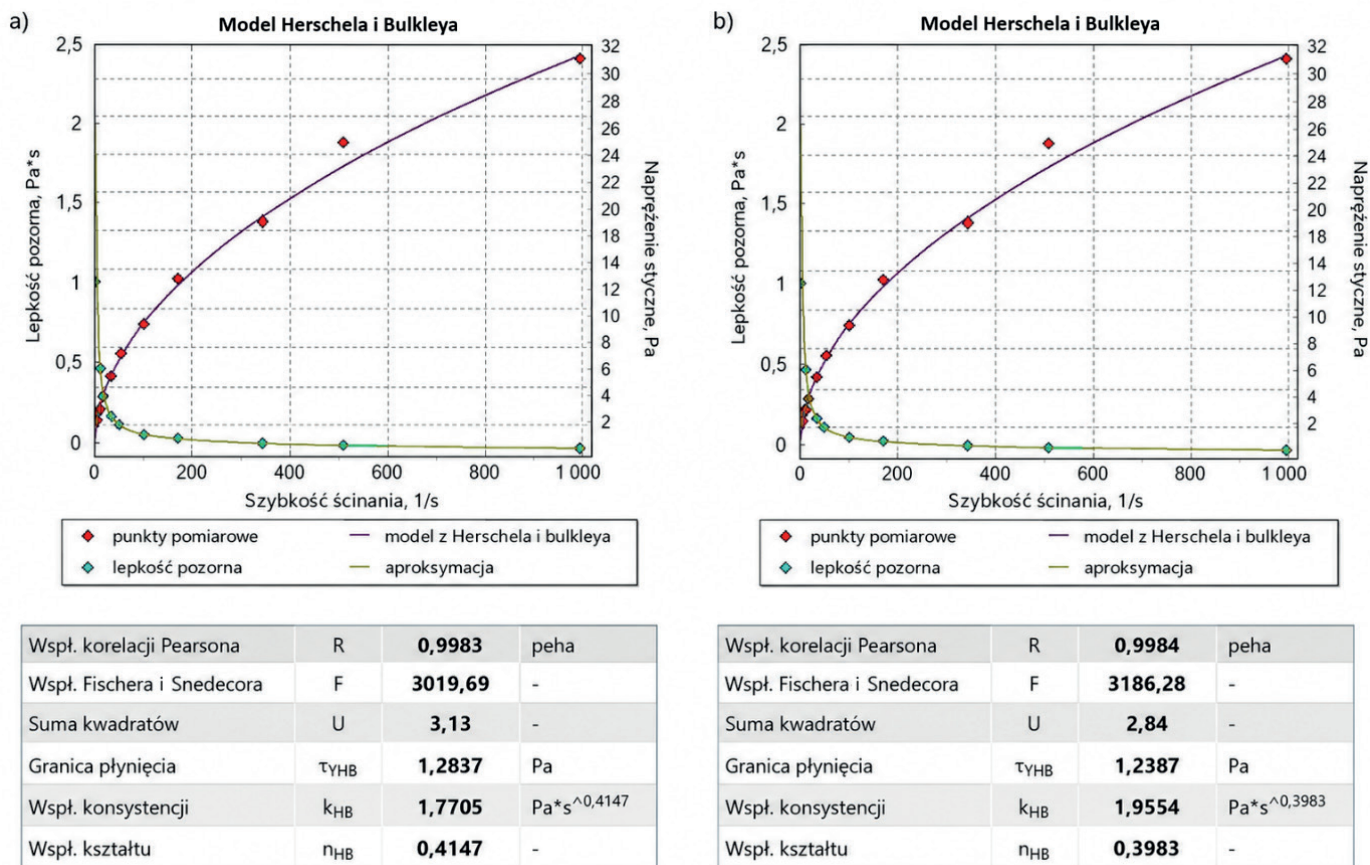


Fig. 5. Flow curves of the examined fluids: a) Mud 2, Base-mud and b) Mud 2-V, mud with the addition of the polymer Venom 2.0 SU

Rys. 5. Krzywe płynięcia badanych płuczek: a) Mud 2, płuczka bazowa oraz b) Mud 2-V, płuczka z dodatkiem polimeru Venom 2.0 SU

na parametry technologiczne płuczki bazowej (rys. 5).

Ze względu na projektowane zastosowanie opracowanej płuczki na pełnej głębokości otworu wiertniczego poddano ją testom stabilności w podwyższonej temperaturze. W tym celu sporządzoną płuczkę podgrzewano w kubku termicznym dołączonym do wiskozymetru. Badania parametrów reologicznych prowadzono w temp. 20–90°C. Wyniki badań wskazują na wysoką stabilność temperaturową układów zawierających polimer Venom 2.0 SU. Po przekroczeniu temp. 70°C obserwowano jedynie niewielki, akceptowalny spadek parametrów reologicznych płuczki (rys. 6). W celu oceny odporności płuczki na zanieczyszczenie fazą stałą do płuczki Mud 2-V wprowadzono blokator węglanowy Mikhart65 w ilości 100 g/L.

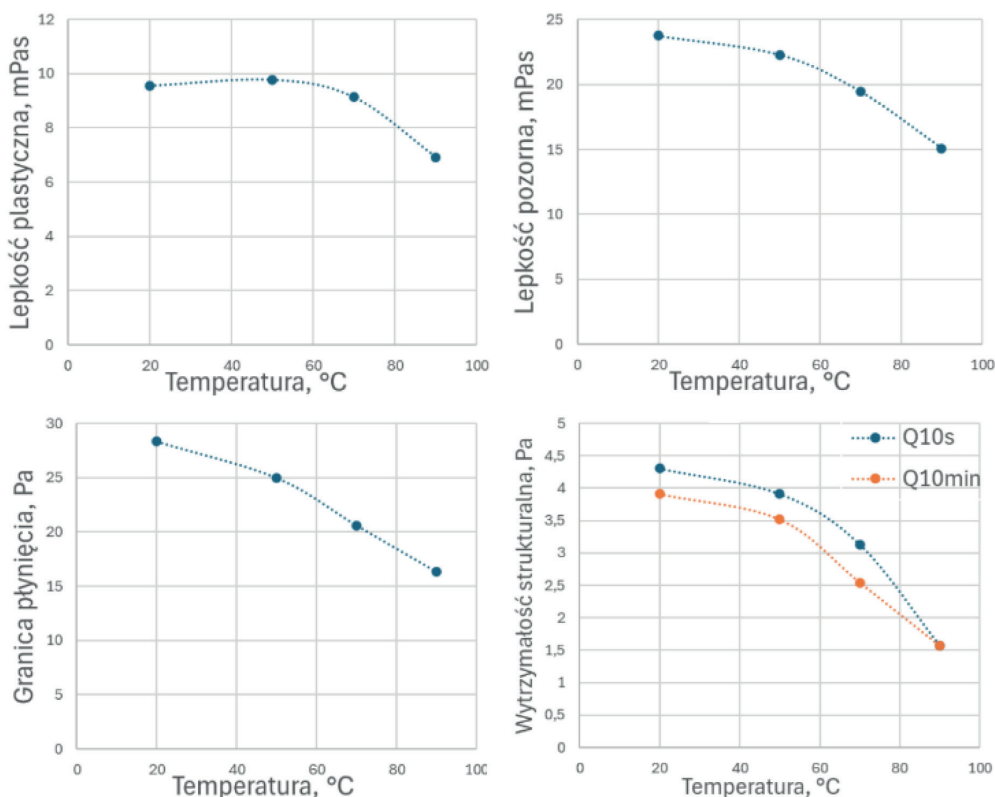


Fig. 6. Temperature resistance tests of Mud 2-V

Rys. 6. Badania odporności temperaturowej płuczki Mud 2-V

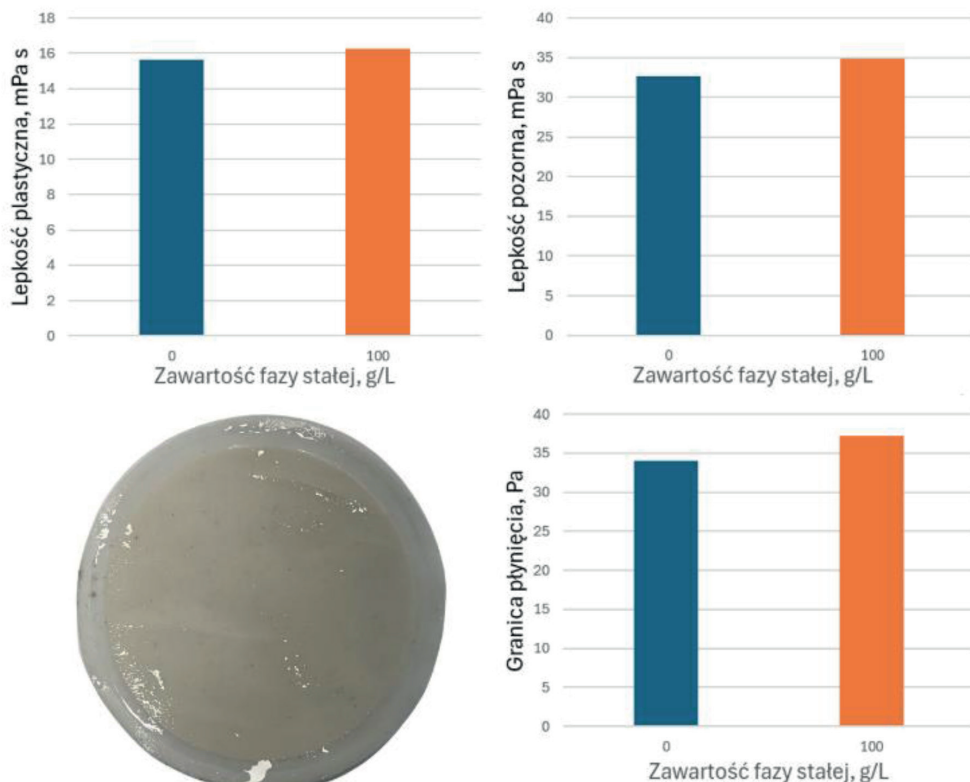


Fig. 7. Research on the resistance of Mud 2-V to contamination by the solid phase

Rys. 7. Badania odporności płuczki Mud 2-V na skażenie fazą stałą

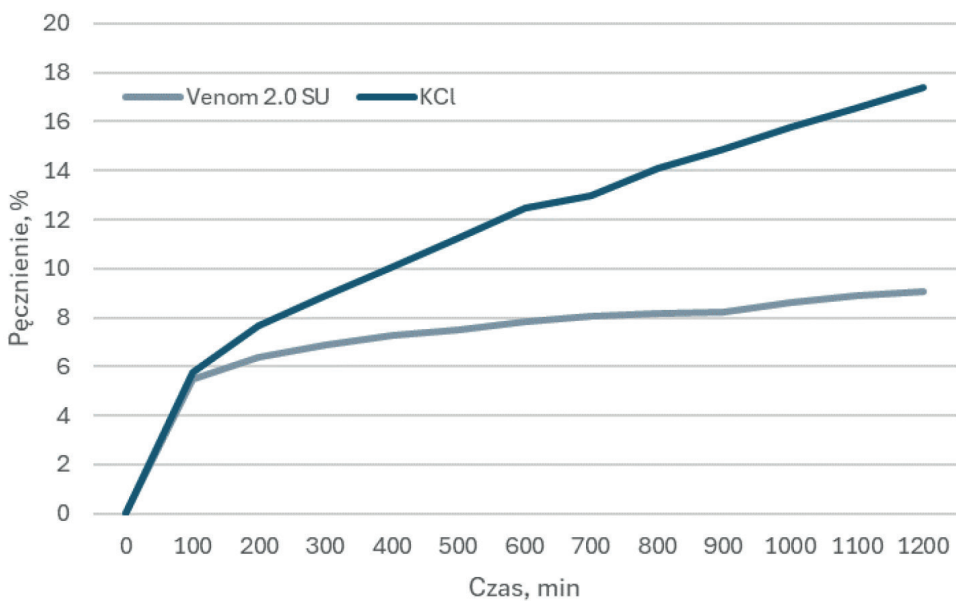


Fig. 8. Results of the clay rock swelling test using the linear method (Linear Swell Tester): for Mud 2-K, the chloride-based drilling fluid and for Mud 2-V, the drilling fluid with the addition of Venom 2.0 SU polymer

Rys. 8. Wyniki badania pęcznienia skał ilastych metodą liniową (Linear Swell Tester): dla Mud 2-K, płuczki chlorkowej oraz dla Mud 2-V, płuczki z dodatkiem polimeru Venom 2.0 SU

Stwierdzono, że dodatek ten nie wpływa negatywnie na reologię płynu, a jednocześnie poprawia właściwości uszczelniające osadu filtracyjnego, co przejawia się wyraźnym spadkiem filtracji (rys. 7). Wyniki te potwierdzają

dobrą odporność termiczną układu oraz jego odporność na skażenie fazą stałą.

Przeprowadzone badania wykazały, że polimer Venom 2.0 SU oraz płuczka z jego udziałem skutecznie ograniczają

dobrych parametrów technologicznych opracowanego systemu płuczkowego.

Płuczka z polimerem Venom 2.0 SU, docelowo, przeznaczona jest do przewiercania skał ilastych i w związku z tym powinna ograniczać hydratację iłków. W celu oceny skuteczności inhibicji hydratacji przeprowadzono badania liniowego pęcznienia iłłupka popielatego pod wpływem opracowanych płuczek wiertniczych, kondycjonując próbki łu w badanych płuczkach przez 20 h. Dla porównania zbadano również płuczkę bazową z dodatkiem chlorku potasu, oznaczoną jako Mud 2-K. Składy obu płuczek przedstawiono w tabeli 1. Wyniki wykazały, że pęcznienie iłłupka popielatego w płuczce z dodatkiem Venom 2.0 SU wyniosło 9%, podczas gdy w przypadku płuczki referencyjnej z dodatkiem chlorku potasu osiągnęło 17,5% (rys. 8). Oznacza to, że polimer Venom 2.0 SU lepiej inhibuje hydratację iłków, niż stosowany obecnie chlorek potasu.

Podsumowanie

W ramach projektu opracowano i przebadano nowe płuczki wiertnicze przeznaczone do przewiercania skał ilastych, zawierające polimer Venom 2.0 SU jako jedyny inhibitor hydratacji, przy całkowitej rezygnacji ze stosowania zarówno chlorku potasu, jak i polimeru PHPA.

Opracowana bezchlorkowa płuczka wiertnicza z dodatkiem polimeru Venom 2.0 SU wykazuje stabilne właściwości reologiczne w warunkach symulujących rzeczywiste środowisko otworowe. Potwierdzono także

hydratację i pęcznienie minerałów ilastych, lepiej niż płuczka porównawcza z chlorkiem potasu.

Istotnym atutem płuczki z dodatkiem polimeru Venom 2.0 SU jest możliwość eliminacji z receptury korozyjnych i niekorzystnych środowiskowo jonów chlorkowych oraz potasowych, co ułatwia i obniża koszty utylizacji zużytej płuczki wiertniczej.

W świetle uzyskanych rezultatów polimer Venom 2.0 SU stanowi uzasadnioną merytorycznie i technicznie alternatywę dla tradycyjnych systemów potasowych, łącząc wysoką skuteczność inhibicji hydratacji z bezpieczeństwem środowiskowym i procesowym.

Praca powstała w wyniku realizacji badań finansowanych z subwencji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność naukową, prowadzonych w Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Otrzymano: 02-06-2026

Zrecenzowano: 01-07-2026

Zaakceptowano: 09-07-2026

Opublikowano: 18-08-2026

LITERATURA

- [1] R. Gholami, V. Rasouli, A. Al-Hajri, *Earth-Sci. Rev.* 2018, **177**, 2, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.002>.
- [2] S. Wysocki, M. Wojtarowicz, *Przem. Chem.* 2025, **104**, nr 12, 1271, <https://doi.org/10.15199/62.2025.12.6>.
- [3] N.S. Muhammed, T. Olayiwola, S.M. Elkatatny, *J. Pet. Sci. Eng.* 2021, **206**, 109043, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109043>.
- [4] Y. Li, C. Xia, X. Liu, *Heliyon* 2023, **9**, nr 12, e22990, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22990>.
- [5] R.E. Swai, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 2020, **10***, nr 8, 3515, <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00984-y>.
- [6] H. Zhong, J. Qiu, W. Huang, B. Cao, J. Zhang, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2016, **28**, 52, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.11.028>.
- [7] S. He, L. Liang, Y. Zeng, Y. Ding, Y. Lin, X. Liu, *Energies* 2022, **15***, nr 20, 7550, <https://doi.org/10.3390/en15207550>.
- [8] B. Pašić, N. Gaurina-Medimurec, D. Mijić, *Energies* 2020, **13**, nr 23, 6246, <https://doi.org/10.3390/en13236246>.
- [9] W. Zhang, C. Zhang, S. Zhang, G. Cheng, K. Zhang, *ACS Omega* 2022, **7**, nr 51, 48034, <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06041>.
- [10] Y. Dashti-Rahmatnabadi, S.A. Hosseini, M.R. Rasaei, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 2025, **15**, nr 1, 11, <https://doi.org/10.1007/s13202-024-01901-3>.
- [11] A. Rana, M. Arfaj, S. Patil, M.S. Kamal, *Fuel* 2019, **247**, 237, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.045>.
- [12] R.A. Khan, S. Patil, M.S. Kamal, S. Hussain, S.M. Shakil Hussain, *ACS Omega* 2020, **5**, nr 41, 26682, <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03565>.
- [13] A. Momeni, S. Sajjadian, M. Jami, M.A. Ahmadi, *Sci. Rep.* 2025, **15**, 30088, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-83100-y>.
- [14] M.H. Rasool, M. Ahmad, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.* 2024, **14**, nr 1, 85, <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01712-4>.
- [15] T.I. Yunusov, A.A. Al-Muntasheri, M.A. Mahmoud, *Minerals* 2022, **12**, nr 6, 714, <https://doi.org/10.3390/min12060714>.
- [16] Y. Liu, X. Wang, Y. Zhang, *Open J. Yangtze Gas Oil* 2021, **6**, nr 4, 161, <https://doi.org/10.4236/ojypo.2021.64011>.
- [17] Y. Tian, H. Zhong, S. Qiu, L. Zhou, S. Yan, *ACS Omega* 2021, **6**, nr 23, 15448, <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01832>.
- [18] B. Pašić, N. Gaurina-Medimurec, D. Mijić, *Energies* 2020, **13**, nr 23, 6246, <https://doi.org/10.3390/en13236246>.
- [19] X. Kong, L. Jincheng, Z. Guili, W. Demin, J. Jin, *Molecules* 2022, **27**, nr 24, 8936, <https://doi.org/10.3390/molecules27248936>.
- [20] API RP 13B-1:2026, *Field Testing Water-Based Drilling Fluids*.
- [21] PN-EN ISO 10414-1:2012, *Przemysł naftowy i gazowniczy. Badania połowe płynów wiertniczych. Część 1.: Płyiny na bazie wody*.



POLSKIE
STOWARZYSZENIE
KOROZYJNE

Zgłoszenie uczestnictwa
w promocji cenowej
do 18.09.2026 r.

XVIII Konferencja Polskiego Stowarzyszenia Korozyjnego

**PRAKTIKOR
STAL-BETON'2026**

18-20.11.2026

Hotel Willa Port, Ostróda

