

# Badania laboratoryjne nad zwiększeniem przewodności cieplnej płuczek wiertniczych przeznaczonych do wierceń geotermalnych

## Laboratory research on increasing the thermal conductivity of drilling muds for geothermal drilling

Sławomir Błaż, Grzegorz Zima, Bartłomiej Jasiński

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Jednym z potencjalnych kierunków rozwoju energetyki w Polsce jest wykorzystanie dla celów geotermalnych jako źródła energii głęboko zlokalizowanych wód o wysokich temperaturach. Udostępnianie złóż geotermalnych wiąże się z wysokimi wymogami stawianymi stosowanym płuczkom wiertniczym. Wysoka temperatura i ciśnienie panujące na dnie otworu wiertniczego są główną przyczyną zmiany parametrów reologicznych, ekwiwalentnej gęstości cyrkulacyjnej i objętości płuczki wiertniczej. Dlatego niezmiernie istotne jest, aby płuczka wiertnicza miała odpowiednią charakterystykę przewodnictwa cieplnego. Szczególnie ważne jest to w przypadkach wiercenia otworów, gdzie występująca różnica między ciśnieniem porowym a ciśnieniem szczelinowania jest niewielka. Właściwości termofizyczne, takie jak przewodność cieplna i ciepło właściwe płuczki wiertniczej, wpływają na wymianę ciepła i odgrywają zasadniczą rolę w profilu temperaturowym cieczy wiertniczych cyrkulujących w otworze. Przewodność cieplna i właściwa pojemność cieplna są zależne od składu płuczki wiertniczej, gęstości, właściwości reologiczno-strukturalnych i zawartości fazy stałej. W artykule przedstawiono badania przewodności cieplnej wodnodispersyjnych płuczek wiertniczych przeznaczonych do wierceń geotermalnych. Określono wpływ podstawowych składników płuczki oraz środków do regulowania jej parametrów na właściwości termofizyczne. Zaprezentowane zostały wyniki badań z zakresu prac eksperymentalnych zmierzających do wyboru i zastosowania środków chemicznych poprawiających przewodność cieplną płuczek wiertniczych. Na podstawie analizy otrzymanych wyników z badań laboratoryjnych opracowano skład płuczki wiertniczej do wiercenia otworów geotermalnych charakteryzującej się zwiększonymi wartościami przewodności cieplnej przy zachowaniu wysokiej odporności na działanie wysokiej temperatury i ciśnienia.

**Słowa kluczowe:** płuczka wiertnicza, przewodność cieplna, właściwości termofizyczne, nanododatki, nanociecze.

**ABSTRACT:** One of the potential directions of energy development in Poland is the use of deep waters with high temperatures as a source of energy for geothermal purposes. Accessing geothermal deposits is associated with exacting requirements in terms of the drilling muds used. The high temperature and pressure at the bottom of the borehole are the main cause of changes in rheological parameters, equivalent circulation density and drilling mud volume. Therefore, it is of the utmost importance that the drilling mud has adequate thermal conductivity characteristics. This is especially important in cases of drilling holes where the difference between the pore pressure and the fracture pressure is small. Thermophysical properties such as the thermal conductivity and heat capacity of the drilling mud affect heat transfer and play an essential role in the temperature profile of the drilling fluids circulating in the hole. Thermal conductivity and proper heat capacity depend on the drilling mud composition, density, rheological and structural parameters and solid phase content. The article presents the study of thermal conductivity of water based drilling muds intended for geothermal drilling. The influence of basic mud components and agents regulating its parameters on thermophysical properties was determined. The results of experimental research designed to select and apply chemicals to improve the thermal conductivity of drilling muds are presented. Based on the analysis of the results obtained from laboratory tests, a composition for drilling mud for drilling geothermal boreholes was created with enhanced thermal conductivity while maintaining strong resistance to high temperature and pressure.

**Key words:** drilling mud, thermal conductivity, thermophysical properties, nanoadditives, nanoliquids.

---

Autor do korespondencji: S. Błaż, e-mail: [slawomir.blaz@inig.pl](mailto:slawomir.blaz@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 04.01.2023 r. Zatwierdzono do druku: 11.05.2023 r.

## Wstęp

Zmniejszające się zasoby złóż gazu ziemnego i ropy naftowej oraz potrzeba ograniczenia emisji niekorzystnych dla klimatu gazów cieplarnianych powodują wzrost zainteresowania pozyskiwaniem energii ze źródeł odnawialnych (OZE). Jednym z potencjalnych kierunków rozwoju energetyki w Polsce jest wykorzystanie dla celów geotermalnych jako źródła energii głęboko zlokalizowanych wód o wysokich temperaturach. Udostępnianie złóż wód geotermalnych wiąże się z wysokimi wymogami stawianymi stosowanym płuczkom wiertniczym. Trudności podczas wiercenia występują głównie z uwagi na podwyższoną temperaturę i ciśnienie oraz czynniki związane ze składem mineralogicznym przewiercanych warstw oraz dopływających wód. Wysoka temperatura i ciśnienie panujące na dnie otworu wiertniczego są główną przyczyną zmiany parametrów reologicznych, ekwiwalentnej gęstości cyrkulacyjnej i objętości płuczki wiertniczej (Espinosa-Paredes i Garcia-Gutierrez, 2004; Saboori et al., 2019; Mohamed et al., 2021). Dlatego niezmiernie istotne jest, aby płuczka wiertnicza miała odpowiednią charakterystykę przewodnictwa cieplnego. Szczególnie ważne jest to w przypadkach wiercenia otworów, gdzie występująca różnica między ciśnieniem porowym a ciśnieniem szczelinowana jest niewielka. Właściwości termofizyczne, takie jak przewodność cieplna i ciepło właściwe płuczki wiertniczej, wpływają na wymianę ciepła i odgrywają zasadniczą rolę w profilu temperaturowym cieczy wiertniczych cyrkulujących w otworze (Santoyo et al., 2001; Saboori et al., 2019; López-Acosta et al., 2021).

Przewodność cieplna jest zdolnością materiału do przenoszenia lub przewodzenia ciepła i zależy od właściwości materiału, w szczególności od jego struktury i temperatury. Zgodnie z drugim prawem termodynamiki transfer ciepła występuje z obszaru o wysokiej temperaturze i wysokiej energii cząsteczkowej do obszaru o niższej temperaturze i niższej energii cząsteczkowej, aż do osiągnięcia równowagi termicznej. Zdolność do przewodzenia ciepła charakteryzuje współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ , który jest definiowany jako ilość ciepła przewodzonego w ciągu 1 s przez próbkę o przekroju 1 m<sup>2</sup> przy jednostkowym gradiencie temperatury (Prałat et al., 2019):

$$\lambda = (Q \cdot d) / (t \cdot S \cdot \Delta T) \text{ [W/m}\cdot\text{K]} \quad (1)$$

gdzie:

$Q$  – ilość ciepła przepływającego przez ciało [W],

$\lambda$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego [W/m·K],

$S$  – pole przekroju, przez który przepływa ciepło [m<sup>2</sup>],

$t$  – czas przepływu [s],

$\Delta T$  – różnica temperatur w kierunku przewodzenia ciepła [K],

$d$  – grubość przegrody [m].

Właściwości termofizyczne stanowią ważną dziedzinę wiedzy przy rozpatrywaniu zagadnień wymiany ciepła. Pomimo ich znaczenia – w literaturze dostępne są bardzo ograniczone dane dotyczące tych parametrów. Przeważnie wartości przewodności cieplnej i ciepła właściwego szacowane są za pomocą modeli generycznych. Aby wykonać dokładne modelowanie, wymagana jest rozległa wiedza na temat właściwości przewodnictwa cieplnego wszystkich materiałów, a zwłaszcza płuczki wiertniczej i zaczynu cementowego. Temperatury można wyznaczyć albo przez bezpośredni pomiar za pomocą urządzeń rejestrujących temperaturę w otworze, albo przez symulację numeryczną efektów chłodzenia wywołanych cyrkulacją płuczki wiertniczej – przy użyciu komputerowych symulatorów stacjonarnego lub nieustalonego procesu wymiany ciepła (Murshed et al., 2008; López-Acosta et al., 2021; Cardona et al., 2022).

Płuczka wiertnicza podczas obiegu traci lub zyskuje ciepło w wymianie z otoczeniem. W otworze wiertniczym następuje transfer ciepła od formacji do płuczki w miarę zwiększania głębokości otworu. Płuczka wiertnicza o niższej temperaturze niż przewiercane formacje, cyrkulując w otworze, nagrzewa się, aż osiągnie temperaturę otaczających formacji. Następnie płuczka podczas wypływu z otworu zaczyna się ochładzać. Równowagę termiczną można osiągnąć tylko w warunkach stałej cyrkulacji (Veisi et al., 2020; Pandey i Gupta, 2022). Ten proces wymiany ciepła zależny jest od rodzaju zastosowanej płuczki, jej składu i właściwości.

Temperatura panująca w otworze wiertniczym i przewiercanych formacjach ma istotny wpływ na stabilność otworu, gęstość i reologię płuczki wiertniczej, awarię sprzętu wiertniczego i szybkość korozji narzędzia wiertniczego (Wu et al., 2017; Zhang et al., 2021). Zachodzące zmiany parametrów reologicznych wpływają na konwekcyjne przenoszenie ciepła; gęstość i właściwa pojemność cieplna wpływają na akumulację energii; a przewodność cieplna kontroluje przenoszenie ciepła przez płuczkę wiertniczą (Xie et al., 2005; Gudarzifar et al., 2020; Zhang et al., 2021; Zhong et al., 2021; Bavoh et al., 2022). Zmiany przewodności cieplnej, ciepła właściwego i lepkości płuczki wiertniczej mają istotny wpływ na rozkład temperatury w otworze podczas jego wiercenia.

Jednym ze sposobów zwiększania przewodności cieplnej płuczek wiertniczych jest modyfikowanie ich składu i właściwości poprzez dodatek nanomateriałów (Aftab et al., 2017; Cheraghian, 2021; Pandey i Gupta, 2022).

Nanomateriały to środki o rozmiarach w przedziale od 1 nm do 100 nm. Wykazują one zupełnie inne właściwości fizykochemiczne w porównaniu z ich właściwościami w skali makroskopowej. Większość z tych cech związana jest z ich rozmiarami i morfologią. Nanomateriały mogą występować w postaci trójkątów, kwadratów, rombów

i płytek, nanoprętów, nanorurek, nanocząsteczek itp. Typowe nanocząsteczki stosowane dotychczas w składach płuczek wiertniczych obejmują związki zawierające nanostruktury węgla (nanorurki węglowe i grafen), tlenek miedzi (CuO), tlenek cynku (ZnO), dwutlenek tytanu (TiO<sub>2</sub>), tlenek żelaza (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dwutlenek krzemu (SiO<sub>2</sub>), tlenek glinu (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ferryt bizmutu, nanocelulozę i dwusiarczek molibdenu (MoS<sub>2</sub>) (Kim et al., 2007; Duangthongsuk i Wongwises, 2009; Kole i Dey, 2012; Beg et al., 2019). Nanotlenek glinu i nanotlenek miedzi są najczęściej stosowanymi nanocząsteczkami wykorzystywanymi do zwiększania przewodności cieplnej płynów używanych w wymiennikach ciepła. Opublikowane wyniki wykazały poprawę przewodności cieplnej w zakresie od 10% do 25% (Wu et al., 2017; Veisi et al., 2020). Nanociecze na bazie nanorurek węglowych CNT wykazują znacznie lepsze właściwości przewodzenia ciepła, ze względu na bardzo wysoką przewodność cieplną CNT (2000–4000 W/m·K) (Zima, 2017; Kędzierski et al., 2020). Efektywność poprawy przewodnictwa cieplnego nanocieczy zależy od kilku czynników, a mianowicie od typu cząstek, wielkości, stężenia, rodzaju cieczy bazowych, wartości pH, temperatury i grupowania nanocząsteczek. Przewodność cieplna nanocieczy zmienia się w zależności od rodzaju, rozmiaru, kształtu nanocząsteczek. Nanociecze z metalicznymi nanocząsteczkami charakteryzują się wyższą przewodnością cieplną niż nanociecze z niemetalicznymi (tlenkowymi) nanocząsteczkami. Im mniejszy rozmiar cząsteczek, tym wyższe przewodnictwo cieplne nanocieczy. Ponadto nanociecze zawierające nanocząsteczki o kulistym kształcie wykazują mniejszy wzrost przewodności cieplnej w porównaniu z nanocieczami z nanocząsteczkami cylindrycznymi (nanoprętami lub nanorurkami) (Namburu et al., 2007; Yu et al., 2009; Sharma et al., 2012; Aftab et al., 2017; Saboori et al., 2019). Kwestia stabilności nanocieczy ogranicza ich zastosowanie w układach termicznych. Nanocząstki zawieszane w płynach bazowych podlegają działaniu sił takich jak: siły wyporu, siły odpychania elektrostatycznego, siły van der Waalsa i siły grawitacji. Pierwsze dwie siły sprzyjają stabilności nanozawiesin, podczas gdy dwie ostatnie działają przeciwnie.

Efektywność działania nanocieczy w zastosowaniach związanych z przenoszeniem ciepła w dużym stopniu zależy od ich stabilności. Nanocząstki zawieszane w płynie bazowym podlegają ruchom Browna i zderzają się ze sobą. Skłonność nanocząstek do tworzenia podczas zderzeń dużych skupisk powoduje powstawanie aglomeracji. Te skupiska ostatecznie destabilizują nanozawiesinę, ulegając sedymentacji. Aglomeracja nanocząstek w nanozawiesinie może ostatecznie pogorszyć jej zdolność przenoszenia ciepła i przepływu (Xuan i Li, 2000; Fazelabdolabadi et al., 2015; Cheraghian et al., 2018; Saffari et al., 2018; Hong et al., 2019).

Do wiercenia otworów geotermalnych zalecane są płuczki wiertnicze o wysokiej przewodności cieplnej i wysokiej pojemności cieplnej, co sprzyja uzyskaniu niższych temperatur cyrkulacji na dnie otworu oraz szybszemu wyrównaniu temperatury i stabilizacji otworu, gdy otwór pozostaje statyczny (brak cyrkulacji płuczki). Ponadto płuczki wiertnicze o takich parametrach są mniej podatne na zmianę właściwości przy wyższych temperaturach dennych otworu.

### Metodyka badań

Do określania przewodności cieplnej płuczek wiertniczych zastosowano analizator właściwości termicznych model ISOMET 2114, który służy do bezpośredniego pomiaru właściwości przewodzenia ciepła metodą tzw. gorącego druta. Jest to jedna z najprostszych metod, którą można stosować zarówno w laboratorium, jak też w warunkach polowych podczas wiercenia otworu.

Za pomocą tego urządzenia możliwe jest określenie przewodności cieplnej, dyfuzyjności cieplnej oraz objętościowej pojemności cieplnej. ISOMET 2114 wyposażony jest w dwa rodzaje sond pomiarowych: sondę igłową i sondę powierzchniową. Aparat wykorzystuje dynamiczną metodę pomiaru, co pozwala na skrócenie czasu pomiaru w porównaniu z metodami pomiaru stanu ustalonego. Pomiar opiera się na analizie odpowiedzi temperaturowej analizowanego materiału na impulsy przepływu ciepła. Przepływ ciepła jest wzbudzany przez nagrzewanie elektryczne grzałki oporowej umieszczonej w sondzie, która ma bezpośredni kontakt cieplny z badaną próbką. Ocena przewodności cieplnej i objętościowej pojemności cieplnej opiera się na okresowo próbkowanych zapisach temperatury w funkcji czasu, pod warunkiem że propagacja ciepła zachodzi w nieograniczonym ośrodku. Szeroki zakres pomiarowy ISOMET 2114 pozwala mierzyć różnorodne materiały o skrajnie różnych właściwościach mechanicznych.

Badania przewodności cieplnej płuczek wiertniczych wykonywano za pomocą sondy igłowej. Badania laboratoryjne prowadzono w kierunku modyfikacji składu płuczek wiertniczych w celu poprawy ich właściwości przewodnictwa cieplnego.

Jako płuczkę do badań wytypowano wodnodispersyjną płuczkę potasowo-polimerową. Analizie poddano środki chemiczne, które mogą zwiększać przewodność cieplną płuczek. Korzystając z dostępnej literatury, sprawdzono wpływ działania nanododatków na właściwości cieplne płuczek wiertniczych. Płuczki wiertnicze sporządzano z dodatkiem nanotlenku glinu, nanotlenku cynku, nanorurek węglowych oraz tlenku grafenu. Płuczki wiertnicze z dodatkiem nanokompozytów przygotowywano za pomocą mieszadła Hamilton Beach, poddając je mieszaniu z prędkością 18 tys. obr/min, oraz poprzez sonifikację.

Proces sonifikacji prowadzono na sonifikatorze przez 20 min, który to czas został ustalony na podstawie badań wstępnych. W pierwszej kolejności nanokompozyty dodawano do wody, poddając je sonifikacji, a następnie wprowadzano pozostałe składniki płuczki. Po sporządzeniu płuczek określano ich właściwości oraz sprawdzano przewodność cieplną. Na podstawie przeprowadzonych badań wybrano składy płuczek charakteryzujących się zwiększoną przewodnością cieplną.

### Wyniki badań laboratoryjnych

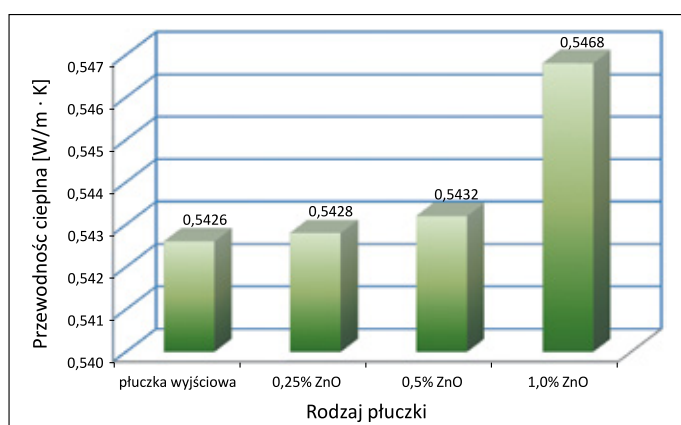
W ostatnich kilku latach obserwujemy zainteresowanie nanocieczami zawierającymi w swoim składzie dodatki nanomateriałów. Nanociecze zyskały ogromną popularność jako płyny lepiej przenoszące ciepło w porównaniu z konwencjonalnymi cieczami roboczymi, takimi jak woda, glikol etylenowy, butanol itp. Nanociecze to zaawansowane dwufazowe ciecze

przenoszące ciepło, które są sporządzone przez zawieszenie nanocząstek stałych (metali, materiałów na bazie węgla, takich jak grafen, wielościennie nanorurki węglowe i ich związki itp.) w płynie bazowym.

Badania prowadzone od kilku lat wskazują, że ten rodzaj cieczy charakteryzuje się wyższą przewodnością cieplną w stosunku do cieczy bez udziału nanocząstek. W związku z powyższym poniżej przedstawiono badania płuczek wiertniczych z dodatkiem nanomateriałów. W celu zwiększenia przewodności cieplnej do płuczek dodawano materiały w skali nano, tj. tlenek cynku, tlenek glinu, grafen i nanorurki węglowe.

Tlenek cynku zastosowano do płuczek w ilości od 0,25% do 1,0%. Sposób sporządzania płuczki z dodatkiem nanomateriałów przedstawiono w metodyce badań. Tlenek cynku w badanym zakresie wpłynął na niewielką poprawę przewodności cieplnej płuczek. W przypadku dodatku 0,25% ZnO obserwujemy wzrost przewodności cieplnej płuczki do 0,5428 W/m·K (rysunek 1). Nieznacznie wyższą przewodność cieplną, wynoszącą 0,5423 W/m·K, stwierdzono w płuczce zawierającej 0,5% ZnO. Natomiast najwyższą przewodność cieplną, wynoszącą 0,546 W/m·K, uzyskano dla płuczki zawierającej 1% ZnO (rysunek 1). Tlenek cynku obecny w płuczce wpływa także na znaczne obniżenie jej parametrów reologiczno-strukturalnych. Przy dodatku 1% ZnO lepkość plastyczna płuczki,  $\eta_{pl}$ , obniża się o 8 mPa·s, lepkość pozorną,  $\eta_s$  – o 14 mPa·s, a granica płynięcia – o 5,8 Pa (tabela 1).

W tabeli 2 i na rysunku 2 przedstawiono badania zmiany właściwości płuczki wiertniczej w wyniku zastosowania w jej składzie nanotlenku glinu  $Al_2O_3$ . Sporządzone płuczki zawierały dodatek  $Al_2O_3$  w ilości od 0,25% do 1%. Przeprowadzone pomiary przewodności cieplnej płuczki wykazały, że nanotlenek glinu  $Al_2O_3$  w badanym zakresie wpływa w niewielkim stopniu na poprawę przewodności cieplnej płuczek. Przy dodatku 0,25%  $Al_2O_3$  przewodność cieplna wzrasta do 0,5432 W/m·K, natomiast przy zawartości 1%  $Al_2O_3$  – do 0,5513 W/m·K (rysunek 2).



**Rysunek 1.** Zmiany wartości współczynnika przewodności cieplnej płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku nanotlenku cynku ZnO

**Figure 1.** Changes in the thermal conductivity coefficient of the potassium-polymer drilling mud by adding zinc nanooxide ZnO

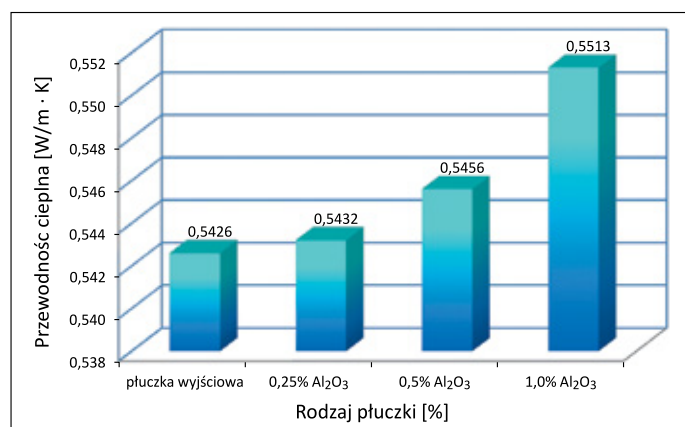
**Tabela 1.** Zmiany właściwości płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku nanotlenku cynku ZnO

**Table 1.** Changes in the properties of the potassium-polymer drilling mud by adding zinc nanooxide ZnO

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]	pH	
			$\rho$	$\eta_{pl}$					$\eta_s$
1	Biostat	0,10	1080	29	44,0	14,4	2,5/4,3	6,0	9,2
	Biopolimer	0,30							
	CMC LV	1,50							
	Środek skrobiowy	2,00							
	Inhibitor jonowy	5,00							
	Blokator	5,00							
2	Płuczka 1 + ZnO	0,25	1080	22	33,0	10,5	1,9/2,4	6,0	9,2
3	Płuczka 1 + ZnO	0,50	1080	22	32,5	10,0	1,9/2,4	4,0	9,1
4	Płuczka 1 + ZnO	1,00	1080	21	30,0	8,6	1,4/1,9	3,6	9,0

**Tabela 2.** Zmiany właściwości płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku nanotlenku glinu  $Al_2O_3$   
**Table 2.** Changes in the properties of the potassium-polymer drilling mud by adding aluminum nanooxide  $Al_2O_3$

Nr płuczki	Skład płuczki [%]		Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]	pH	
			$\rho$	$\eta_{pl}$	$\eta_s$	$\tau_y$	I/II			
1	Biostat	0,10	1080	29	44,0	14,4	2,50/4,3	6,0	9,2	
	Biopolimer	0,30								
	CMC LV	1,50								
	Środek skrobiowy	2,00								
	Inhibitor jonowy	5,00								
	Blokator	5,00								
2	Płuczka 1 + $Al_2O_3$		0,25	1080	17	25,0	7,6	1,40/1,9	4,4	9,0
3	Płuczka 1 + $Al_2O_3$		0,50	1080	16	24,0	7,6	0,96/1,4	10,0	8,8
4	Płuczka 1 + $Al_2O_3$		1,00	1080	16	23,5	7,2	0,96/1,4	12,0	8,4



**Rysunek 2.** Zmiany wartości współczynnika przewodności cieplnej płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku nanotlenku glinu  $Al_2O_3$

**Figure 2.** Changes in the thermal conductivity coefficient of the potassium-polymer drilling mud by adding aluminum nanooxide  $Al_2O_3$

Zastosowanie nanotlenku glinu w składzie płuczki negatywnie oddziałuje na jej parametry reologiczno-strukturalne i filtrację. Dodatek 1%  $Al_2O_3$  powoduje obniżenie lepkości plastycznej płuczki o 13 mPa·s, pozornej – o 20,5 mPa·s, granicy płynięcia – o 7,2 Pa i znaczny wzrost filtracji – do 12 cm<sup>3</sup>/30 min (tabela 2).

Nanorurki węglowe są jedną z odmian alotropowych węgla. Swoją budową przypominają walec. Można je zaliczyć do nanocząstek wykazujących strukturę 2D. Średnica nanorurek osiąga wartości od 2 nm do 20 nm, natomiast sama ich długość może dochodzić do 2 cm. Odnznaczają się one dużą powierzchnią właściwą, która w przypadku nanorurek wielościennych osiąga wartości w przedziale 10–20 m<sup>2</sup>/g, natomiast jednościennych – aż 100–200 m<sup>2</sup>/g. Ich dobre właściwości wynikają głównie z występowania silnych wiązań pomiędzy atomami węgla, które znajdują się w płaszczyźnie grafitowej. Nanorurki węglowe zostają utworzone poprzez zwinięcie

jednoatomowej płaszczyzny grafitowej, lecz sposób związania płaszczyzn nie jest jednakowy dla każdej nanostruktury. Nanorurki różnią się między sobą długością, średnicą, a także kątem skrętności. Wyróżnia się następujące rodzaje nanorurek węglowych: jednowarstwowe, wielowarstwowe, nanocewki, nanotorusy, fuleryty (Kazemi-Beydokhti i Hajiabadi, 2018; Liu et al., 2022).

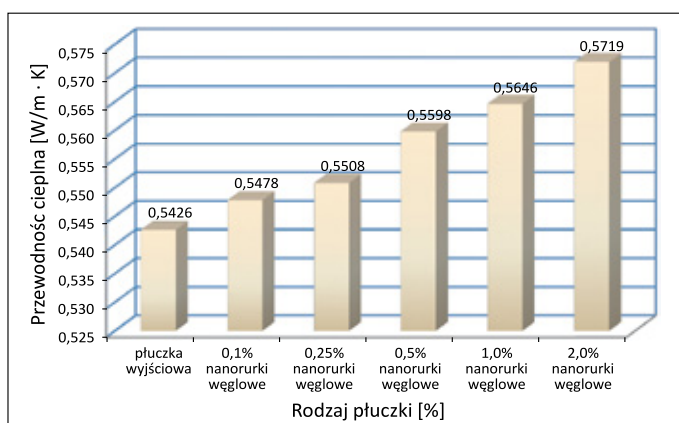
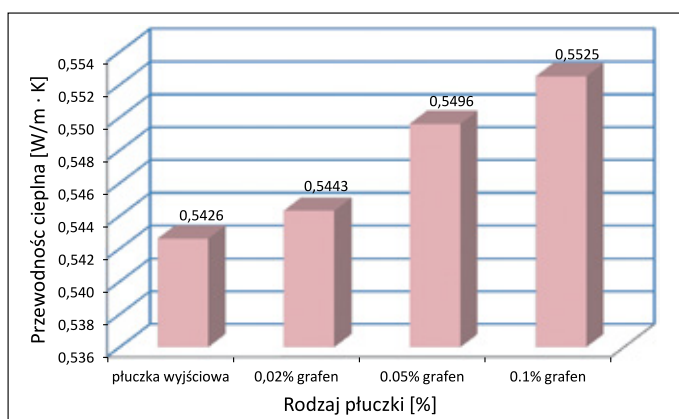
Nanorurki węglowe odznaczają się bardzo dobrymi parametrami mechanicznymi, między innymi dużą wartością modułu Younga, wysoką sprężystością i wytrzymałością na rozciąganie oraz zginanie. Ponadto charakteryzują się bardzo dobrą odpornością na działanie podwyższonej temperatury oraz są bardzo dobrymi przewodnikami ciepła (Liu et al., 2022).

Wpływ nanorurek węglowych na właściwości płuczki wiertniczej przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 3. W badaniach zastosowano wielościenne nanorurki węglowe (MWCNTs) o średnicy zewnętrznej 10–20 nm i długości 10–30 μm. Nanorurki węglowe dodawano do płuczki w ilości od 0,1% do 2%.

Płuczki z dodatkiem nanorurek węglowych ze względu na bardzo wysoką przewodność cieplną CNT (2000–4000 W/m·K) wykazują znacznie lepsze właściwości przewodzenia ciepła. Już przy dodatku 0,5% nanorurek węglowych obserwujemy wzrost przewodności cieplnej płuczki o 3% (rysunek 3). Zastosowanie nanorurek węglowych wpływa także na poprawę parametrów reologiczno-strukturalnych płuczki i obniżenie filtracji. Przy dodatku 0,5% nanorurek węglowych uzyskujemy wzrost lepkości plastycznej płuczki o 5 mPa·s, lepkości pozornej o 11,5 mPa·s i granicy płynięcia o 6,2 Pa (tabela 3). Nanorurki węglowe wpływają także na obniżenie filtracji płuczki z 6,0 cm<sup>3</sup>/30 min do 4,4 cm<sup>3</sup>/30 min (tabela 3). Przy dodatku 1% przewodność cieplna płuczki wzrasta do 0,5646 W/m·K (rysunek 3). Najwyższą wartość przewodności cieplnej, wynoszącą 0,5719 W/m·K, uzyskano dla płuczki z dodatkiem 2% nanorurek węglowych (rysunek 3).

**Tabela 3.** Zmiany właściwości płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku nanorurek węglowych**Table 3.** Changes in the properties of the potassium-polymer drilling mud by adding carbon nanotubes

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]	pH
			$\rho$	$\eta_{pl}$				
1	Biostat 0,10 Biopolimer 0,30 CMC LV 1,50 Środek skrobiowy 2,00 Inhibitor jonowy 5,00 Blokator 5,00	1080	29	44,0	14,4	2,5/4,3	6,0	9,2
2	Płuczka 1 + nanorurki węglowe 0,10	1080	32	49,0	16,2	2,9/3,8	6,0	9,2
3	Płuczka 1 + nanorurki węglowe 0,25	1080	32	50,0	17,2	2,9/4,3	5,6	9,2
4	Płuczka 1 + nanorurki węglowe 0,50	1080	34	55,5	20,6	3,8/5,7	4,4	9,3
5	Płuczka 1 + nanorurki węglowe 1,00	1080	38	67,0	27,7	5,3/7,2	3,6	9,4
6	Płuczka 1 + nanorurki węglowe 2,00	1080	42	80,0	33,5	6,7/9,1	2,8	9,5

**Rysunek 3.** Zmiany wartości współczynnika przewodności cieplnej płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku nanorurek węglowych**Figure 3.** Changes in the thermal conductivity coefficient of the potassium-polymer drilling mud by adding carbon nanotubes**Rysunek 4.** Zmiany wartości współczynnika przewodności cieplnej płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku tlenku grafenu**Figure 4.** Changes in the thermal conductivity coefficient of the potassium-polymer drilling mud by adding graphene oxide

Stosunkowo nowym nanomateriałem, coraz częściej badanym w ostatnich latach, jest grafen. Grafen stanowi podstawową jednostkę strukturalną wszystkich innych nanostruktur węglowych, charakteryzuje się dużą wartością przewodnictwa cieplnego, około 5000 W/m·K, oraz dobrymi właściwościami mechanicznymi (Ikram et al., 2020). Z uwagi na jego właściwości i aspekt ekonomiczny dodawany był do płuczek w ilości od 0,02% do 0,1% (tabela 4). Przeprowadzone badania wykazały, że już 0,05-proc. dodatek tlenku grafenu wpłynął na wzrost o 1,3% przewodności cieplnej płuczki oraz zwiększenie lepkości plastycznej płuczki o 3 mPa·s i granicy płynięcia o 1,4 Pa (tabela 4, rysunek 4). Dodatek tlenku grafenu w ilości 0,1% spowodował zwiększenie przewodności płuczki do 0,5525 W/m·K oraz dalszy wzrost lepkości plastycznej – do 33 mPa·s i granicy płynięcia – do 16,2 Pa oraz obniżenie filtracji do 4,6 cm<sup>3</sup>/30 min (tabela 4, rysunek 4).

Przeprowadzone badania płuczek z dodatkiem nanokompozytów wykazały, że wzrost przewodnictwa cieplnego zależy od rodzaju zastosowanych nanododatków, ich właściwości oraz od ich stężenia w płuczce wiertniczej. Spośród przebadanych nanododatków najlepsze efekty uzyskano przy zastosowaniu nanorurek węglowych.

Kolejnym z materiałów, który z uwagi na swoje właściwości może zwiększać przewodność cieplną płuczek wiertniczych jest grafit. Grafit jest odmianą węgla o czarnoszarej barwie i metalicznym połysku. Podstawowe właściwości grafitu to dobre przewodnictwo cieplne i elektryczne, wysoka odporność termiczna oraz doskonałe właściwości smarne. Ponadto grafit nie rozpuszcza się w wodzie i charakteryzuje się małą aktywnością chemiczną oraz brakiem negatywnego wpływu na środowisko. Do badań laboratoryjnych zastosowano grafit płatkowy, który dodawano do płuczki w ilości od 1% do 20%. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 5 i na rysunku 5. Grafit, jako materiał

**Tabela 4.** Zmiany właściwości płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku tlenku grafenu  
**Table 4.** Changes in the properties of the potassium-polymer drilling mud by adding graphene oxide

Nr płuczki	Skład płuczki [%]		Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]	pH	
			$\rho$	$\eta_{pl}$	$\eta_s$	$\tau_y$	I/II			
1	Biostat	0,10	1080	29	44,0	14,4	2,5/4,3	6,0	9,2	
	Biopolimer	0,30								
	CMC LV	1,50								
	Środek skrobiowy	2,00								
	Inhibitor jonowy	5,00								
	Blokator	5,00								
2	Płuczka 1 + tlenek grafenu		0,02	1080	32	48,0	15,3	3,0/4,8	5,2	9,3
3	Płuczka 1 + tlenek grafenu		0,05	1080	32	48,5	15,8	2,9/4,8	4,8	9,4
4	Płuczka 1 + tlenek grafenu		0,10	1080	33	50,0	16,2	2,9/5,3	4,6	9,4

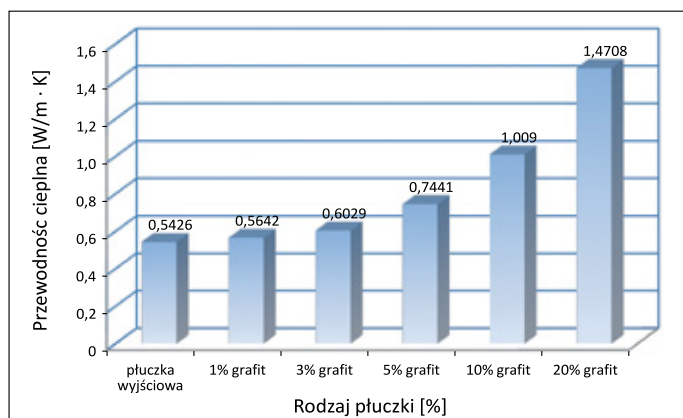
o dobrym przewodnictwie cieplnym, wpływa także na poprawę właściwości termofizycznych płuczki. Płuczka zawierająca 3% grafitu cechuje się przewodnictwem cieplnym wyższym niż płuczka bazowa o około 11% (rysunek 5). Zwiększenie udziału grafitu w płuczce do 5% skutkuje wzrostem przewodności cieplnej o 37,1% oraz wzrostem lepkości plastycznej do 30 mPa·s i granicy płynięcia do 14,8 Pa (tabela 5, rysunek 5). Przewodność cieplną 1,009 W/m·K płuczka uzyskuje przy dodatku 10% grafitu. Przy takiej zawartości grafitu w płuczce lepkość plastyczna płuczki wzrasta o 3 mPa·s, lepkość pozorna – o 4 mPa·s, a granica płynięcia płuczki – o 0,9 Pa (tabela 5). Dodatek grafitu do płuczki w ilości 20% wpływa na dalszy wzrost przewodności cieplnej płuczki do wartości 1,4708 W/m·K, co stanowi zwiększenie przewodności cieplnej o 171% (rysunek 5). Niestety przy takiej zawartości grafitu obserwujemy gwałtowny wzrost lepkości plastycznej płuczki – do 58 mPa·s, lepkości pozornej – do 82,5 mPa·s i granicy płynięcia – do 23,4 Pa (tabela 5).

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych opracowano składy płuczek o gęstości 1200 kg/m<sup>3</sup> i 1600 kg/m<sup>3</sup>, które charakteryzują się podwyższonymi parametrami przewodnictwa cieplnego.

W tabeli 6 przedstawiono właściwości: płuczki bazowej obciążonej do gęstości 1200 kg/m<sup>3</sup> barytem (tabela 6, płuczka A), płuczki obciążonej do 1200 kg/m<sup>3</sup> ferrohmemem i zawierającej dodatek 0,5% nanorurek węglowych (tabela 6, płuczka B) i płuczki obciążonej ferrohmemem z dodatkiem 10% grafitu (tabela 6, płuczka C). Przeprowadzone badania przewodności cieplnej wytypowanych płuczek wykazały, że najwyższą wartością przewodności cieplnej, wynoszącą 0,9804 W/m·K, charakteryzowała się płuczka C, zawierająca dodatek 10% grafitu i obciążona do gęstości 1200 kg/m<sup>3</sup> ferrohmemem (rysunek 6). Poprzez zastosowanie w składzie płuczki grafitu uzyskano zwiększenie przewodności cieplnej o 71,4% w stosunku do płuczki bazowej. Płuczka B, zawierająca dodatek 0,5% nanorurek węglowych i obciążona ferrohmemem,

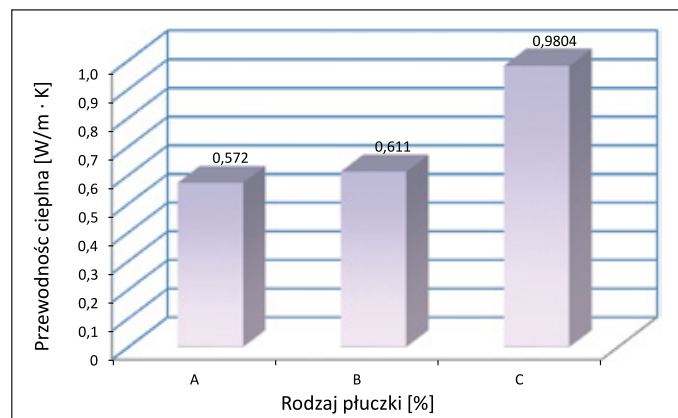
**Tabela 5.** Zmiany właściwości płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku grafitu  
**Table 5.** Changes in the properties of the potassium-polymer drilling mud by adding graphite

Nr płuczki	Skład płuczki [%]		Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]	pH	
			$\rho$	$\eta_{pl}$	$\eta_s$	$\tau_y$	I/II			
1	Biostat	0,1	1080	29	44,0	14,4	2,5/4,3	6,0	9,2	
	Biopolimer	0,3								
	CMC LV	1,5								
	Środek skrobiowy	2,0								
	Inhibitor jonowy	5,0								
	Blokator	5,0								
2	Płuczka 1 + grafit		1,0	1085	29	44,0	14,4	2,4/3,8	4,0	9,2
3	Płuczka 1 + grafit		3,0	1095	29	44,5	14,8	2,9/3,9	4,0	9,1
4	Płuczka 1 + grafit		5,0	1100	30	45,5	14,8	2,9/4,1	3,8	9,0
5	Płuczka 1 + grafit		10,0	1130	32	48,0	15,3	2,9/4,3	3,6	9,0
6	Płuczka 1 + grafit		20,0	1190	58	82,5	23,4	3,8/5,7	2,8	8,9



**Rysunek 5.** Zmiany wartości współczynnika przewodności cieplnej płuczki potasowo-polimerowej w wyniku zastosowania dodatku grafitu

**Figure 5.** Changes in the thermal conductivity coefficient of the potassium-polymer drilling mud by adding graphite



**Rysunek 6.** Średnie wartości współczynnika przewodności cieplnej płuczek obciążonych do gęstości 1200 kg/m³

**Figure 6.** Average values of the thermal conductivity coefficient of drilling mud weighted to a density of 1200 kg/m³

**Tabela 6.** Porównanie właściwości płuczek obciążonych do gęstości 1200 kg/m³ o różnym współczynniku przewodności cieplnej

**Table 6.** Comparison of the properties of a potassium-polymer drilling mud weighted to a density of 1200 kg/m³ with different coefficients of thermal conductivity

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość [kg/m³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm³/30 min]	pH
		$\rho$	$\eta_{pl}$	$\eta_s$	$\tau_y$	I/II		
1	Biostat 0,1 Biopolimer 0,3 CMC LV 1,5 Środek skrobiowy 2,0 Inhibitor jonowy 5,0 Blokator 5,0	1080	29	44,0	14,4	2,5/4,3	6,0	9,2
2	<b>Płuczka A</b> Płuczka nr 1 + baryt	1200	30	46,0	15,3	2,5/4,3	2,8	9,2
3	<b>Płuczka B</b> Płuczka nr 1 + nanorurki węglowe + ferrohem 0,5	1210	49	74,0	23,9	5,3/8,1	2,0	9,1
4	<b>Płuczka C</b> Płuczka nr 1 + grafit + ferrohem 10,0	1200	32	50,5	17,7	3,8/5,3	3,2	9,0

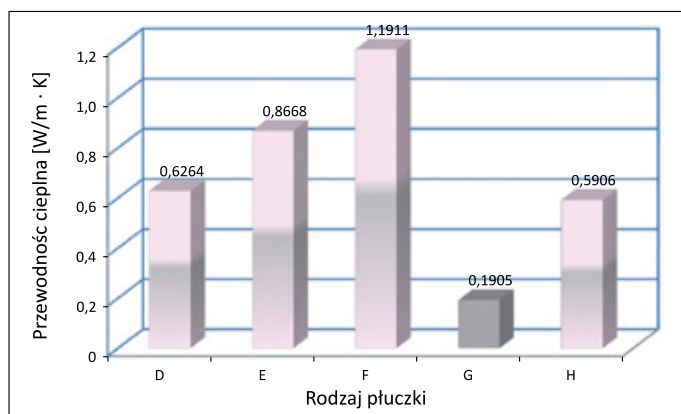
posiadała niższą przewodność cieplną, wynoszącą 0,611 W/m·K (rysunek 6). Dla porównania wartość przewodności cieplnej płuczki potasowo-polimerowej obciążonej barytem wynosiła 0,572 W/m·K (rysunek 6). Analizując parametry reologiczno-strukturalne sporządzonych płuczek, można stwierdzić, że najwyższymi parametrami charakteryzowała się płuczka z dodatkiem 0,5% nanorurek węglowych – jej lepkość plastyczna wynosiła 49 mPa·s, a granica płynięcia 23,9 Pa przy filtracji 2 cm³/30 min. Natomiast najniższymi parametrami reologiczno-strukturalnymi cechowała się płuczka bazowa obciążona do gęstości 1200 kg/m³ barytem (tabela 6).

W tabeli 7 przedstawiono właściwości płuczek obciążonych do gęstości 1600 kg/m³. Wzrost zawartości materiału obciążającego wpłynął na poprawę właściwości cieplnych płuczek. Przewodność cieplna płuczki E, zawierającej nanorurki węglowe, wynosiła 0,8668 W/m·K i była wyższa od przewodności płuczki obciążonej barytem o 38,4% (rysunek 7). Płuczka posiadała lepkość plastyczną 61 mPa·s, granicę płynięcia 28,2 Pa oraz filtrację wynoszącą 1,2 cm³/30 min (tabela 7). Dla porównania przewodność cieplna płuczki obciążonej barytem (D) wynosiła 0,6264 W/m·K i charakteryzowała się ona lepkością plastyczną 54 mPa·s, granicą płynięcia 23,9 Pa



**Tabela 7.** Porównanie właściwości płuczek obciążonych do gęstości 1600 kg/m<sup>3</sup> o różnym współczynniku przewodności cieplnej  
**Table 7.** Comparison of the properties of a potassium-polymer drilling mud weighted to a density of 1600 kg/m<sup>3</sup> with different coefficients of thermal conductivity

Nr płuczki	Skład płuczki [%]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna [Pa]	Filtracja [cm <sup>3</sup> /30 min]	pH	
		$\rho$	$\eta_{pl}$	$\eta_s$	$\tau_y$	I/II			
1	Biostat	0,1	1080	29,0	44,0	14,4	2,5/4,3	6,0	9,2
	Biopolimer	0,3							
	CMC LV	1,5							
	Środek skrobiowy	2,0							
	Inhibitor jonowy	5,0							
	Blokator	5,0							
2	Pluczka D Pluczka nr 1 + baryt	1600	54,0	79,0	23,9	3,8/5,7	2,8	9,2	
3	Pluczka E Pluczka nr 1 + nanorurki węglowe + ferrohmem	1590	61,0	90,5	28,2	4,8/7,6	1,2	9,2	
4	Pluczka F Pluczka nr 1 + grafit + ferrohmem	1600	59,0	87,5	27,2	4,3/7,2	1,6	9,1	
5	Pluczka G Pluczka inwersyjna o/w – 80 : 20 + baryt	1610	40,0	49,0	8,6	3,8/5,7	0,2	–	
6	Pluczka H Pluczka solno-barytowa	1600	57,0	82,5	25,8	4,3/5,3	3,0	8,9	



**Rysunek 7.** Średnie wartości współczynnika przewodności cieplnej płuczek obciążonych do gęstości 1600 kg/m<sup>3</sup>  
**Figure 7.** Average values of the thermal conductivity coefficient drilling mud weighted to a density of 1600 kg/m<sup>3</sup>

i filtracją 2,8 cm<sup>3</sup>/30 min (tabela 7, rysunek 7) Najwyższą wartością przewodności cieplnej, wynoszącą 1,1911 W/m·K, charakteryzowała się płuczka F, obciążona do gęstości 1600 kg/m<sup>3</sup> ferrohmem i zawierająca dodatek 10% grafitu. Modyfikacja składu płuczki poprzez dodatek grafitu i zmianę materiału obciążającego pozwoliła na poprawę jej przewodności cieplnej o 90,1% w stosunku do płuczki bazowej (rysunek 7). Lepkość

plastyczna płuczki wynosiła 59 mPa·s, granica płynięcia 27,2 Pa, a filtracja 1,6 cm<sup>3</sup>/30 min (tabela 7). Dodatkowo w tabeli 7 przedstawiono wartości przewodności cieplnej płuczki inwersyjnej o stosunku o/w – 80 : 20 obciążonej do gęstości 1600 kg/m<sup>3</sup> barytem oraz płuczki solno-barytowej. Przewodność cieplna inwersyjnej płuczki wiertniczej wynosiła 0,1905 W/m·K, a solno-barytowej: 0,5906 W/m·K (tabela 7, rysunek 7).

### Wnioski

1. Współczynnik przewodności cieplnej zależy od wielu czynników, między innymi od składu i właściwości płuczki wiertniczej oraz od rodzajów zastosowanych środków do regulowania gęstości, parametrów reologiczno-strukturalnych, filtracji i właściwości inhibicyjnych.
2. Jednym z głównych czynników decydujących o przewodności cieplnej płuczek wiertniczych jest rodzaj zastosowanej cieczy bazowej do jej sporządzenia. Najniższą przewodność cieplną, wynoszącą 0,1905 W/m·K, stwierdzono w przypadku płuczki inwersyjnej na osnowie oleju. Płuczka solno-barytowa na osnowie roztworu NaCl o pełnym zasoleniu charakteryzowała się przewodnictwem cieplnym wynoszącym

- 0,5906 W/m·K. Natomiast najwyższą wartością współczynnika przewodności cieplnej, wynoszącą 0,6264 W/m·K, cechowała się płuczka potasowo-polimerowa (tabela 7).
- Przewodnictwo cieplne cieczy wiertniczych zależne jest również od rodzaju i zawartości soli. Wraz ze wzrostem zasolenia płuczki następuje obniżenie współczynnika przewodzenia ciepła. Przy pełnym zasoleniu płuczki NaCl współczynnik przewodności cieplnej obniżył się o 5,52% w stosunku do płuczki bez udziału soli (tabela 7).
  - Regulowanie gęstości płuczek za pomocą materiałów obciążających wpływa na poprawę przewodności cieplnej płuczek. Płuczki charakteryzujące się większą gęstością, a tym samym większą zawartością materiału obciążającego w objętości płuczki posiadają lepszą charakterystykę cieplną (tabele 6 i 7).
  - Współczynnik przewodności cieplnej zależny jest również od rodzaju zastosowanego materiału obciążającego. Przeprowadzone badania obciążania płuczek wykazały, że największy wpływ na zwiększenie przewodności cieplnej miały materiały obciążające oparte na związkach żelaza, takie jak np. ferrohem. Najwyższą wartość przewodności cieplnej, wynoszącą 1,1927 W/m·K, uzyskano dla płuczki obciążonej do gęstości 2000 kg/m<sup>3</sup> za pomocą ferrohemu. Przewodność cieplna płuczki obciążonej do gęstości 2000 kg/m<sup>3</sup> barytem była niższa o 42,2% (tabela 7).
  - Przeprowadzone badania płuczek z dodatkiem nanokompozytów wykazały, że wzrost przewodnictwa cieplnego zależny jest od rodzaju wykorzystanych nanododatków, ich właściwości oraz od ich stężenia w płuczce wiertniczej. Spośród przebadanych nanododatków najlepsze efekty uzyskano przy zastosowaniu nanorurek węglowych. Dodatek 2,0% nanorurek węglowych spowodował wzrost przewodności cieplnej płuczki o 5,4% oraz zwiększenie parametrów reologiczno-strukturalnych płuczki i obniżenie filtracji.
  - Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że jednym z materiałów, za pomocą których można zwiększać przewodność cieplną płuczek wiertniczych, jest grafit. Grafit dodany do płuczki w ilości 3% wpłynął na zwiększenie współczynnika przewodności cieplnej o około 11%. Wraz ze wzrostem stężenia grafitu wzrasta przewodność cieplna płuczek. Przy dodatku 10% grafitu obserwujemy zwiększenie przewodności cieplnej o 86% oraz wzrost lepkości plastycznej płuczki do 32 mPa·s i granicy płynięcia do 15,3 Pa (tabela 5). Przy wyższych stężeniach grafitu w płuczce następuje dalszy wzrost przewodności cieplnej oraz gwałtowny wzrost parametrów reologiczno-strukturalnych.
  - Modyfikacja składu wodnodispersyjnej płuczki wiertniczej o gęstości 1600 kg/m<sup>3</sup> poprzez zastosowanie 0,5% nanorurek węglowych i zmianę rodzaju materiału obciążającego

- opartego na związkach żelaza (ferrohem) wpłynęła na poprawę przewodności cieplnej o 38,4% w stosunku do płuczki bazowej. Płuczka z dodatkiem nanorurek węglowych charakteryzowała się lepkością plastyczną 61 mPa·s, granicą płynięcia 28,2 Pa oraz filtracją 1,2 cm<sup>3</sup>/30 min.
- Najwyższą wartością przewodności cieplnej, wynoszącą 1,1911 W/m·K, charakteryzowała się płuczka obciążona do gęstości 1600 kg/m<sup>3</sup> ferrohemem i zawierająca dodatek 10% grafitu. Modyfikacja składu płuczki poprzez dodatek grafitu i zmianę materiału obciążającego pozwoliła na poprawę przewodności cieplnej płuczki o 90,1% w stosunku do płuczki bazowej. Opracowana płuczka cechowała się lepkością plastyczną wynoszącą 59 mPa·s, granicą płynięcia 27,2 Pa i filtracją 1,6 cm<sup>3</sup>/30 min.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza możliwości regulowania przewodności cieplnej płuczek wiertniczych przeznaczonych do wierceń geotermalnych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0025/KW/2022, nr archiwalny: DK-4101-0013/2022.

#### Literatura

- Aftab A., Ismail A.R., Ibupoto Z.H., Akeiber H., Malghani M.G.K., 2017. Nanoparticles based drilling muds a solution to drill elevated temperature wells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76: 1301–1313. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.050.
- Beg M., Kesarwani H., Sharma S., 2019. Effect of CuO and ZnO Nanoparticles on Efficacy of Poly 4-Styrenesulfonic Acid-Co-Maleic Acid Sodium Salt for Controlling HPHT Filtration. *International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE*, November 2019. DOI: 10.2118/197703-MS.
- Bavoh C.B., Adam J.M., Lal B., 2022. Specific heat capacity of xanthan gum/PAC polymer-based drilling fluids: An experimental and correlation study. *Materials Today: Proceedings*, 57: 1002–1007.
- Cardona L.F., Forero L.A., Velásquez J.A., 2022. A group contribution method to model the thermal conductivity of pure substances. *Fluid Phase Equilibria*, 564: 113592. DOI: 10.1016/j.fluid.2022.113592.
- Cheraghian G., 2021. Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art. *Journal of Materials Research and Technology*, 13: 737–753. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.04.089.
- Cheraghian G., Wu Q., Mostofi M., Li M.-C., Afrand M., Sangwai J.S., 2018. Effect of a novel clay/silica nanocomposite on water-based drilling fluids: Improvements in rheological and filtration properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 555: 339–350. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.06.072.
- Duangthongsuk W., Wongwises S., 2009. Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(4): 706–714. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2009.01.005.
- Espinosa-Paredes G., Garcia-Gutierrez A., 2004. Thermal behaviour of geothermal wells using mud and air–water mixtures as drilling fluids. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10): 1513–1527. DOI: 10.1016/j.enconman.2003.08.023.
- Fazelabdolabadi B., Khodadadi A.A., Sedaghatzadeh M., 2015. Thermal and rheological properties improvement of drilling fluids using functionalized carbon nanotubes. *Applied Nanoscience*, 5: 651–659. DOI: 10.1007/s13204-014-0359-5.
- Gudarzifar H., Sabbaghi S., Rezvani A., Saboori R., 2020. Experimental investigation of rheological & filtration properties and thermal

- conductivity of water-based drilling fluid enhanced. *Powder Technology*, 368: 323–341. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.049.
- Hong S.H., Jo H.J., Choi M.-J., Jang H.W., Kim Y.J., Hwang W.R., Kim S.Y., 2019. Influence of MoS<sub>2</sub> Nanosheet Size on Performance of Drilling Mud. *Polymers*, 11(2): 321. DOI: 10.3390/polym11020321.
- Ikram R., Badrul M.J., Vejpravova J., Choudhary M.I., Chowdhury Z.Z., 2020. Recent Advances of Graphene-Derived Nanocomposites in Water-Based Drilling Fluids. *Nanomaterials*, 10(10): 2004. DOI: 10.3390/nano10102004.
- Kazemi-Beydokhti A., Hajiabadi S.H., 2018. Rheological investigation of smart polymer/carbon nanotube complex on properties of water-based drilling fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 556(5): 23–29. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.07.058.
- Kędzierski M., Rzepka M., Kremieniewski M., 2020. Możliwości zastosowania nanorurek węglowych (CNTs) w technologii zaczynów cementowych. *Nafta-Gaz*, 76(2): 110–118. DOI: 10.18668/NG.2020.02.05.
- Kim S.H., Choi S.R., Kim D., 2007. Thermal Conductivity of Metal-Oxide Nanofluids: Particle Size Dependence and Effect of Laser Irradiation. *Journal Heat Transfer*, 129(3): 298–307. DOI: 10.1115/1.2427071.
- Kole M., Dey T.K., 2012. Thermophysical and pool boiling characteristics of ZnO-ethylene glycol nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 62: 61–70. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.002.
- Liu J.-P., Zhang X.-F., Zhang W.-Ch., Lv K.H., Bai Y.-R., Wang J.-T., Huang X.-B., Jin J.-F., Sun J.-S., 2022. Carbon nanotube enhanced water-based drilling fluid for high temperature and high salinity deep resource development. *Petroleum Science*, 19: 916–926. DOI: 10.1016/j.petsci.2021.09.045.
- López-Acosta N.P., Zaragoza-Cardiel A.I., Barba-Galdámez D.F., 2021. Determination of Thermal Conductivity Properties of Coastal Soils for GSHPs and Energy Geosturcture Applications in Mexico. *Energies*, 14, 5479. DOI: 10.3390/en14175479.
- Mohamed A., Salehi S., Ahmed R., 2021. Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: A review. *Geothermics*, 93: 102066. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102066.
- Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C., 2008. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 47: 560–568.
- Namburu P.K., Kulkarni D.P., Misra D., Das D.K., 2007. Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2): 397–402. DOI: 10.1016/j.expthermflusc.2007.05.001.
- Pandey H., Gupta N.K., 2022. A descriptive review of the thermal transport mechanisms in mono and hybrid nanofluid-filled heat pipes and current developments. *Thermal Science and Engineering Progress*, 31: 101281. DOI: 10.1016/j.tsep.2022.101281.
- Prałat K., Kubissa W., Jaskulski R., Ciemnicka J., Pilarczyk S., 2019. Wpływ wybranych mikrododatków na przewodnictwo cieplne oraz mikrostrukturę powierzchni modyfikowanych gipsów. *Architectura*, 18(1): 69–75. DOI: 10.22630/ASPA.2019.18.1.8.
- Saboori R., Sabbaghi S., Kalantariasl A., 2019. Improvement of rheological, filtration and thermal conductivity of bentonite drilling fluid using copper oxide/polyacrylamide nanocomposite. *Powder Technology*, 353: 257–266. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.05.038.
- Saffari H.R.M., Soltani R., Alaei M., Soleymani M., 2018. Tribological Properties of Water-Based Drilling Fluids with Borate Nanoparticles as Lubricant Additives. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171: 253–259. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.07.049.
- Santoyo E., Santoyo-Gutiérrez S., García A., Espinosa G., Moya S.L., 2001. Rheological property measurement of drilling fluids used in geothermal wells. *Applied Thermal Engineering*, 21(3): 283–302. DOI: 10.1016/S1359-4311(00)00003-X.
- Sharma M.M., Zhang R., Chenevert M.E., Ji L., Guo Q., Friedheim J., 2012. A new family of nanoparticle based drilling fluids. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, October 2012*. DOI: 10.2118/160045-MS.
- Veisi E., Hajipour M., Delijani E.B., 2020. Experimental study on thermal, rheological and filtration control characteristics of drilling fluids: effect of nanoadditives. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 75(36): 10. DOI: 10.2516/ogst/2020033.
- Wu W.-T., Aubry N., Antaki J.F., McKoy M.L., Massoudi M., 2017. Heat Transfer in a Drilling Fluid with Geothermal Applications. *Energies*, 10: 1349. DOI: 10.3390/en10091349.
- Xie H., Fujii M., Zhang X., 2005. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(14): 2926–2932. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.040.
- Xuan Y., Li Q., 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1): 58–64. DOI: 10.1016/S0142-727X(99)00067-3.
- Yu W., Xie H., Chen L., Li Y., 2009. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid. *Thermochemica Acta*, 491(1): 92–96. DOI: 10.1016/j.tca.2009.03.007.
- Zhang Z., Xiong Y., Pu H., Sun Z., 2021. Effect of the variations of thermophysical properties of drilling fluids with temperature on wellbore temperature calculation during drilling. *Energy*, 214: 119055. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119055.
- Zhong H., Guan Y., Qiu Z., Feng J., Liu W., Wan Y., Zhang Y., 2021. Improvement of Rheological and Filtration Properties of Water-Based Drilling Fluids Using Bentonite-Hydrothermal Carbon Nanocomposites Under the Ultra-High Temperature and High Pressure Conditions. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Virtual, October 2021*. DOI: 10.2118/205539-MS.
- Zima G., 2017. Analiza wpływu nanomateriałów na właściwości osadu filtracyjnego. *Nafta-Gaz*, 63(5): 312–320. DOI: 10.18668/NG.2017.05.03.



Mgr inż. Sławomir BŁAŻ  
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie  
Technologii Wiercenia  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [slawomir.blaz@inig.pl](mailto:slawomir.blaz@inig.pl)



Dr inż. Grzegorz ZIMA  
Kierownik Zakładu Technologii Wiercenia  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [grzegorz.zima@inig.pl](mailto:grzegorz.zima@inig.pl)



Mgr inż. Bartłomiej JASIŃSKI  
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie  
Technologii Wiercenia  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [bartlomiej.jasinski@inig.pl](mailto:bartlomiej.jasinski@inig.pl)