

Biowęgiel jako innowacyjny środek mostkujący w płuczkach wiertniczych

Biochar as an innovative bridging agent in drilling muds

Bartłomiej Jasiński, Grzegorz Zima, Sławomir Błaż

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Biowęgiel powstaje w procesie pirolizy w temperaturze 350–700°C przy ograniczonym dostępie powietrza z pozostałości biomasowych pochodzących z produkcji drzewnej, przetwórstwa owocowo-warzywnego czy produkcji rolnej. Do jego produkcji wykorzystuje się także wysegregowane biodegradowalne odpady komunalne czy też osady ściekowe. Z uwagi na właściwości fizyczne biowęgla, takie jak duża wytrzymałość oraz możliwość uzyskiwania różnych granulacji, przeprowadzono badania nad możliwością zastosowania tego materiału w technologii płuczkowej jako materiału blokującego. Zastosowanie w płuczce wiertniczej zmielonego biowęgla o odpowiednio dobranych rozmiarach ziaren może pozwolić na utworzenie na ścianie otworu wiertniczego szczelnego osadu, co z kolei może przyczynić się do ograniczenia inwazji filtratu z płuczki do strefy przyodwiertowej. W artykule zaprezentowano wyniki badań nad wpływem dodatku biowęgla o zróżnicowanych pod względem wielkości ziaren frakcjach na parametry technologiczne płuczek wiertniczych ze szczególnym uwzględnieniem filtracji. W pierwszej kolejności przeprowadzono dobór składu płuczki wiertniczej, której parametry reologiczne zapewnią zawieszenie fazy stałej w postaci środków blokujących, tj. biowęgla oraz tradycyjnego blokatora węglanowego. Po opracowaniu płuczki bazowej jej skład modyfikowano poprzez dodatek różnych konfiguracji środków blokujących, ze względu na ich budowę chemiczną, jak i wielkość ziaren. Tak zmodyfikowane płuczki poddano badaniom właściwości technologicznych, takich jak: parametry reologiczne, filtracja, pH. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań w realizowanej pracy określono, które z badanych składów są najbardziej efektywne w obniżaniu filtracji płuczek wiertniczych.

Słowa kluczowe: biowęgiel, płuczka wiertnicza, materiał mostkujący, filtracja.

ABSTRACT: Biochar is produced by pyrolysis at 350–700°C under limited air supply from biomass derived from wood production, fruit and vegetable processing, or agricultural operations. Segregated biodegradable municipal waste or sewage sludge is also used in its production. Due to the physical properties of biochar, such as high strength and the possibility of obtaining various grain sizes, research has been conducted into the potential use of this material in drilling mud technology as a bridging agent. The use of ground biochar with appropriately sized grains in drilling mud may enable the formation of an impenetrable filter cake on the borehole wall, which, in turn, can help reduce the invasion of mud filtrate into the near-wellbore zone. This article presents the results of a study on the effect of adding biochar with different grain size fractions on the technological parameters of drilling muds, with particular emphasis on filtration. Initially, the composition of the drilling mud was selected to ensure rheological parameters that allow for the suspension of the solid phase in the form of bridging agents, i.e. biochar and carbonate blocker. Once the base mud was developed, its composition was modified by adding different configurations of bridging agents, taking into account their chemical structure and grain size. The modified muds were subjected to tests of technological properties, including rheological parameters, filtration, and pH. Based on the results of the study, the compositions most effective in reducing the filtration of drilling muds were identified.

Key words: biochar, drilling mud, bridging agent, filtration

Wstęp

Obniżenie przepuszczalności skał zbiornikowych w rejonie przyodwiertowym często prowadzi do znacznego spadku wydajności wydobywania węglowodorów. Może do niego dojść na różnych etapach, takich jak wiercenie, rdzeniowanie, uzbrajanie otworu, eksploatacja, rekonstrukcja czy stosowanie wtórnych

metod intensyfikacji wydobywania. W trakcie wiercenia występuje kilka kluczowych czynników odpowiedzialnych za to zjawisko (Mungan, 1965; Rahman i in., 1995; Caenn i in., 2011; Stec, 2017; Alvarez i in., 2019; Uliasz, 2021):

- reakcja fazy wodnej z lepiszczem ilastym, prowadząca do pęcznienia lub dyspersji cząstek koloidalnych, które mogą migrować wraz z wodą złożową i blokować pory;

Autor do korespondencji: B. Jasiński, e-mail: bartlomiej.jasinski@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 13.02.2025 r. Zatwierdzono do druku: 31.03.2025 r.

- zatykanie kanalików porowych przez cząstki stałe pochodzące z płuczki wiertniczej;
- zablokowanie przepływu przez fazę płynną w wyniku wprowadzenia wody do formacji podczas wiercenia (tzw. blokada wodna);
- powstawanie nierozpuszczalnych osadów wskutek reakcji zasadowego filtratu płuczki wiertniczej ze zmineralizowaną wodą złożową.

Spadek przepuszczalności strefy przyodwiertowej może nastąpić również samoistnie w wyniku długotrwałego dopływu płynu złożowego z warstwy produktywnej do odwiertu. W zależności od stopnia obniżenia ciśnienia i temperatury w otoczeniu odwiertu podczas przepływu medium złożowego – może dojść do wytrącania się parafin i asfaltów lub tworzenia emulsji, co prowadzi do kolmatacji porowatego ośrodka i wtórnego uszkodzenia jego przepuszczalności (Uliasz, 2021).

Aby zminimalizować uszkodzenie przepuszczalności strefy przyodwiertowej, do cieczy wiertniczych dodaje się specjalnie dobrane środki polimerowe oraz fazę stałą w postaci środków mostkujących (blokatorów) o rozmiarach cząstek dopasowanych do przewiercanej skały. Ich kluczową funkcją jest zabezpieczenie strefy przyodwiertowej poprzez tworzenie tymczasowego osadu na ścianie odwiertu, który ogranicza przenikanie filtratu cieczy wiertniczej do porów skał zbiornikowych. Zastosowanie tych materiałów pozwala na kontrolowanie parametrów takich jak filtracja i gęstość płuczki. Przy projektowaniu jej składu należy precyzyjnie dobrać ilość soli i środków mostkujących, aby uzyskać gęstość odpowiednią do warunków geologiczno-złożowych (Uliasz, 2021).

W technologii płuczkowej stosuje się różne rodzaje blokatorów, a do najważniejszych należą:

- blokatory organiczne – obejmują one między innymi celulozowe środki uszczelniające, które powstają w wyniku rozdrobnienia skorupki orzeszków ziemnych i przekształcenia ich w proszek celulozowy. Wyróżniają się chemiczną obojętnością, nierozpuszczalnością w wodzie, odpornością na temperatury do 200°C oraz zdolnością do biodegradacji (Raczkowski i Półchłopek, 1998). Stosuje się je zarówno w płuczkach wiertniczych używanych do dowiercania, jak i w cieczach roboczych o różnym poziomie zasolenia. Ich skuteczność zwiększają koloidy ochronne na bazie skrobi lub celulozy oraz biopolimery, które regulują właściwości reologiczne, strukturalne i filtracyjne cieczy (Raczkowski i Półchłopek, 1998, Uliasz, 2021);
- blokatory nieorganiczne – jednym z najczęściej wykorzystywanych środków z tej grupy jest węglan wapnia (CaCO_3), który występuje naturalnie w minerałach takich jak kalcyt oraz w skałach, w tym w dolomicie, kredzie i marmurze. W technologii płuczkowej pozyskuje się go poprzez

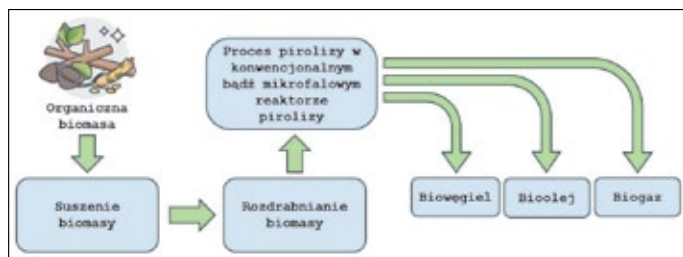
mielenie marmuru. Blokatory węglanowe charakteryzują się zróżnicowaną ziarnistością, od kilku mikrometrów do 3 milimetrów, a właściwy dobór wielkości cząstek umożliwia efektywne uszczelnienie osadu filtracyjnego (Best Drilling Chemicals; Energy Glossary; Jasiński, 2018; Polski Serwis Płynów Wiertniczych);

- nanomateriały – jednym z najczęściej stosowanych w przemyśle nanomateriałów jest ditlenek krzemu (SiO_2). Jego powszechna dostępność oraz unikatowe właściwości sprawiają, że znajduje szerokie zastosowanie. Krzemionka cechuje się wysoką odpornością na wodę i wysokie temperatury, a także doskonałymi właściwościami izolacyjnymi. Jest chemicznie obojętna i reaguje jedynie z wrzącymi, stężonymi roztworami KOH i NaOH, stopionymi Na_2CO_3 i K_2CO_3 oraz fluorowodorem i jego wodnymi roztworami (Dębińska, 2015; Jankiewicz i in., 2010; Zima, 2017). Liczne badania potwierdzają skuteczność nanomateriałów w zmniejszaniu filtracji płuczek wiertniczych oraz w ochronie naturalnej przepuszczalności skał zbiornikowych (Adel i in., 2014; Contreras i in., 2014; Ponmani i in., 2016; Salih i in., 2016; Salih i Bilgesu, 2017).

Materiałem, który ze względu na swoje właściwości fizyczne mógłby znaleźć zastosowanie w płuczkach wiertniczych jako środek mostkujący, jest biowęgiel, który do tej pory uważany był głównie za produkt mający zastosowanie w szeroko pojętej ochronie środowiska. Uważa się, że może on pomóc rozwiązać problemy związane z rolnictwem, degradacją ekosystemów czy zmianami klimatycznymi. Sama koncepcja wykorzystania biowęgla nie jest nowa, gdyż już prehistoryczne społeczeństwa zajmowały się celowym spalaniem biomasy, aby wzbogacać glebę w węgiel drzewny, co znacznie poprawiało jej żyzność (Glaser i in., 2001; Ingle i in., 2024). Problemy, z jakimi stykamy się współcześnie, takie jak wyjałowienie gleb czy zmiany klimatyczne, powodują ponowny wzrost zainteresowania biowęgłem, który dzięki właściwościom takim jak umożliwienie sekwestracji węgla czy wzbogacenie gleb w składniki odżywcze może odegrać ważną rolę w działaniach na rzecz zrównoważonego rozwoju (Jeffery i in., 2011).

Wytwarzanie biowęgla

Biowęgiel to drobnoziarnisty materiał stały o wysokiej zawartości węgla organicznego i związków mineralnych powstający w wyniku pirolizy biomasy, czyli jej termicznego rozkładu w wysokiej temperaturze, przy ograniczonym dostępie tlenu. Proces ten prowadzi do przemiany organicznych substancji, takich jak drewno, resztki roślinne czy odpady rolnicze, w produkty w postaci stałej (biowęgiel), ciekłej (bioolej) oraz gazowej (biogaz) (Jerzak i in., 2024).



Rysunek 1. Schemat przedstawiający proces powstawania biowęglu i innych produktów pirolizy biomasy

Figure 1. Diagram showing the process of producing biochar and other biomass pyrolysis products

Na skład i właściwości fizykochemiczne otrzymywanego biowęglu, a więc udział węgla, popiołów, mikro- i makroelementów oraz metali ciężkich, wpływa kilka głównych czynników. Pierwszym z nich jest rodzaj biomasy użytej w procesie produkcji. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że zawartość pierwiastka węgla w biowęglu zmienia się w zakresie od około 50% do około 90%. Najwyższa zawartość węgla występuje w biowęglu pochodzącym z biomasy drzewnej, a niższe wartości cechują biowęgiel pochodzący z agrobio-masy (Bis, 2012; Medyńska-Juraszek, 2016; Krzyszcak i in., 2022). Kluczowy wpływ na skład biowęglu, oprócz rodzaju biomasy, ma również temperatura procesu pirolizy. Zwykle wyższa temperatura prowadzi do wyższej zawartości węgla w biowęglu, ponieważ proces ten sprzyja usuwaniu większej ilości lotnych związków organicznych i zwiększa koncentrację węgla. Ze względu na wysokość temperatury pirolizy można oczekiwać następujących produktów:

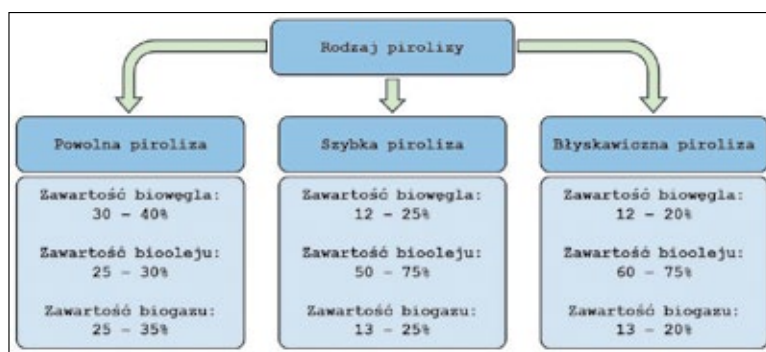
- temperatura pirolizy poniżej 400°C – zawartość węgla w biowęglu jest mniejsza, ponieważ proces jest mniej za-awansowany i nie dochodzi do pełnego rozkładu biomasy. Powstały w takich warunkach biowęgiel cechuje się większą reaktywnością, jego struktura jest bardziej porowata, ale mniej stabilna;
- temperatura pirolizy w zakresie 400–600°C – uzyskuje się biowęgiel o umiarkowanej zawartości węgla (około 50–70%). W tym przedziale piroliza prowadzi do poprawy stabilności chemicznej materiału, zachowana jest umiar-kowana porowatość;
- temperatura pirolizy powyżej 600°C – zawartość węgla w biowęglu może wynosić nawet 80–90%. Piroliza w tym zakresie prowadzi do uzyskania stabilnego, niskoreaktyw-nego biowęglu, co czyni go idealnym do długoterminowej sekwestracji węgla i zastosowań w ochronie środowiska. W wyniku tej obróbki biowęgiel staje się bardziej odporny na rozkład, ale ma mniejszą porowatość (Elkhlifi i in., 2023; Ingle i in., 2024; Prochnow i in., 2024).

Kolejnym bardzo ważnym czynnikiem, na podstawie któ-rego można wyróżnić różne rodzaje pirolizy, jest szybkość nagrzewania. Z uwagi na ten parametr rozróżnia się pirolizę powolną, szybką i błyskawiczną. Każda z tych metod różni się parametrami takimi jak temperatura, czas przebywania bio-masy w stanie stałym, szybkość nagrzewania, rozmiar cząstek oraz proporcje uzyskiwanych produktów. W tabeli 1 zawarto charakterystyczne parametry dla każdego z rodzajów pirolizy. Z kolei na rysunku 2 przedstawiono zawartość produktów procesu pirolizy w zależności od szybkości nagrzewania.

Tabela 1. Wielkości charakterystycznych parametrów w zależności od rodzaju pirolizy (Aboelela i in., 2023)

Table 1. Values of characteristic parameters depending on the type of pyrolysis (Aboelela et al., 2023)

Parametr	Powolna piroliza	Szybka piroliza	Błyskawiczna piroliza
Temperatura [°C]	550–950	850–1250	900–1200
Szybkość nagrzewania [°C/s]	0,1–1,0	10–200	>1000
Czas przebywania w temperaturze [s]	300–550	0,5–10	<1
Rozmiar cząstek	5–50	<1	<0,5



Rysunek 2. Zawartość produktów procesu pirolizy w zależności od szybkości nagrzewania (Demirbas i Arin, 2002; Tripathi i in., 2016)

Figure 2. Product content of pyrolysis process depending on heating rate (Demirbas and Arin, 2002; Tripathi et al., 2016)

Powolna piroliza to metoda przetwarzania biomasy o długiej historii. Stosowana jest głównie wtedy, gdy celem jest uzyskanie jak największej ilości biowęgla jako głównego produktu. Proces przebiega w umiarkowanych temperaturach (300–500°C) przy wolnym tempie nagrzewania (0,1–1°C/s) oraz długim czasie przebywania (od kilku minut do godzin). Dzięki takim warunkom biomasa ma wystarczająco dużo czasu na wtórne reakcje karbonizacji, co prowadzi do wysokiej wydajności biowęgla oraz niskiej ilości biooleju i gazu syntezowego (Manya, 2012; Sharma i in., 2024).

Szybka piroliza jest metodą stosowaną zwłaszcza wtedy, gdy głównym celem jest produkcja biooleju, który może stanowić od 50% do 75% wytworzonych produktów. Pozostałe produkty, a więc biowęgiel i biogaz, mają niższy udział, odpowiednio 12–25% i 13–25%. W tym procesie wtórne reakcje rozkładu są minimalizowane, ponieważ opary powstające w wyniku szybkiego rozkładu biomasy są natychmiast transportowane do układu kondensacji. Kluczowym wymogiem tego rodzaju pirolizy jest zastosowanie materiału wsadowego o niewielkim rozmiarze cząstek, co umożliwia szybkie i efektywne ogrzewanie biomasy (Bridgwater, 2012; Sharma i in., 2024).

Błyskawiczna piroliza stanowi bardziej zaawansowaną odmianę szybkiej pirolizy. Charakteryzuje się ona ekstremalnie szybkim ogrzewaniem biomasy, osiągającym prędkości rzędu 1000°C/s lub więcej. W tym procesie biomasa jest podgrzewana do temperatury od 900°C do 1200°C w bardzo krótkim czasie, poniżej 1 sekundy. Szybkie nagrzewanie w wysokich temperaturach i krótki czas przebywania lotnych składników sprzyjają produkcji biooleju kosztem zmniejszonej produkcji biowęgla. Jednym z głównych wyzwań przemysłowego zastosowania pirolizy błyskawicznej jest trudność zaprojektowania reaktora, który umożliwiałby ultrakrótkie czasy przebywania biomasy przy zachowaniu bardzo wysokiego tempa ogrzewania (Demirbas i Arin, 2002; Tripathi i in., 2016).

Zastosowanie biowęgla

Z uwagi na liczne unikatowe właściwości fizykochemiczne biowęgla (m.in. wysoka przewodność elektryczna, rozwinięta wewnętrzna struktura porów, zdolność do adsorbowania wody, zapachów, toksyn i promieniowania elektromagnetycznego, jak również niska przewodność cieplna) staje się on interesującym obszarem badań, a przemysł biowęglowy ciągle się rozwija. Dostrzega się w nim potencjał w kontekście intensyfikacji OZE oraz gospodarki odpadami.

Lista aplikacji biowęgla i produktów modyfikowanych przy jego użyciu w różnych dziedzinach gospodarki (rysunek 3) jest szeroka i stale rośnie (Murawska i in., 2021; Wykorzystanie paliw z odpadów...).



Rysunek 3. Gałęzie przemysłu, w których biowęgiel znalazł zastosowanie

Figure 3. Industries in which biochar has found application

Zastosowanie biowęgla w rolnictwie i ogrodnictwie

Wykorzystanie biowęgla jako dodatku do gleby to efektywna metoda zarówno wprowadzania składników odżywczych (dzięki funkcji nośnika), jak i ich zatrzymywania (dzięki właściwościom adsorpcyjnym). Jednocześnie umożliwia sekwestrację węgla z atmosfery oraz stymuluje aktywność mikrobiologiczną gleby. Takie zastosowanie może przyczynić się do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych wynikającej z intensywnego stosowania nawozów, a także do poprawy jakości gleby, co w konsekwencji zwiększa plony (Sohi i in., 2010; Kalus i in., 2019).

Zastosowanie biowęgla w przemyśle spożywczym

Biowęgiel znalazł zastosowanie w przemyśle spożywczym ze względu na zdolności do adsorpcji, co umożliwia usuwanie toksyn i metali ciężkich. Dzięki swojej porowatej strukturze może być wykorzystywany w procesie filtracji wody lub w produkcji biosensorów, które służą do wykrywania patogenów w żywności. Ponadto biowęgiel może być wykorzystywany w tworzeniu ekologicznych, biodegradowalnych opakowań spożywczych. Jako dodatek do bioplastików poprawia ich wytrzymałość i elastyczność, a także wspomaga proces ich rozkładu po użyciu. Dodatkowo biowęgiel w opakowaniach spożywczych pomaga przedłużyć trwałość produktów, absorbując gazy, które przyspieszają ich psucie się, oraz ograniczając rozwój mikroorganizmów (Biochar).

Zastosowanie biowęgla w ochronie środowiska

Jednym z głównych powodów, dla których biowęgiel zyskuje na znaczeniu w ochronie środowiska, jest jego zdolność do sekwestracji węgla. Proces produkcji biowęgla polega na przekształceniu biomasy w węgiel przy użyciu wysokiej

temperatury w warunkach beztlenowych. Dzięki temu biowęgiel zawiera dużą ilość węgla, który jest stabilny przez długi czas i może być przechowywany w glebie przez długi okres, liczący nawet setki lat. Sprawia to, że biowęgiel stanowi efektywną metodę usuwania dwutlenku węgla z atmosfery. Kolejną zaletą biowęgla jest przyczynianie się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, w tym metanu i tlenu azotu, które są uwalniane podczas rozkładu biomasy w warunkach tlenowych, takich jak spalanie lub kompostowanie. Dzięki pirolizie proces rozkładu odbywa się w warunkach beztlenowych, co minimalizuje uwalnianie tych szkodliwych gazów do atmosfery.

Biowęgiel znalazł również zastosowanie w poprawie jakości wód i gleb dzięki zdolności do adsorpcji zanieczyszczeń, w tym metali ciężkich i pestycydów. Dzięki swojej porowatej strukturze biowęgiel jest skutecznym materiałem filtracyjnym, który może być używany do oczyszczania wód powierzchniowych i gruntowych ze szkodliwych substancji. Dodatkowo biowęgiel może być stosowany w systemach oczyszczania powietrza ze względu na zdolność do adsorbowania lotnych związków organicznych i innych zanieczyszczeń (Liu i in., 2015; Yadav i Ramakrishna, 2023).

Zastosowanie biowęgla w budownictwie

Rosnące zapotrzebowanie na materiały budowlane powoduje znaczne zużycie zasobów naturalnych i emisję gazów cieplarnianych. Duże znaczenie ma oszczędzanie ograniczonych zasobów naturalnych podczas produkcji materiałów budowlanych i redukcja emisji dwutlenku węgla w całym cyklu życia. Opracowanie nowych i zrównoważonych materiałów budowlanych o niskim lub nawet ujemnym śladzie węglowym jest skutecznym sposobem na osiągnięcie neutralności węglowej, co zwiększyło zainteresowanie biowęgłem społeczności naukowych i przemysłowych. Aby złagodzić kwestię znacznej emisji CO₂ związanej z cementem i betonem, w ostatnich latach intensywnie bada się zastosowanie biowęgla w budownictwie jako materiału o ujemnej emisji dwutlenku węgla (Zhang i in., 2022). Do najważniejszych kierunków zastosowania biowęgla w tej branży należą (Nan i DeVallance, 2017; Giorcelli i in., 2019a, 2019b; Shon et al., 2019; Wang i in., 2016):

- wypełniacze w betonie;
- materiały termoizolacyjne;
- polimerowo-węglowe materiały kompozytowe;
- kompozyty na bazie żywicy i węgla.

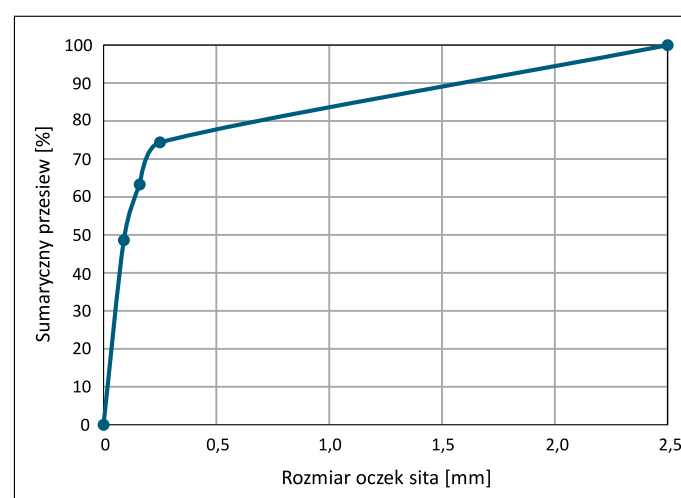
Omówienie wyników badań

Analiza sitowa biowęgla

W celu dokładnego rozpoznania składu granulometrycznego zastosowanego do badań biowęgla przeprowadzono analizę

sitową z użyciem wytrząsarki wibracyjnej. Metoda ta polega na mechanicznym rozdzielaniu i skatalogowaniu poszczególnych frakcji o określonych średnicach ziaren. Po zważeniu kolejnych klas ziarnowych pozostałych na danym sicie ustala się procentowy udział poszczególnych frakcji w badanej próbce w stosunku do całości, co pozwala na nakreślenie krzywej uziarnienia.

W tabeli 2 oraz na rysunku 4 przedstawiono rozkład rozmiarów cząstek biowęgla wytypowanego do realizacji badań. Ustalono, że największy udział ma frakcja o rozmiarze ziarna poniżej 0,09 mm – wynosi on 48,63%. Kolejną pod względem udziału w mieszaninie frakcją była ta o rozmiarze ziarna 0,25–2,5 mm (25,60%).



Rysunek 4. Krzywa granulometryczna biowęgla

Figure 4. Granulometric curve of biochar

Tabela 2. Rozkład rozmiarów cząstek biowęgla

Table 2. Particle size distribution of biochar

Zakres rozmiaru cząstek [mm]	Udział procentowy
<0,09	48,63
0,09–0,16	14,68
0,16–0,25	11,09
0,25–2,5	25,60
>2,5	0

Z uwagi na duże zróżnicowanie wielkości ziaren w biowęgłu postanowiono wyselekcjonować kilka frakcji i traktować je jak osobne środki. Przy użyciu wytrząsarki wibracyjnej oddzielono frakcje <0,09 mm, 0,09–0,16 mm oraz 0,16–0,25 mm. Frakcje te oznaczano w dalszych badaniach w następujący sposób (rysunki 5–8):

- frakcja <0,09 mm – BW1;
- frakcja 0,09–0,16 mm – BW2;
- frakcja 0,16–0,25 mm – BW3.



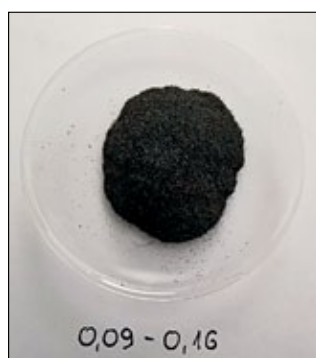
Rysunek 5. Biowęgiel

Figure 5. Biochar



Rysunek 6. Frakcja biowęgla o wielkości ziarna <0,09 mm

Figure 6. Fraction of biochar with grain size <0.09 mm



Rysunek 7. Frakcja biowęgla o wielkości ziarna 0,09–0,16 mm

Figure 7. Fraction of biochar with grain size 0.09–0.16 mm



Rysunek 8. Frakcja biowęgla o wielkości ziarna 0,16–0,25 mm

Figure 8. Fraction of biochar with grain size 0.16–0.25 mm

Opracowanie składu płuczki bazowej

Płuczka zastosowana do badań musiała charakteryzować się wystarczająco wysokimi parametrami reologiczno-strukturalnymi, aby jej struktura po dodaniu środków blokujących w postaci trzech frakcji biowęgla, a więc BW1, BW2 oraz BW3, pozostawała stabilna, a środki te nie ulegały sedymentacji. Przewidywano, że z uwagi na największy rozmiar cząstek najtrudniejsza do zawieszenia w płuczce będzie frakcja biowęgla oznaczona jako BW3 (ziarna o średnicy 0,16–0,25 mm).

Do opracowania optymalnego składu płuczki wykorzystano aparat Turbiscan Tower, który umożliwia bieżące śledzenie stabilności maksymalnie sześciu próbek jednocześnie. Pomiar prowadzono w temperaturze 25°C przez 24 godziny. Do oceny stabilności płuczki posłużono się współczynnikiem TSI (ang. *Turbiscan Stability Index*). Jest to bezwymiarowy, obliczany automatycznie dla każdej badanej próbki przez aparat współczynnik, który pozwala w prosty sposób ocenić globalną niestabilność testowanej cieczy. Przyjęto, że stabilna ciecz, nieulegająca takim zjawiskom jak sedymentacja czy śmietankowanie, powinna charakteryzować się indeksem TSI mniejszym niż 1.

Przetestowano łącznie trzy składy płuczek, różniące się zawartością biopolimeru XCD, którego stężenie w płuczce 1 wynosiło 0,2%, w płuczce 2 – 0,25%, a w płuczce 3 – 0,3%. Do każdej z przygotowanych płuczek dodawano wytypowane środki mostkujące w stężeniu 5,0%. Na podstawie uzyskanych wartości współczynnika TSI oceniono, który skład płuczki gwarantuje najwyższą stabilność i najmniejsze ryzyko wystąpienia zjawiska sedymentacji. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Na rysunku 9 zestawiono wartości współczynnika TSI wszystkich testowanych płuczek po 24-godzinny pomiarze. Można zauważyć, że niezależnie od zawartości biopolimeru XCD oraz zastosowanej frakcji biowęgla wszystkie przetestowane próbki charakteryzowały się wysoką stabilnością w czasie, na co wskazywała niska wartość współczynnika TSI. Żadna z próbek nie przekroczyła założonego kryterium (wartości 1), które wskazywałoby na niewystarczającą stabilność. Również wizualna ocena próbek po 24 godzinach pozwoliła stwierdzić, że charakteryzowały się one bardzo dobrą stabilnością. W związku z uzyskanymi bardzo podobnymi wynikami do wytypowania składu płuczki do dalszych badań posłużono się średnią wartością z trzech pomiarów (kolejno z dodatkiem BW1, BW2 oraz BW3). W ten sposób ustalono, że w kolejnych badaniach jako skład bazowy użyta zostanie płuczka nr 2.

Określenie parametrów technologicznych płuczek modyfikowanych różnymi materiałami mostkującymi

Kolejny etap badań obejmował określenie parametrów technologicznych płuczek zmodyfikowanych różnymi frakcjami

Tabela 3. Skład i parametry testowanych płuczek

Table 3. Composition and parameters of tested muds

Skład płuczki		Gęstość [g/cm ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica plynięcia [Pa]	Wytrzyma- łość struk- turalna I / II [Pa]	Filtracja API [cm ³]	pH	TSI
			η_{pl}	η_s	τ_y				
Biocyd Biopolimer CMC LV PAC LV Skrobia KCl	0,1% 0,2% 2,0% 0,1% 2,0% 5,0%	1,05	34	49,0	14,4	2,0 / 3,1	9,6	9,7	–
Płuczka 1 + BW1	5,0%	1,06	40	57,0	16,3	2,8 / 3,3	4,4	8,8	0,35
Płuczka 1 + BW2	5,0%	1,06	40	55,0	14,4	2,4 / 2,9	6,2	8,9	0,67
Płuczka 1 + BW3	5,0%	1,06	40	57,5	16,8	2,6 / 3,5	8,2	8,8	0,58
Biocyd Biopolimer CMC LV PAC LV Skrobia KCl	0,10% 0,25% 2,00% 0,10% 2,00% 5,00%	1,05	34	49,5	14,8	2,4 / 3,5	9,2	9,6	–
Płuczka 2 + BW1	5,0%	1,06	42	62,5	19,6	3,0 / 4,2	4,2	8,8	0,52
Płuczka 2 + BW2	5,0%	1,06	42	63,5	20,6	3,1 / 4,4	6,4	8,9	0,55
Płuczka 2 + BW3	5,0%	1,06	42	62,5	19,6	3,0 / 4,4	8,0	8,9	0,31
Biocyd Biopolimer CMC LV PAC LV Skrobia KCl	0,1% 0,3% 2,0% 0,1% 2,0% 5,0%	1,05	34	50,5	15,8	2,7 / 4,4	9,2	9,6	–
Płuczka 2 + BW1	5,0%	1,06	38	55,0	16,3	2,5 / 4,0	4,6	8,7	0,40
Płuczka 2 + BW2	5,0%	1,06	41	59,5	17,7	2,8 / 4,2	6,2	8,7	0,58
Płuczka 2 + BW3	5,0%	1,06	39	59,5	19,6	2,8 / 4,2	8,6	8,8	0,65

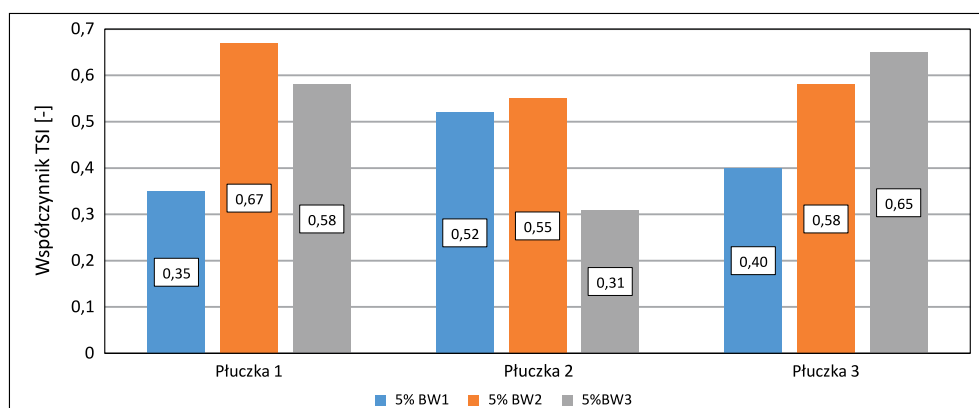

Rysunek 9. Wartości współczynnika TSI badanych płuczek po 24 godzinach

Figure 9. TSI values of the tested muds after 24 hours

biowęgla oraz blokaterem węglanowym M25. Przygotowano próbki na bazie płuczki bazowej zawierające materiały mostkujące w następujących stężeniach:

- BW1 (frakcja o średnicy ziarna mniejszej niż 0,09 mm) – 2,5%, 5,0%, 7,5%;
- BW2 (frakcja o średnicy ziarna w zakresie 0,09–0,16 mm) – 2,5%, 5,0%, 7,5%;
- BW3 (frakcja o średnicy ziarna w zakresie 0,16–0,25 mm) – 2,5%, 5,0%, 7,5%;
- biowęgiel nieprzesiewany – 2,5%, 5,0%, 7,5%;
- blokator węglanowy M25 – 2,5%, 5,0%, 7,5%.

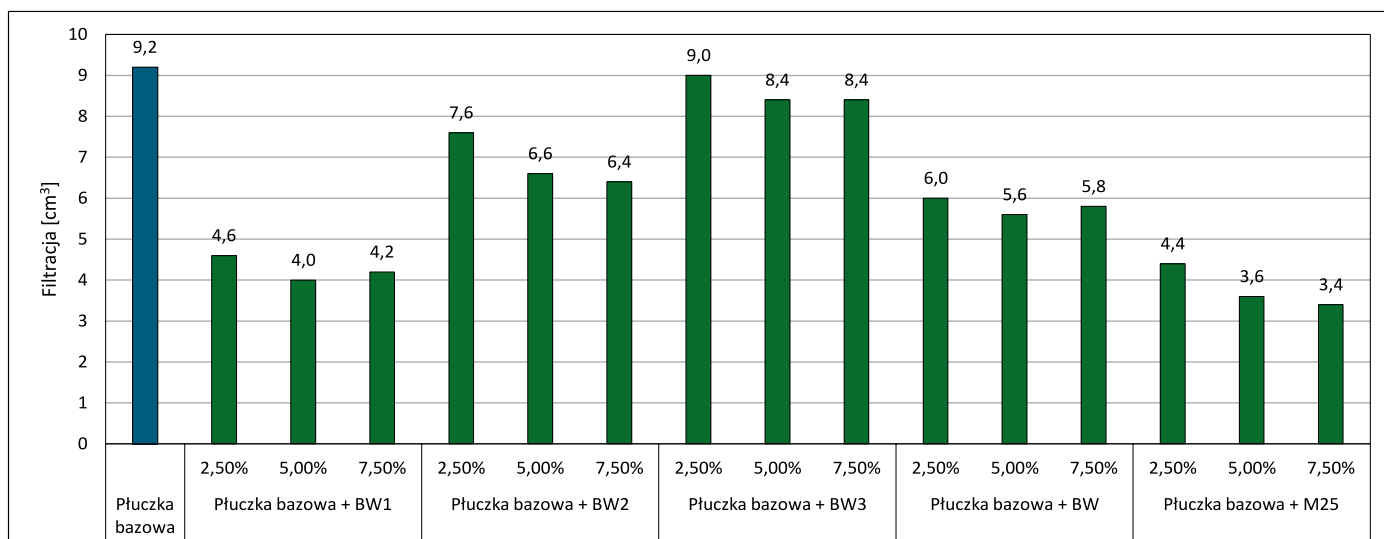
Płuczki modyfikowane różnymi frakcjami biowęgla charakteryzowały się zwiększonymi wartościami parametrów

reologiczno-strukturalnych w stosunku do płuczki bazowej, przy czym wzrost był tym większy, im wyższe było stężenie środka w płuczce. Przykładowo przy zastosowaniu frakcji BW1 w stężeniu 7,5% wartość lepkości plastycznej uległa podwyższeniu do 46 mPa·s (z 34 mPa·s w płuczce bazowej), a granicy płynięcia do 20,6 Pa (z 14,8 Pa w płuczce bazowej). Można również zauważyć obniżenie odczynu pH badanych próbek, przy czym im wyższe stężenie środka, tym niższy był wynik pomiaru wartości pH (8,5 w próbce zawierającej 7,5% środka BW1). Wszystkie mierzone parametry zaprezentowano w tabeli 4. Na rysunku 10 zestawiono wartości filtracji wszystkich płuczek badanych w tym etapie badań. Najwyższą filtracją charakteryzowały się płuczki modyfiko-

Tabela 4. Parametry płuczki zmodyfikowanej dodatkami środków mostkujących w stężeniu 2,5%, 5,0% oraz 7,5%

Table 4. Parameters of the mud modified with the addition of bridging agents at concentrations of 2.5%, 5.0% and 7.5%

Skład płuczki		Gęstość [g/cm ³]	Lepkość [mPa·s]		Granica płynięcia [Pa]	Wytrzymałość strukturalna I / II [Pa]	Filtracja API [cm ³]	pH
			η_{pl}	η_s				
Biocyd	0,10%	1,050	34	49,5	14,8	2,4 / 3,5	9,2	9,6
Biopolimer	0,25%							
CMC LV	2,00%							
PAC LV	0,10%							
Skrobia	2,00%							
KCl	5,00%							
Płuczka bazowa + BW1	2,5%	1,050	38	54,5	15,8	2,6 / 4,1	4,6	9,1
Płuczka bazowa + BW1	5,0%	1,060	40	58,0	17,2	2,8 / 4,3	4,0	8,9
Płuczka bazowa + BW1	7,5%	1,065	46	67,5	20,6	3,3 / 4,8	4,2	8,5
Płuczka bazowa + BW2	2,5%	1,050	36	53,5	16,8	2,4 / 3,9	7,6	9,2
Płuczka bazowa + BW2	5,0%	1,060	43	63,5	19,6	3,0 / 4,5	6,6	8,9
Płuczka bazowa + BW2	7,5%	1,065	47	72,5	24,4	3,5 / 5,1	6,4	8,8
Płuczka bazowa + BW3	2,5%	1,050	41	61,5	19,6	3,2 / 4,5	9,0	9,0
Płuczka bazowa + BW3	5,0%	1,060	43	65,5	21,5	3,5 / 4,7	8,4	9,0
Płuczka bazowa + BW3	7,5%	1,065	50	76,0	24,9	4,3 / 5,2	8,4	8,9
Płuczka bazowa + BW	2,5%	1,050	36	50,0	13,4	2,4 / 4,9	6,0	9,2
Płuczka bazowa + BW	5,0%	1,060	39	56,5	16,8	3,1 / 3,4	5,6	8,9
Płuczka bazowa + BW	7,5%	1,060	38	72,5	33,0	10,6 / 11,0	5,8	8,7
Płuczka bazowa + M25	2,5%	1,065	37	53,5	15,8	2,6 / 4,1	4,4	9,4
Płuczka bazowa + M25	5,0%	1,080	38	54,5	15,8	2,7 / 4,1	3,6	9,3
Płuczka bazowa + M25	7,5%	1,090	39	56,5	16,8	2,8 / 4,2	3,4	9,2



Rysunek 10. Wartości filtracji płuczki API zmodyfikowanej różnymi frakcjami biowęgla oraz blokaterem M25

Figure 10. Filtration values of muds modified with different fractions of biochar and M25 blocker

wane środkiem BW3, a więc największą wyselekcjonowaną frakcją biowęgla.

Niskie wartości filtracji uzyskano, stosując środek BW1, o najmniejszej średnicy ziaren. Najniższy wynik zanotowano przy stężeniu tego środka wynoszącym 5,0% – miał on wartość 4,0 cm³, a najwyższy przy stężeniu 2,5% – 4,6 cm³. Próbkę płuczki zawierającą nieprzesiany biowęgiel charakteryzowały się wynikiem w zakresie od 5,6 cm³ do 6,0 cm³ w zależności od zastosowanego stężenia. Najbardziej efektywnym w ograniczaniu filtracji środkiem okazał się blokator węglanowy M25, w którego przypadku dla stężeń 5,0% i 7,5% uzyskano wyniki poniżej 4 cm³ – odpowiednio 3,6 cm³ i 3,4 cm³.

Dobrze dobrane wielkości cząstek środków mostkujących w płynie wiertniczym powinny spełniać dwa główne kryteria:

- powinny być wystarczająco duże, aby nie migrowały wraz z filtratem do przestrzeni porowej skały, tylko osadzały się w przypowierzchniowych jej porach i na ścianie odwiertu;
- muszą być wystarczająco małe, aby mogły osadzać się i zawieszać pomiędzy większymi cząstkami mostkującymi, a utworzony z ich udziałem osad filtracyjny zapobiegał inwazji filtratu z cieczy oraz przenikaniu drobnodispersyjnej fazy stałej i cząstek polimeru.

W związku z powyższym, aby stworzyć mieszaninę zawierającą cząstki środków mostkujących o różnych średnicach i zwiększyć tym samym efektywność ich działania, zdecydowano się na przeprowadzenie badania próbek zmodyfikowanych poprzez dodatek nie tylko pojedynczego blokatora, ale również zestawów dwóch połączonych środków mostkujących. Na podstawie analizy uzyskanych w poprzednim etapie wyników przygotowano następujące próbki:

- BW1 + BW2 – sumaryczne stężenie mieszaniny: 2,5%, 5,0%, 7,5%;

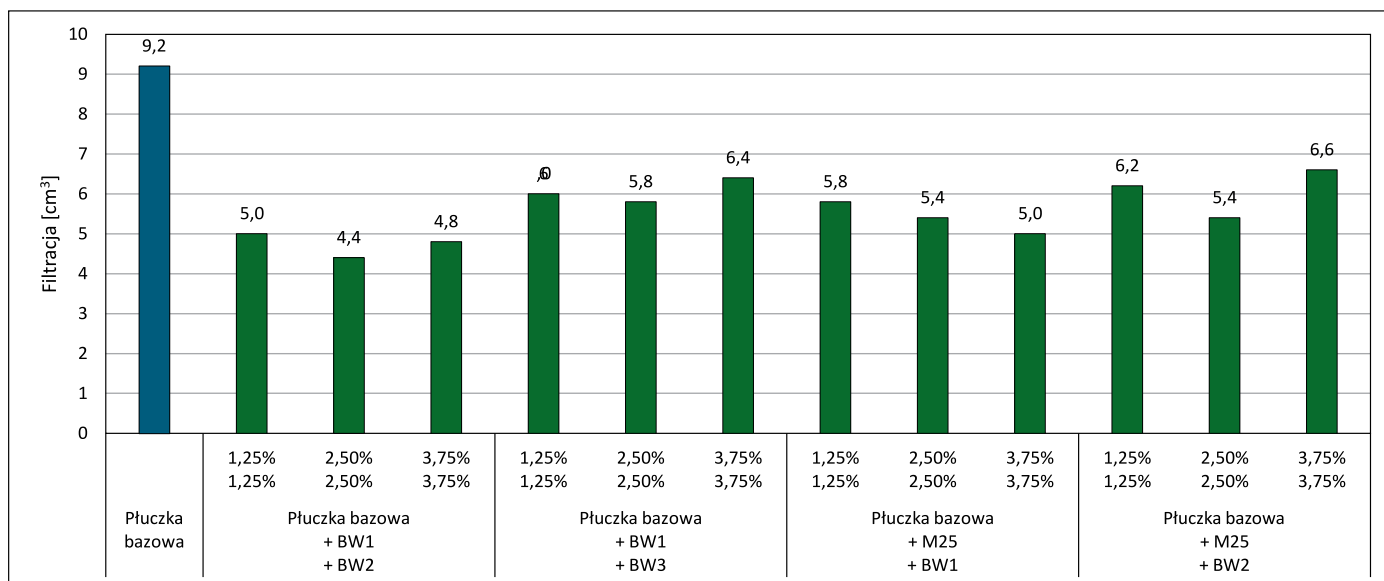
- BW1 + BW3 – sumaryczne stężenie mieszaniny: 2,5%, 5,0%, 7,5%;
- M25 + BW1 – sumaryczne stężenie mieszaniny: 2,5%, 5,0%, 7,5%;
- M25 + BW2 – sumaryczne stężenie mieszaniny: 2,5%, 5,0%, 7,5%.

Wbrew oczekiwaniom połączenie ze sobą środków mostkujących o różnych średnicach ziaren w celu zwiększenia efektywności ograniczania filtracji nie przyniosło oczekiwanego rezultatu. W przypadku żadnej ze zbadanych próbek nie uzyskano wyników lepszych, niż miało to miejsce podczas stosowania pojedynczych blokatorów. Najwyższą skuteczność wykazała mieszanina BW1 i BW2, a więc frakcji o niskiej i średniej wielkości ziaren. Najniższy wynik (4,4 cm³) uzyskano dla próbki, w której sumaryczne stężenie blokatorów wyniosło 5,0%. Z kolei najwyższy wynik uzyskano w przypadku próbki zawierającej 2,5% BW1 i BW2 – 5,0 cm³. Najniższą skutecznością cechowały się połączenia środków BW1 i BW3 oraz środków M25 i BW2. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 11.

Określenie wartości filtracji dynamicznej płuczek modyfikowanych materiałami mostkującymi

W ostatnim etapie realizacji pracy przeprowadzono pomiar filtracji dynamicznej przy użyciu prasy filtracyjnej OFI 170-50-1. Zastosowanie takiego typu prasy pozwala uzyskać wyniki bardziej odpowiadające rzeczywistości. Dzieje się tak z uwagi na zastosowanie dysku ceramicznego o porowatej strukturze, który w większym stopniu imituje realną skalę niż bibuła filtracyjna.

Drugim powodem są semiotworopodobne warunki panujące w komorze prasy filtracyjnej, a więc ciśnienie, temperatura



Rysunek 11. Wartości filtracji płuczki zmodyfikowanej zestawami blokatorów

Figure 11. Filtration values of mud modified with bridging agents sets

Tabela 5. Wartości filtracji dynamicznej płuczki zmodyfikowanej dodatkiem zestawów blokatorów

Table 5. Dynamic filtration values of the mud modified by the addition of blocker sets

Parametr	Płuczka bazowa	Płuczka bazowa + BW1 – 5,0%	Płuczka bazowa + BW1 – 2,5% + BW2 – 2,5%	Płuczka bazowa + M25 – 5,0%	Płuczka bazowa + M25 – 2,5% + BW1 – 2,5%
Filtracja dynamiczna [cm³]	500 (całkowita)	50	150	40	65
Grubość osadu filtracyjnego [mm]	śladowa ilość osadu	2,5	10	1	2

oraz wymuszony ruch płuczki wiertniczej podczas pomiaru. W warunkach dynamicznych przepływ płuczki wzdłuż ścian otworu wiertniczego powoduje erozję osadu utworzonego w procesie filtracji. Osad na ścianie otworu powiększa się w wyniku filtracji aż do momentu, gdy szybkość jego tworzenia i szybkość erozji nawzajem się równoważą. Gdy grubość osadu osiągnie stan równowagi, szybkość filtracji utrzymywać się będzie na stałym poziomie, przeciwnie niż w przypadku filtracji statycznej, przy której osad powiększa się stale wraz z upływem czasu.

Do badania filtracji dynamicznej wybrano pięć próbek:

- płuczkę bazową;
- płuczkę z dodatkiem BW1 – 5,0%;
- płuczkę z dodatkiem BW1 i BW2 – 5,0%;
- płuczkę z dodatkiem M25 – 5,0%;
- płuczkę z dodatkiem M25 i BW1 – 5,0%.

W tabeli 5 przedstawiono wyniki pomiarów filtracji dynamicznej wybranych pięciu próbek. Pierwszą próbką była płuczka bazowa, a więc niezawierająca żadnych środków blokujących. Podobnie jak podczas badania filtracji API również tutaj wynik dla płuczki bazowej był najwyższy – w krótkim czasie przez dysk ceramiczny przeniknęła cała zawartość komory filtracyjnej, a więc 500 cm³.

Modyfikowanie płuczki przez środki mostkujące znacznie poprawiło uzyskane rezultaty. W przypadku zastosowania pojedynczej frakcji biowęgla BW1, o średnicy ziaren nieprzekraczającej 0,09 mm, zmierzona wartość wynosiła 50 cm³. Na dysku ceramicznym utworzył się dość zwarty i szczelny osad o grubości około 2,5 mm. Płuczka zmodyfikowana poprzez dodatek zestawu dwóch frakcji biowęgla (BW1 + BW2) charakteryzowała się wyższą wartością filtracji dynamicznej (150 cm³) niż ta z pojedynczym blokatozem. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że podczas badania tej próbki na dysku ceramicznym wytworzył się osad filtracyjny o bardzo dużej grubości, wynoszącej około 10 mm.

Najbardziej efektywną próbką pod kątem obniżania filtracji dynamicznej okazała się płuczka zawierająca 5,0% blokatora węglanowego M25. W jej przypadku uzyskano zwarty i cienki osad filtracyjny o grubości około 1 mm, a wartość filtracji była równa 40 cm³.

Podsumowanie

Celem przedstawionych w artykule badań było dokonanie oceny możliwości zastosowania w płuczkach wiertniczych

biowęgla jako materiału mostkującego. Zakładano, że biowęgiel może być wykorzystany w tym kierunku głównie dzięki jego właściwościom fizykochemicznym, a więc jego drobnoziarnistości, wysokiej stabilności termicznej i chemicznej oraz wytrzymałości mechanicznej. Dodatkową korzyścią stosowania biowęgla jest jego neutralność względem środowiska naturalnego.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można przedstawić następujące wnioski:

1. Analiza sitowa badanego biowęgla wykazała, że niemal połowę (48,63%) stanowi frakcja o średnicy ziarna mniejszej niż 0,09 mm.
2. Badania prowadzone z użyciem aparatu Turbiscan wykazały, że płuczki wiertnicze zawierające dodatek biowęgla charakteryzują się bardzo stabilną strukturą. Niezależnie od rodzaju zastosowanej w składzie płuczki frakcji biowęgla współczynnik TSI po 24 godzinach nie przekraczał wartości 1. Dodatkowym atutem jest to, że uzyskanie stabilnej struktury jest możliwe już przy stosunkowo niewysokich wartościach parametrów reologiczno-strukturalnych płuczki. Ocena wizualna próbek po 24-godzinym badaniu również nie wykazała rozwarstwienia próbek czy występowania sedymentacji fazy stałej.
3. Modyfikacja składu płuczek biowęgłem ma wpływ na wartość parametrów reologicznych. Niezależnie od tego, jaką frakcją biowęgla modyfikowano skład płuczki wiertniczej, obserwowano podwyższenie wartości lepkości plastycznej, lepkości pozornej, granicy płynięcia oraz wytrzymałości strukturalnej. Największy wpływ odnotowano w próbkach zawierających 7,5% materiałów mostkujących.
4. Pomiary filtracji API wykazały, że dodatek biowęgla może skutecznie ograniczać filtrację przy zastosowaniu frakcji o odpowiedniej średnicy ziaren. Zmodyfikowanie składu płuczki bazowej biowęgłem o średnicy ziaren mniejszej niż 0,09 mm pozwoliło zredukować wartość filtracji z 9,2 cm³ w płuczce wyjściowej do 4,6 cm³ przy zawartości 2,5% biowęgla, 4,0 cm³ przy zawartości 5,0% biowęgla oraz 4,2 cm³ przy zawartości 7,5% biowęgla. Procentowo stanowiło to poprawę o odpowiednio 50%, 57% oraz 54%. Zmierzone wyniki były porównywalne z wartościami uzyskanymi po dodaniu do składu płuczki wyjściowej blokatora węglanowego M25, gdzie dla stężeń 2,5%, 5,0% i 7,5% filtracja wynosiła odpowiednio 4,4 cm³, 3,6 cm³ oraz 3,4 cm³.
5. Im większa jest średnica ziaren zastosowanego biowęgla, tym mniejsza jest efektywność w obniżaniu wartości filtracji płuczki. Najwyższe wyniki filtracji API uzyskano podczas badania płuczki z dodatkiem ziaren o średnicy mieszczącej się w przedziale od 0,16 mm do 0,25 mm. Procentowa poprawa w stosunku do płuczki wyjściowej wynosiła 2%

dla płuczki o stężeniu 2,5% tej frakcji biowęgla oraz 9% w przypadku stężeń 5,0% i 7,5%.

6. Zastosowanie jednego rodzaju blokatora zapewniało lepszą skuteczność w ograniczaniu filtracji niż łączenie dwóch frakcji biowęgla lub dwóch różnych rodzajów blokatorów (biowęgiel i blokator węglanowy). Zależność ta była widoczna zarówno podczas pomiaru filtracji API, jak też filtracji dynamicznej.

Na podstawie wyników badań uzyskanych w toku realizacji pracy można stwierdzić, że płuczki zawierające w swoim składzie biowęgiel, a szczególnie jego najdrobniejszą frakcję, mogą tworzyć szczelny osad filtracyjny, a co za tym idzie – zapobiegać utracie przepuszczalności strefy przyodwiertowej. Aby jednak w pełni ustalić skuteczność stosowania biowęgla jako środka mostkującego, należałoby rozszerzyć zakres badań o pomiar uszkodzenia przepuszczalności rdzenia.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza możliwości zastosowania biowęgla w technologii płuczkowej*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0022/KW/2024, nr archiwalny: DK-4100-0008/2024.

Literatura

- Aboelela D., Saleh H., Attia A.M., Elhenawy Y., Majozi T., Bassyouni M., 2023. Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. *Sustainability*, 15: 11238. DOI: 10.3390/su151411238.
- Adel M., Ragab S., Noah A., 2014. Reduction of formation damage and fluid loss using nano-sized silica drilling fluids. *Petroleum Technology Development Journal: An International Journal*, 7(2): 75–88.
- Alvarez L.A., Cedeno M.D., Villon P.V., Pinoargote R.C., 2019. Design of a fluid for workover operations in the Gustavo Galindo Oilfield, Ecuador. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14(11): 2118–2124.
- Best Drilling Chemicals. <<http://bdc.com.pl>> (dostęp: październik 2024).
- Biochar: A Sustainable Solution for Food Safety and Packaging. <<https://biochartoday.com/2024/01/24/biochar-a-sustainable-solution-for-food-safety-and-packaging/>> (dostęp: 12.10.2024).
- Bis Z., 2012. Biowęgiel – powrót do przeszłości, szansa dla przyszłości. *Czysta Energia*, 6: 28–31.
- Bridgwater A.V., 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass Bioenergy*, 38: 68–94. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048.
- Caenn R., Darley H.C.H., Gray G.R., 2011. Composition and properties of drilling and completion fluids. *Sixth Edition. Gulf Professional Publishing*.
- Contreras O., Hareland G., Husein M., Nygaard R., Al-Saba M., 2014. Application of in-house prepared nanoparticles as filtration control additive to reduce formation damage. *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, USA*. DOI: 10.2118/168116-MS.
- Demirbas A., Arin G., 2002. An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*, 24: 471–482. DOI: 10.1080/00908310252889979.
- Dębińska E., 2015. Niekonwencjonalne zaczyny cementowe z dodatkiem nanokrzemionki. *Nafta-Gaz*, 71(5): 290–300.

- Elkhilfi Z., Iftikhar J., Sarraf M., Ali B., Saleem M.H., Ibranshabib I., Bispo M.D., Meili L., Ercisli S., Torun Kayabasi E., 2023. Potential Role of Biochar on Capturing Soil Nutrients, Carbon Sequestration and Managing Environmental Challenges: A Review. *Sustainability*, 15: 2527. DOI: 10.3390/su15032527.
- Energy Glossary. <<http://www.glossary.oilfield.slb.com>> (dostęp: październik 2024).
- Giorcelli M., Khan A., Pugno N.M., 2019a. Biochar as a cheap and environmental friendly filler able to improve polymer mechanical properties. *Biomass Bioenergy*, 120: 219–223. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.036.
- Giorcelli M., Savi P., Khan A., Tagliaferro A., 2019b. Analysis of biochar with different pyrolysis temperatures used as filler in epoxy resin composites. *Biomass Bioenergy*, 122: 466–471. DOI: 10.1016/j.biombioe.
- Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W., 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88(1): 37–41.
- Ingle S.R., Kamble B.M., Patil V.S., 2024. Biochar: A comprehensive review of production, properties and applications. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 8: 21–29. DOI: 10.33545/26174693.2024.v8.i1Sa.282.
- Jankiewicz B.J., Choma J., Jamiola D., Jaroniec M., 2010. Nanostruktury krzemionkowo-metaliczne. Otrzymywanie i modyfikacja nanocząstek krzemionkowych. *Wiadomości Chemiczne*, 64: 913–942.
- Jasiński B., 2018. Określenie dynamicznej filtracji płuczek wiertniczych w warunkach HPHT z użyciem nowatorskiej metody pomiarowej. *Nafta-Gaz*, 74(2): 85–95. DOI: 10.18668/NG.2018.02.02.
- Jeffery S., Verheijen F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1): 175–187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.
- Jerzak W., Acha E., Li B., 2024. Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis. *Energies*, 17: 5082. DOI: 10.3390/en17205082.
- Kalus K., Koziel J.A., Opaliński S., 2019. A Review of Biochar Properties and Their Utilization in Crop Agriculture and Livestock Production. *Applied Sciences*, 9: 3494. DOI: 10.3390/app9173494.
- Krzyszczak A., Dybowski M.P., Kończak M., Czech B., 2022. Low bioavailability of derivatives of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar obtained from different feedstock. *Environmental Research*, 214: 113787. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113787.
- Liu Q., Liu B., Ambus P., Zhang Y., Hansen V., Lin Z., Shen D., Liu G., Bei Q., Zhu J., 2015. Carbon footprint of rice production under biochar amendment – A case study in a Chinese rice cropping system. *GCB Bioenergy*, 8: 148–159. DOI: 10.1111/gcbb.12248.
- Manya J.J., 2012. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental Science & Technology*, 46: 7939–7954. DOI: 10.1021/s301029g.
- Medyńska-Juraszek A., 2016. Biowęgiel jako dodatek do gleb. *Soil Science Annual*, 67(3): 151–157. DOI: 10.1515/ssa-2016-0018.
- Mungan N., 1965. Permeability reduction through changes in pH and salinity. *Journal of Petroleum Technology*, 17(12): 1449–1453. DOI: 10.2118/1283-PA.
- Murawska K., Fastyn J., Drożdżyński A., 2021. Zastosowanie w sektorze przemysłowym biokarbonizatu otrzymanego metodami przetwarzania biomasy. *Technologia i Jakość Wytwarzania*, 66: 185–197.
- Nan N., DeVallance D.B., 2017. Development of poly(vinyl alcohol)/wood-derived biochar composites for use in pressure sensor applications. *Journal of Material Science*, 52: 8247–8257. DOI: 10.1007/s10853-017-1040-7.
- Polski Serwis Płynów Wiertniczych. <<http://www.pspw-krosno.com.pl>> (dostęp: październik 2024).
- Ponmani S., Nagarajan R., Sangwai J.S., 2016. Effect of nanofluids of CuO and ZnO in polyethylene glycol and polyvinylpyrrolidone on the thermal, electrical, and filtration-loss properties of water-based drilling fluids. *SPE Journal*, 21(2): 405–415. DOI: 10.2118/178919-PA.
- Prochnow F.D., Cavali M., Dresch A.P., Belli I.M., Libardi N., Junior; de Castilhos A.B., Junior, 2024. Biochar: From Laboratory to Industry Scale – An Overview of Scientific and Industrial Advances. *Opportunities in the Brazilian Context and Contributions to Sustainable Development. Processes*, 12: 1006. DOI: 10.3390/pr12051006.
- Rackowski J., Półchłopek T., 1998. Materiały i środki chemiczne do sporządzania płuczek wiertniczych. *Prace Instytutu Górniczo-Naftowego i Gazownictwa*, 95: 1–319.
- Rahman S.S., Rahman M.M., Khan F.A., 1995. Response of low-permeability, illitic sand-stone to drilling and completion fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 12(4): 309–322. DOI: 10.1016/0920-4105(94)00052-6.
- Salih A.H., Bilgesu H., 2017. Investigation of rheological and filtration properties of water-based drilling fluids using various anionic nanoparticles. *SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California*. DOI: 10.2118/185638-MS.
- Salih A.H., Elshehabi T.A., Bilgesu H.I., 2016. Impact of nanomaterials on the rheological and filtration properties of water-based drilling fluids. *SPE Eastern Regional Meeting, Canton, Ohio, USA*. DOI: 10.2118/184067-MS.
- Sharma T., Hakeem I.G., Gupta A.B., Joshi J., Shah K., Vuppaladadiyam A.K., Sharma A., 2024. Parametric influence of process conditions on thermochemical techniques for biochar production: A state-of-the-art review. *Journal of the Energy Institute*, 113: 101559. DOI: 10.1016/j.joei.2024.101559.
- Shon C.S., Mukashev T., Lee D., 2019. Can common reed fiber become an effective construction material? Physical, mechanical, and thermal properties of mortar mixture containing common reed fiber. *Sustainability*, 11(3): 903. DOI: 10.3390/su11030903.
- Sohi S.P., Krull R., Lopez-Capel E., Bol R., 2010. A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil. *Advances in Agronomy*, 105: 47–82. DOI: 10.1016/S0065-2113(10)05002-9.
- Stec M., 2017. Opracowanie nowych receptur płuczek mrówczanowych w aspekcie ograniczenia uszkodzenia strefy przyodwiertowej. Rozprawa doktorska. *Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie*.
- Tripathi M., Sahu J.N., Ganesan P., 2016. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 467–481. DOI: 10.1016/J.RSER.2015.10.122.
- Uliasz M., 2021. Ciecze robocze – ich właściwości technologiczne i rola w procesie rekonstrukcji odwiertów. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 235: 1–160. DOI: 10.18668/PN2021.235.
- Wang L., Chen S.S., Tsang D.C.W., 2016. Recycling contaminated wood into eco-friendly particleboard using green cement and carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production*, 137: 861–870. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.180.
- Wykorzystanie paliw z odpadów, biomasy oraz osadów ściekowych w ciepłownictwie. <<https://nowa-energia.com.pl/2022/09/30/wykorzystanie-paliw-z-odpadow-biomasy-oraz-osadow-sciekowych-w-cieplownictwie/>> (dostęp: 10.10.2024).

- Yadav R., Ramakrishna W., 2023. Biochar as an Environment-Friendly Alternative for Multiple Applications. *Sustainability*, 15: 13421. DOI: 10.3390/su151813421.
- Zhang Y., He M., Wang L., 2022. Biochar as construction materials for achieving carbon neutrality. *Biochar*, 4: 59. DOI: 10.1007/s42773-022-00182-x.
- Zima G., 2017. Analiza wpływu nanomateriałów na właściwości osadu filtracyjnego. *Nafta-Gaz*, 73(5): 312–320. DOI: 10.18668/NG.2017.05.03.



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



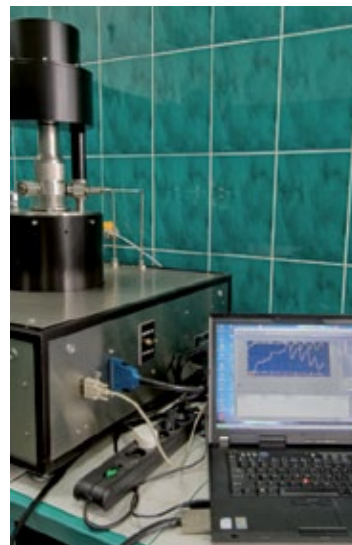
Dr inż. Grzegorz ZIMA
Kierownik Zakładu Technologii Wiercenia
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: grzegorz.zima@inig.pl



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

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU TECHNOLOGII WIERCENIA

- opracowywanie składów i technologii sporządzania wodnodispersyjnych i olejowodispersyjnych płuczek wiertniczych, cieczy specjalnych (roboczych, nadpakerowych, buforowych, przemylających) i zaczynów cementowych do wiercenia otworów i rekonstrukcji odwiertów w warunkach normalnej i wysokiej temperatury oraz występowania różnych ciśnień złożowych i skażeń chemicznych;
- dobór właściwości płuczek wiertniczych, zaczynów cementowych, cieczy buforowych oraz opracowanie metod usuwania osadów filtracyjnych w celu poprawy skuteczności cementowania otworów wiertniczych;
- badania serwisowe płuczek wiertniczych podczas wiercenia otworu oraz zaczynów cementowych w trakcie zabiegu cementowania;
- specjalistyczne badania laboratoryjne dotyczące oznaczania: wpływu cieczy wiertniczych na przewiercane skały, napięcia powierzchniowego na granicy faz, współczynnika tarcia w warunkach HPHT, sedimentacji materiału obciążającego, wynoszenia zwiercin w otworach kierunkowych i poziomych, doboru materiałów uszczelniających do zapobiegania ucieczkom płuczki wiertniczej i zaczynu cementowego w warstwy szczelinowate, odporności na migrację gazu w wiążącym zaczynie cementowym w warunkach otworopodobnych, odporności korozyjnej kamienia cementowego, związków chemicznych w cieczach wiertniczych i ich toksyczności przy użyciu bakterii jako bioindykatorów;



Kierownik: dr inż. Grzegorz Zima Adres: ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno
Telefon: 13 436 89 41 w. 5221 Faks: 13 436 79 71 E-mail: grzegorz.zima@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy