

Badania możliwości zagospodarowania węgla po pirolizie surowców roślinnych

Research on the possibilities of coal utilization after pyrolysis of plant raw materials

Grzegorz Zima, Piotr Jakubowicz, Bartłomiej Jasiński, Sławomir Błaż

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nad zestaleniem biowęgla uzyskanego po pirolizie trocin drzewnych. Omówiono sposoby zagospodarowania biowęgla będącego produktem odpadowym, który może być wykorzystany do otrzymywania różnych półproduktów o potencjalnym zastosowaniu między innymi w rolnictwie, budownictwie i energetyce. W ramach przeprowadzonych badań podjęto próby zestalenia pozostałości po pirolizie trocin drzew iglastych za pomocą cementu portlandzkiego lub spoiwa hydraulicznego o podwyższonej zawartości aktywnej krzemionki. W wybranych do badań próbkach udział biowęgla wynosił 50% objętościowych. Na podstawie wykonanych pomiarów wytrzymałości na ściskanie, czasu wiązania i przewodności cieplnej oceniono przydatność zestalonego biowęgla jako materiału do wypełniania wyrobisk lub materiału termoizolacyjnego. W badaniach zastosowano maszynę wytrzymałościową, aparat Vicata oraz aparat do pomiaru przewodności cieplnej z sondą powierzchniową. Badania przewodności cieplnej wykonano na wysuszonych próbkach po czasie hydratacji wynoszącym 7 dni. Po tym samym czasie przeprowadzono pomiary wytrzymałości na ściskanie. Wykonane badania pozwoliły ponadto na opracowanie sposobu zestalenia biowęgla i określenie przewidywanych właściwości uzyskanych półproduktów. Najlepsze właściwości termoizolacyjne uzyskano dla próbek biowęgla zestalonego cementem portlandzkim z dodatkiem szkła wodnego ($0,143 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), natomiast najlepszą wytrzymałość na ściskanie wykazywały próbki zestalone cementem portlandzkim bez dodatku szkła wodnego (11 MPa). Ustalono wpływ zastosowanego materiału wiążącego i pozostałych dodatków na czas wiązania sporządzonych mieszanin. Zastosowanie spoiwa hydraulicznego w miejsce cementu portlandzkiego przyczyniło się do znacznego skrócenia czasu wiązania zestalanych próbek. Przeprowadzono testy wymywania substancji szkodliwych z zestalonych próbek biowęgla i określono ich przynależność do danej grupy odpadów. Oznaczono wartości wymywania stałych związków rozpuszczonych (TDS), rozpuszczonego węgla organicznego (DOC), zawartości metali ciężkich oraz jonów chlorkowych, siarczanowych i fluorkowych. Ustalono, że wartości wymywania związków szkodliwych we wszystkich badanych próbkach kształtują się na niskim poziomie.

Słowa kluczowe: biowęgiel, piroliza, zestalenie, cement, szkło wodne.

ABSTRACT: The article presents the results of laboratory tests on the solidification of biochar obtained after the pyrolysis of wood sawdust. Methods of managing biochar, a waste product that can be used to obtain various semi-finished products with potential applications in agriculture, construction, and energy, are discussed. As part of the conducted tests, attempts were made to solidify the residues after the pyrolysis of sawdust from coniferous trees using cement or a hydraulic binder with an increased content of active silica. In the samples selected for testing, the biochar content was 50% by volume. Based on the performed measurements of compressive strength, setting time, and thermal conductivity, the suitability of the solidified biochar as a material for filling excavations or as a thermal insulation material was evaluated. A strength machine, a Vicat apparatus, and a thermal conductivity measuring apparatus with a surface probe were used in the tests. Thermal conductivity tests were performed for dried samples after a hydration time of 7 days. After the same time, compressive strength measurements were performed. The conducted research also allowed for development of a method of biochar solidification and to determine the expected properties of the obtained semi-finished products. The best thermal insulation properties were obtained for biochar samples solidified with cement with the addition of water glass ($0.143 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), while the best compressive strength was demonstrated by samples solidified with cement without the addition of water glass (11 MPa). The influence of the applied binding material and other additives on the setting time of the prepared mixtures was determined. The use of a hydraulic binder instead of cement contributed to a significant shortening of the setting time of the solidified samples. Tests were carried out to leach harmful substances from solidified biochar samples, and their affiliation to a given waste group was determined. The values of leaching of solid dissolved compounds (TDS), dissolved organic carbon (DOC), the content of heavy metals, and chloride, sulphate, and fluoride ions were determined. It was found that the values of leaching harmful compounds in all the tested samples were low.

Key words: biochar, pyrolysis, solidification, cement, water glass.

Wstęp

Kierunki zagospodarowania produktów odpadowych pirolizy

Jednym ze sposobów zagospodarowania biowęgla będącego produktem pirolizy jest jego zestalenie. Potencjalne zastosowanie zestalonego biowęgla to wypełnianie wyrobisk lub użycie go jako materiału budowlanego.

Nowym kierunkiem badań nad wykorzystaniem biowęgla mogą być przedsięwzięcia związane z zagospodarowaniem odpadów wiertniczych, które wpisują się w działania dotyczące zasad postępowania z odpadami w sposób zapewniający ochronę środowiska.

Priorytetowymi działaniami wytwórcy odpadów jest zapobieganie ich powstawaniu i minimalizacja ich ilości oraz obniżanie stopnia uciążliwości dla środowiska powstałych odpadów. Są to działania wynikające z obowiązujących przepisów ustaw o gospodarce odpadami.

Właściwe gospodarowanie odpadami wymaga zatem kompleksowych rozwiązań technologicznych w zakresie ich odzysku i unieszkodliwiania.

Jedną z metod odzysku i unieszkodliwiania odpadów wiertniczych jest technologia immobilizacji – jako sposób fizykochemicznego przekształcania tych odpadów, zmieniający ich pierwotne właściwości. Polega ona na doborze ilościowym i jakościowym środków wiążących oraz aktywujących wiązanie, które inicjują reakcje chemiczne (hydratację) przyczyniające się do stabilizacji odpadów. Zachodzące w trakcie hydratacji reakcje przy odpowiednim pH umożliwiają zestalenie i zmniejszenie toksyczności odpadów oraz zmianę ich parametrów fizycznych.

Przeprowadzone szerokie badania laboratoryjne (Steliga i Uliasz, 2018; Steliga i in., 2018; Uliasz i in., 2010; Uliasz i Kremieniewski, 2012) nad przekształcaniem koloidalnych zawiesin różnych płuczek wiertniczych oraz urobku w ciało stałe przy użyciu cementu, spoiwa hydrauliczno-pucolanowego oraz szkła wodnego dowiodły, że proces ich zestalania może stanowić jeden ze sposobów zagospodarowania odpadów wiertniczych wytwarzanych w znacznych ilościach podczas prowadzonych prac wiertniczych. Otrzymane półprodukty charakteryzowały się wytrzymałością mechaniczną oraz ograniczoną wymywalnością substancji niebezpiecznych występujących w postaci związków rozpuszczalnych. Powstałe w wyniku procesu immobilizacji półprodukty mogą być wykorzystane jako materiał wtórny, np. do wypełniania wyrobisk lub w budownictwie drogowym.

Biorąc pod uwagę właściwości fizykochemiczne biowęgla i produktów modyfikowanych przy jego użyciu oraz wykorzystując doświadczenia zdobyte podczas realizacji ww. prac badawczych i prób przemysłowych, w INiG – PIB podjęte zostały próby zestalania biowęgla.

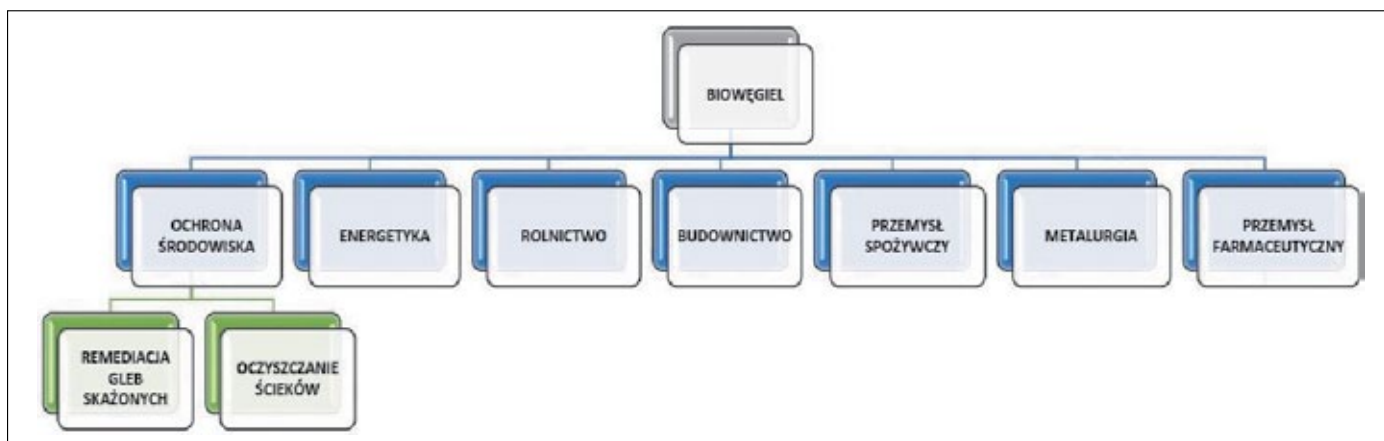
Produktami termochemicznych technologii przetwarzania biomasy roślinnej oraz odpadowej (spalanie, zgazowanie, piroliza) są: bioolej, biogaz i biowęgiel (biochar), który jest jednym z obiecujących surowców w funkcjonowaniu gospodarki o obiegu zamkniętym. Biowęgiel (węgiel roślinny XXI wieku) to drobnoziarnisty, hydrofobowy materiał stały o wysokiej zawartości węgla organicznego i związków mineralnych. Według standardów europejskich biowęgiel powinien być wytwarzany w procesie pirolizy biomasy w temperaturze od 350°C do 1000°C, w warunkach beztlenowych.

Na skład i właściwości fizykochemiczne otrzymywanego biowęgla wpływają rodzaj biomasy oraz warunki prowadzenia procesu technologicznego (m.in. temperatura, szybkość nagrzewania, stopień rozdrobnienia), które determinują udział węgla, popiołu, makro- i mikroelementów, jak również metali ciężkich. W procesach wysokotemperaturowych mogą powstawać także wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) i ich pochodne zawierające tlen, azot lub siarkę. 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 agrobiomasy (Bis, 2012; Medyńska-Juraszek, 2016; Krzyszczak i in., 2022).

Według wytycznych European Biochar Certificate (EBC) za biowęgiel uważa się jedynie taki materiał, który zawiera powyżej 50% węgla w suchej masie. Natomiast materiał, który zawiera go mniej niż 50%, jest określany jako pirogeniczny materiał węglowy (Malińska i Mełgieś, 2016; Gładki, 2017; Poluszyńska i in., 2019).

Badania i rozwój technologii wytwarzania oraz modyfikacji biowęgla w celu otrzymywania nowych produktów na jego bazie rozpoczęte zostały pod koniec XX wieku, głównie w USA i Europie. Prace nad technologią produkcji biowęgla w Polsce sięgają początku XXI wieku. Komercyjny rozwój rodzimej technologii produkcji biowęgla zapoczątkowała w 2005 roku firma FLUID SA, działająca w Sędziszowie, przy współpracy z jednostkami badawczymi (Gładki, 2017). W 2021 roku produkcję biowęgla rozpoczęła również lubelska spółka New Technology Production Sp. z o.o. (Biocarbon).

Liczne unikatowe właściwości fizykochemiczne biowęgla (m.in. wysoka przewodność elektryczna, rozwinięta wewnętrzna struktura porów, wysokie zdolności sorpcyjne różnych mediów – wody, zapachów, toksyn i promieniowania elektromagnetycznego, niska przewodność cieplna, odporność na rozkład biologiczny, długookresowe przechowywanie) sprawiają, że może on być stosowany w działaniach związanych z ochroną



Rysunek 1. Możliwości aplikacyjne biowęgla (Murawska i in., 2021)

Figure 1. Application possibilities of biochar (Murawska et al., 2021)

środowiska oraz w energetyce, a także w innych sektorach przemysłu, co przedstawiono na rysunku 1. Zalety biowęgla z dużym powodzeniem wykorzystywane są przede wszystkim w rolnictwie, jak również w budownictwie (Biocarbon; Biochar; Biowęgiel jako materiał budowlany; Biowęgiel z biomasy; Bis, 2012; Malińska i Mełgieś, 2016; Medyńska-Juraszek, 2016; Gładki, 2017; Retajczyk i Wróblewska, 2018; Sładeczek i Głodek-Bucyk, 2017; Mierzwa-Hersztek i in., 2019; Murawska i in., 2021; Sisman i in., 2023; Wykorzystanie paliw z odpadów).

Zasadniczo biowęgiel o wysokiej kaloryczności może być wykorzystywany w energetyce jako paliwo alternatywne. Natomiast biowęgiel charakteryzujący się znacząco rozwiniętą powierzchnią właściwą oraz niską zawartością metali ciężkich i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) może być przydatny w rolnictwie. Ważnym parametrem w rolniczym zastosowaniu biowęgla jest biodostępność WWA. Przeprowadzone badania z użyciem biowęgla wytworzonych z biomasy roślinnej, osadów ściekowych oraz pozostałości z produkcji biogazu wykazały w nich niską zawartość WWA ogółem i biodostępnych. Najniższa zawartość tych związków cechowała biowęgiel z biomasy roślinnej, natomiast najwyższa – z pozostałości po produkcji biogazu. Badania przeprowadzone przez Krzyszczak i in. (2022) wykazały, że biodostępna frakcja WWA w biowęgla w zależności od wykorzystanego surowca wynosiła od 2% do 31% ogólnej zawartości, oznaczonej na poziomie od 57 mg/kg do 181 mg/kg, co potwierdza jego bezpieczne stosowanie w rolnictwie.

Na celowość stosowania biowęgla w rolnictwie wskazywały wyniki badań zagospodarowanych gleb dżungli amazońskich, uznawanych za jedne z najżyźniejszych, których głównym składnikiem jest węgiel. Gleby te, nazywane *terra preta do Indio* – czarną ziemią Indian, to pozostałość po prekolumbijskim rolnictwie w dorzeczu Amazonki. Powstawały one w wyniku zwęglania drzew i roślin bez dopuszczania do ich

spalenia. Otrzymywany produkt – węgiel drzewny mieszano z gliną i resztkami pożywienia, tworząc warstwę uprawnej gleby, która zachowała cechy żyzności do czasów współczesnych (Biocarbon; Bis, 2012; Medyńska-Juraszek, 2016; Poluszyńska i in., 2019).

W związku z tym, że biowęgiel jest jednym z interesujących obszarów badań, obserwuje się ciągły rozwój przemysłu biowęglowego, postrzeganego jako mającego potencjał w kontekście intensyfikacji odnawianych źródeł energii (OZE) oraz gospodarki odpadami. Lista aplikacji biowęgla i produktów modyfikowanych przy jego użyciu w różnych dziedzinach gospodarki jest szeroka i stale rośnie. Do najważniejszych można zaliczyć poniższe zastosowania:

I. Rolnictwo

1. Polepszacz gleby, poprawiający jej strukturę oraz stosunek C : N. Porowata struktura ziaren biowęgla wprowadzonego do gleby i jego odporność na mineralizację powodują, że tak utworzony kompleks mineralno-organiczny posiada cechy, które decydują o poprawie żyzności i urodzajności gleb ze względu na modyfikowanie ich właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych, oraz korzystnie wpływa na warunki życia roślin i organizmów glebowych m.in. poprzez:
 - redukcję emisji N_2O oraz CH_4 z gleby;
 - indukowanie rozwoju bakterii azotowych;
 - zatrzymywanie wody oraz mikro- i makroelementów w glebie (N, K, P), które są długo uwalniane w czasie;
 - poprawę pH gleby – ze względu na zawartość w biowęgla substancji alkalicznych ($CaCO_3$ i $MgCO_3$), co jest szczególnie istotne w przypadku gleb kwaśnych.
2. Składniki nawozów lub kompostów. Porowata struktura biowęgla i odporność na działania środowiska glebowego pozwalają tworzyć z jego udziałem nawozy organiczne. Zmieszanie biowęgla np. z biomasą poprodukcyjną,

obornikiem, nawozami mineralnymi umożliwia trwałe utrzymanie powstałego produktu w strefie systemu korzeniowego, ułatwiając tym samym przyswajanie przez rośliny zawartych w nim substancji pokarmowych. Właściwości absorpcyjne biowęgla mają wpływ na proces kompostowania, przyczyniając się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych powstających podczas tego procesu oraz utraty azotu w kompostach, a także wzrostu aktywności mikroorganizmów.

3. Dodatek do pasz. Dzięki właściwościom absorpcyjnym wiąże on patogeny bakteryjne i pasożyty, wpływa na poprawę stanu zdrowia zwierząt, zwiększanie masy ich ciała, ogranicza problemy trawienne i ilość wydalanego metanu.
4. Dodatek do ściółki. Obniża poziom amoniaku, siarkowodoru i metanu, reguluje wilgotność ściółki, obniża zapadalność zwierząt na stany zapalne, poprawia wiązanie odchodów.

II. Budownictwo (Biowęgiel jako materiał budowlany)

1. Do izolacji termicznej budynków – ze względu na niską przewodność cieplną.
2. Do regulacji wilgotności w budynku – ze względu na zdolność biowęgla do absorbowania wody do około 5-krotności jego masy, dzięki czemu może być wykorzystany jako:
 - składnik zewnętrznych tynków natryskowych, które naniesione do 20 cm grubości mogą spełnić tę samą funkcję co styropian;
 - dodatek do zapraw tynkarskich w połączeniu z wapnem i cementem w ilości od 50% do 80%, zastępujący piasek.
3. Do oczyszczania powietrza w pomieszczeniach – ze względu na zdolność absorpcji zapachów, toksyn i promieniowania elektromagnetycznego.
4. Do poprawy wytrzymałości na ściskanie produktów i materiałów budowlanych, mieszanin cementowych, głównie zawierających nanobiowęgiel.

III. Inne

1. Sekwestracja CO₂ – zakłada się, że ilość węgla „wyekstrahowana” z biomasy jest równa ilości sekwestrowanej tak długo, jak długo węgiel ten będzie utrzymany w glebie.
2. Imobilizacja metali ciężkich w glebie.
3. Usuwanie zanieczyszczeń z gazów oraz wodnych roztworów.
4. Remediacja gleb zdegradowanych chemicznie.
5. Magazynowanie energii w akumulatorach.
6. Produkcja mikrobiologicznych ogniw paliwowych.
7. Dodatek do środków smarowych.
8. Nośnik leków i kosmetyków.
9. Katalizator i utleniacz przy produkcji szkła.
10. Utleniacz w procesie wytopu metali.

Przedstawione wielokierunkowe możliwości wykorzystania biowęgla świadczą o tym, że może on stanowić instrument w rozwiązywaniu problemów związanych z degradacją środowiska, zmianami klimatycznymi, zapewnieniem bezpiecznej produkcji żywności, wytwarzaniem energii z biomasy i zagospodarowaniem odpadów.

Metodyka badań

Wykorzystując doświadczenia zdobyte podczas realizacji prac badawczych i prób przemysłowych zestalania urobku powstałego podczas wiercenia otworów (Uliasz i in., 2010, 2013; Uliasz i Kremieniewski, 2012; Steliga i Uliasz, 2018; Steliga i in., 2018, 2020), przeprowadzono badania, których celem było określenie możliwości zestalania biowęgla:

- możliwości przekształcenia tych odpadów w półprodukt w postaci ciała stałego o określonych właściwościach przy użyciu środka wiążącego – cementu, aktywatora wiązania – szkła wodnego i biowęgla, który stanowił odpad pozyskany w procesie pirolizy;
- wpływu biowęgla na właściwości fizyczne otrzymanego półproduktu.

Biowęgiel użyty w badaniach otrzymano w wyniku pirolizy klasycznej przeprowadzonej w reaktorze EL21010Sylant-INIG firmy PID ENG&TECH o pojemności roboczej 2 litry i zakresie pracy do 700°C i 1,8 MPa. Szybkość grzania została ustalona na 30°C/min, czas utrzymywania temperatury docelowej (550°C) wynosił 30 min, a przepływ gazu obojętnego 100 ml/min. Udział biowęgla w końcowym produkcie wynosił około 28% wagowych.

W badaniach początkowych określono właściwości biowęgla z trocin drzew iglastych. Ustalono, że jest on materiałem alkalicznym, powoduje wzrost pH wody destylowanej do wartości około 8,3 po wprowadzeniu 1 g biowęgla do 100 cm³ wody. Po nasączeniu wodą zwiększa swoją masę około 2,5-krotnie. Doświadczalnie ustalono również maksymalną ilość biowęgla, jaką można połączyć z zaczynem cementowym, aby otrzymać mieszaninę o odpowiedniej konsystencji. Ustalono, że należy zmieszać oba składniki w stosunku objętościowym 1 : 1. Dla prawidłowego przeprowadzenia badań potrzeba było uzyskać około 300 cm³ mieszaniny, co wiązało się z zastosowaniem do jej sporządzenia 150 cm³ zaczynu cementowego i 60 g biowęgla. Przygotowane w ten sposób mieszaniny umieszczano w formach i sezonowano przez 7 dni. Podczas sezonowania wykonywano badania na aparacie Vicata w celu określenia początku i końca wiązania otrzymanych mieszanin. Po czasie hydratacji mierzono wytrzymałość na ściskanie i określano przewodnictwo cieplne próbek po uprzednim ich wysuszeniu i oszlifowaniu.

Do zestalania zastosowano cement portlandzki lub spoiwo hydrauliczne o zwiększonej zawartości krzemionki oraz w niektórych próbkach – dodatek szkła wodnego sodowego, w ilości 5% objętościowych w stosunku do całkowitej objętości mieszaniny. Zaczyny cementowe użyte w badaniach charakteryzowały się współczynnikiem wodno-cementowym w/c wynoszącym 0,5 i 0,6. Współczynnik w/c jest bezwymiarowy i określa stosunek objętości wody wyrażonej w litrach do masy cementu wyrażonej w kilogramach użytej do sporządzenia zaczynu cementowego. Zastosowane spoiwo hydrauliczne, o właściwościach podobnych do cementu, charakteryzuje się wysokim udziałem aktywnej krzemionki, co powoduje szybki przyrost fazy CSH – odpowiedzialnej za wysoką wytrzymałość zestalonych odpadów, ich hydrofobowość i podwyższoną odporność na warunki atmosferyczne. Otrzymuje się je w wyniku wspólnego przemiału klinkieru cementowego i pucolany przemysłowej typu Q. Doświadczalnie ustalono, że maksymalna ilość biowęgla, jaką można połączyć z uwodnionym spoiwem, aby otrzymać mieszaninę o odpowiedniej konsystencji, jest podobna jak w przypadku cementu. Potwierdzono, że należy zmieszać oba składniki w stosunku objętościowym 1 : 1, co odpowiada 150 cm³ zaczynu cementowego i 60 g biowęgla. Do zestalania w niektórych próbkach zastosowano dodatek szkła wodnego sodowego R-145, taki sam jak w przypadku próbek zestalanych za pomocą cementu portlandzkiego. Mieszaniny wiążące użyte w badaniach charakteryzowały się współczynnikiem wodno-cementowym w/c wynoszącym 0,5 i 0,6. Składy mieszanin wiążących przedstawiono w tabelach 1–4.

Badania szybkości wiązania przeprowadzono za pomocą aparatu Vicata. Po związaniu (czas hydratacji: 7 dni) próbki poddane zostały badaniu wytrzymałości na ściskanie przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Chandler Engineering model 4207. Badanie polega na pomiarze siły, przy której pod wpływem płynnie przykładanego obciążenia następuje zniszczenie próbki.

Na podstawie analizy czasów początku i końca wiązania próbki oraz wartości wytrzymałości na ściskanie otrzymanego ciała stałego możliwe było określenie efektywności zestalania odpadów pod kątem ilościowym i jakościowym wytypowanych środków wiążących w połączeniu z dodatkiem biowęgla.

Wiązanie zaczynu cementowego jest nieprzerwanym procesem fizykochemicznym, w którym zaczyn zmienia stan z płynnego na stały. W trakcie procesu wyróżnia się punkty początku wiązania (PW) i końca wiązania (KW). Badanie czasu wiązania zaczynu cementowego przeprowadza się za pomocą aparatu Vicata (rysunek 2). Jest to przyrząd, w którym na podstawie głębokości zanurzenia się igły w zaczynie cementowym, w różnych okresach czasu, można określić przebieg czasu wiązania zaczynu cementowego. Początek wiązania powinien nastąpić po takim czasie, aby zaczyn mógł zostać zatłoczony.

Z kolei koniec wiązania powinien nastąpić niedługo po początku wiązania. Czas wiązania określany jest w warunkach statycznych i jest bardzo ważny, ponieważ pozwala określić, w jakim czasie zaczyn zwiąże po wtłoczeniu i następnie po zaprzestaniu tłoczenia. Badanie czasu wiązania zaczynu cementowego za pomocą automatycznego sześciokomorowego



Rysunek 2. Tradycyjny aparat Vicata

Figure 2. Traditional Vicat apparatus



Rysunek 3. Automatyczny aparat Vicata

Figure 3. Automatic Vicat apparatus

aparatu Vicata (rysunek 3) prowadzone jest w sposób ciągły w wyznaczonym czasie. Aparat sterowany jest elektronicznie z poziomu komputera za pomocą oprogramowania, które umożliwia ustalenie warunków pomiaru.

Do określania przewodności cieplnej zestalonych próbek biowęgla zastosowano analizator właściwości termicznych model ISOMET 2114 (rysunek 4), który służy do bezpośredniego pomiaru właściwości przewodzenia ciepła metodą tzw. gorącego druta. Jest to jedna z najprostszych metod, można ją stosować zarówno w laboratorium, jak też w warunkach polowych. 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. 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

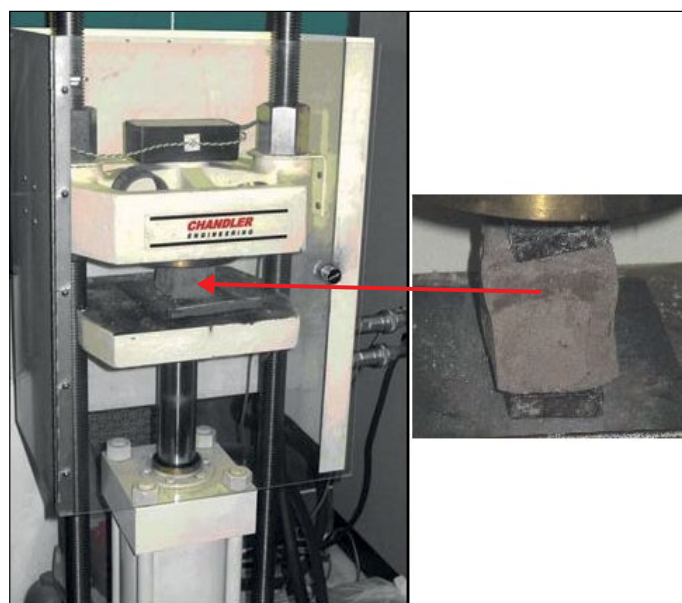


Rysunek 4. Aparat ISOMET 2114 do pomiaru przewodności cieplnej z sondą powierzchniową

Figure 4. ISOMET 2114 apparatus for measuring thermal conductivity with a surface probe

ma bezpośredni kontakt cieplny z badaną próbką. Badania przewodności cieplnej analizowanych próbek prowadzono za pomocą sondy powierzchniowej. Pomiar przebiegał zgodnie z instrukcją przyrządu i polegał na umieszczeniu sondy na wysuszonej i wyszlifowanej wcześniej powierzchni próbki oraz automatycznym zapisie wyników.

Próbki do badań wytrzymałości na ściskanie pozostawiano do sezonowania w wannie termostatycznej w temperaturze 20°C. Po czasie hydratacji cementu wynoszącym 7 dni, badaną próbkę umieszczano między dwiema płytami maszyny wytrzymałościowej (rysunek 5), gdzie mierzono płynnie przykładane na próbkę obciążenie, przy którym następuje jej zniszczenie.



Rysunek 5. Badanie wytrzymałości na ściskanie za pomocą maszyny wytrzymałościowej

Figure 5. Compressive strength test using a testing machine

Test wymywania realizowano poprzez zalanie pokruszonych próbek kamieni cementowych zawierających biowęgiel wodą dejonizowaną w stosunku 1 : 10 (wagowo) i pozostawienie w kontakcie przez 48 godz. Następnie odcieki przesączono przez sączek o średnicy porów 45 µm i poddano analizom zgodnie z wytycznymi zawartymi w rozporządzeniu w sprawie kryteriów dopuszczania odpadów do składowania. Oznaczono wartości wymywania takich składników jak: stałe związki rozpuszczone (ang. *total dissolved substances*, TDS), rozpuszczony węgiel organiczny (ang. *dissolved organic carbon*, DOC), metale ciężkie (arsen, bar, kadm, chrom, miedź, rtęć, molibden, nikiel, ołów, antymon, selen, cynk) oraz jony, takie jak: chlorki, siarczany oraz fluorki. Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem chromatografu jonowego Sycam, spektrofotometru UV/VIS PE Lambda 365+ oraz testów kuwetowych Hach Lange. Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 5.

Wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne miały na celu wytypowanie odpowiedniej metody zestalania biowęgla otrzymanego w procesie pirolizy.

W tablicy 1 zestawiono wyniki pomiarów zestalonych próbek biowęgla z trocin drzewnych z zaczynem cementowym o współczynniku w/c równym 0,5 (rysunek 6). W jednej z próbek zastosowano dodatek szkła wodnego. Równolegle przeprowadzono badania zaczynów cementowych bez dodatku biowęgla. Na podstawie uzyskanych wyników zauważono, że dodatek biowęgla do zaczynu zarówno bez dodatku szkła wodnego, jak i z jego dodatkiem spowodował około 4-krotne

obniżenie jego wytrzymałości na ściskanie i znaczne skrócenie początku (10–20-krotne) i końca (około 3-krotne) wiązania. Dodatek biowęgla z trocin drzew iglastych do zaczynu cementowego o współczynniku w/c równym 0,5 wpłynął również na obniżenie o ok. 50% jego przewodności cieplnej (rysunki 9–11).

Uzyskanie mieszanin biowęgla z zaczynem cementowym o w/c wynoszącym 0,5, zestawionych w tabeli 1, było dość trudne pomimo odpowiedniej ich konsystencji podczas umieszczania w formach. W celu otrzymania bardziej płynnej mieszaniny przeprowadzono badania z zastosowaniem zaczynu cementowego o w/c wynoszącym 0,6 (tabela 2, rysunki 9–11). Uzyskane mieszaniny (rysunek 7) w stosunku do zestawionych w tablicy 1 cechują się dłuższymi czasami początku i

Tabela 1. Wpływ biowęgla z trocin drzewnych na właściwości zaczynów cementowych o w/c = 0,5

Table 1. The effect of biochar from wood sawdust on the properties of cement slurries with w/c = 0.5

Skład mieszaniny	Oznaczenie próbki	Początek wiązania	Koniec wiązania	Wytrzymałość na ściskanie	Przewodność cieplna
		[min]	[min]	[MPa]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Zaczyn cementowy (w/c = 0,5; cement portlandzki)	AP	341	908	28,5	0,510
Zaczyn cementowy (w/c = 0,5; cement portlandzki) Szkło wodne sodowe – 7,5 cm³	BP	388	1095	19,0	0,381
Biowęgiel – 60 g (trociny po pirolizie) Zaczyn cementowy – 150 cm³ (w/c = 0,5; cement portlandzki)	A	40	296	8,4	0,282
Biowęgiel – 60 g (trociny po pirolizie) Zaczyn cementowy – 150 cm³ (w/c = 0,5; cement portlandzki) Szkło wodne sodowe – 5% obj. w stosunku do objętości mieszaniny	B	15	396	5,3	0,204

Tabela 2. Wpływ biowęgla z trocin drzewnych na właściwości zaczynów cementowych o w/c = 0,6

Table 2. The effect of biochar from wood sawdust on the properties of cement slurries with w/c = 0.6

Skład mieszaniny	Oznaczenie próbki	Początek wiązania	Koniec wiązania	Wytrzymałość na ściskanie	Przewodność cieplna
		[min]	[min]	[MPa]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Zaczyn cementowy (w/c = 0,6; cement portlandzki)	CP	365	1080	36,5	0,420
Zaczyn cementowy (w/c = 0,6; cement portlandzki) Szkło wodne sodowe – 75 cm³	DP	512	1560	20,5	0,249
Biowęgiel – 60 g (trociny po pirolizie) Zaczyn cementowy – 150 cm³ (w/c = 0,6; cement portlandzki)	C	250	430	11,0	0,198
Biowęgiel – 60 g (trociny po pirolizie) Zaczyn cementowy – 150 cm³ (w/c = 0,6; cement portlandzki) Szkło wodne sodowe – 5% obj. w stosunku do objętości mieszaniny	D	80	624	5,9	0,143



Rysunek 6. Zestalone próbki na osnowie zaczynu cementowego o $w/c = 0,5$

Figure 6. Solidified samples based on cement slurry with $w/c = 0.5$



Rysunek 7. Zestalone próbki na osnowie zaczynu cementowego o $w/c = 0,6$

Figure 7. Solidified samples based on cement slurry with $w/c = 0.6$

końca wiązania oraz wyższą wytrzymałością na ściskanie. Przewodność cieplna mieszanin z zaczynem o $w/c = 0,6$ jest o 20–25% niższa niż mieszanin z zaczynem o $w/c = 0,5$.

W drugim etapie pracy przeprowadzono badania laboratoryjne w kierunku optymalizacji procesu zestalania. W tym celu rozszerzono zakres badań o próby zestalania biowęgla otrzymanego w procesie pirolizy za pomocą spoiwa hydraulicznego o zwiększonej zawartości krzemionki. Użyto biowęgla po pirolizie trocin drzew iglastych, w takiej samej ilości jak w badaniach z cementem portlandzkim, które następnie

mieszano z uwodnionym spoiwem hydraulicznym i innymi dodatkami chemicznymi. Zastosowanie spoiwa hydraulicznego w miejsce cementu miało na celu głównie ograniczenie wymywania toksycznych związków chemicznych z zestalonych produktów pirolizy.

W tabeli 3 zestawiono wyniki pomiarów zestalonych próbek biowęgla z trocin drzewnych ze spoiwem o $w/c = 0,5$. Równolegle przeprowadzono badania mieszanin bez dodatku biowęgla. Na podstawie uzyskanych wyników zauważono, że dodatek biowęgla do mieszaniny zestalającej zarówno bez

Tabela 3. Wpływ biowęgla z trocin drzewnych na właściwości mieszanin wiążących o $w/c = 0,5$

Table 3. The effect of biochar from wood sawdust on the properties of binding mixtures with $w/c = 0.5$

Skład mieszaniny	Oznaczenie próbki	Początek wiązania	Koniec wiązania	Wytrzymałość na ściskanie	Przewodność cieplna
		[min]	[min]	[MPa]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Spoiwo hydrauliczne (w/c = 0,5)	FP	450	620	17,0	0,971
Spoiwo hydrauliczne (w/c = 0,5) Szkło wodne sodowe – 75 cm ³	GP	80	310	14,2	0,960
Biowęgiel – 60 g (trociny po pirolizie) Spoiwo hydrauliczne – 150 cm ³ (w/c = 0,5; cement portlandzki)	F	20	210	5,6	0,480
Biowęgiel – 60 g (trociny po pirolizie) Spoiwo hydrauliczne – 150 cm ³ (w/c = 0,5; cement portlandzki) Szkło wodne sodowe – 5% obj. w stosunku do objętości mieszaniny	G	5	150	5,0	0,204



Rysunek 8. Zestalone próbki z dodatkiem spoiwa hydraulicznego, $w/c = 0,6$

Figure 8. Solidified samples with the addition of hydraulic binder, $w/c = 0.6$

Tabela 4. Wpływ biowęglu z trocin drzewnych na właściwości mieszanin wiążących o $w/c = 0,6$

Table 4. The effect of biochar from wood sawdust on the properties of binding mixtures with $w/c = 0.6$

Skład mieszaniny	Oznaczenie próbki	Początek wiązania	Koniec wiązania	Wytrzymałość na ściskanie	Przewodność cieplna
		[min]	[min]	[MPa]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Spoiwo hydrauliczne ($w/c = 0,6$)	HP	582	680	18,0	0,957
Spoiwo hydrauliczne ($w/c = 0,6$) Szkło wodne sodowe – 75 cm³	IP	66	510	15,0	0,938
Biowęgiel – 60 g (trociny po pirolizie) Spoiwo hydrauliczne – 150 cm³ ($w/c = 0,6$; cement portlandzki)	H	145	256	6,2	0,564
Biowęgiel – 60 g (trociny po pirolizie) Spoiwo hydrauliczne – 150 cm³ ($w/c = 0,6$; cement portlandzki) Szkło wodne sodowe – 5% obj. w stosunku do objętości mieszaniny	I	0	203	5,5	0,249

dotatku szkła wodnego, jak i z jego dodatkiem spowodował około 3-krotne obniżenie jej wytrzymałości na ściskanie i znaczne skrócenie początku (około 20-krotne) i końca (około 2–3-krotne) wiązania. Dodatek biowęglu z trocin drzew iglastych do mieszaniny wiążącej o $w/c = 0,5$ wpłynął również na obniżenie o około 50–80% jego przewodności cieplnej (rysunki 6–7).

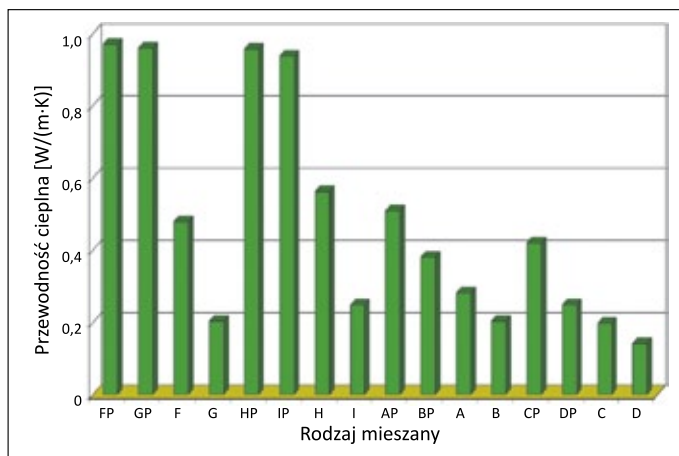
Uzyskanie mieszanin biowęglu ze spoiwem hydraulicznym o $w/c = 0,5$, zestawionych w tabeli 3, było również dość trudne. W celu otrzymania bardziej płynnej mieszaniny przeprowadzono badania z zastosowaniem mieszaniny wiążącej o $w/c = 0,6$ (tabela 4). Uzyskane mieszaniny (rysunek 8) w stosunku do zestawionych w tabeli 1 cechują się dłuższymi czasami początku i końca wiązania oraz wyższą wytrzymałością na ściskanie. Przewodność cieplna mieszanin zestawiających o $w/c = 0,6$ jest również nieznacznie wyższa do przewodności mieszanin o $w/c = 0,5$.

Węgiel pirolityczny został zestalony z wykorzystaniem poszczególnych komponentów wchodzących w skład mieszaniny

wiązącej. Próbkami kamieni cementowych poddano badaniom pod kątem możliwości ich składowania na składowisku odpadów zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz.U. z 2013 r. poz. 38). W związku z tym kamienie cementowe zawierające węgiel pirolityczny poddano testom wymywania substancji szkodliwych, a następnie na podstawie otrzymanych wyników określono przynależność do danej grupy odpadów poprzez sprawdzenie dopuszczalnych wartości wymywania. Wyniki testów wymywania przedstawiono w tabeli 5.

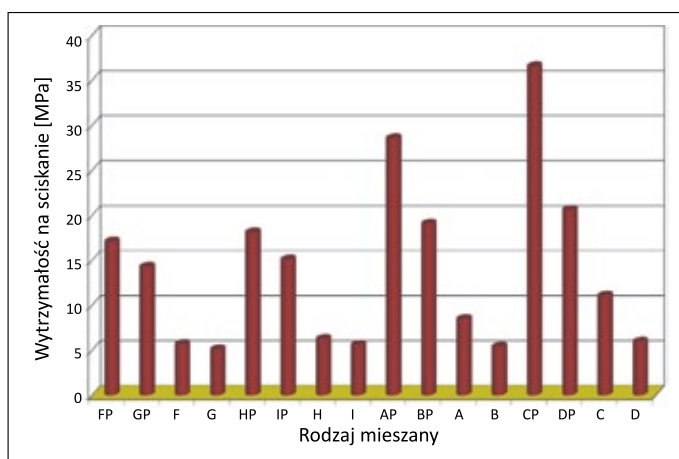
Zawartość stałych związków rozpuszczonych (TDS) we wszystkich badanych próbkach odcieków kształtuje się na stosunkowo niskim poziomie. Można natomiast zauważyć znaczące różnice w zależności od zastosowanych składników do sporządzania zaczynów cementowych.

Niskie zawartości substancji rozpuszczonych stwierdzono w przypadku próbek A (cement $w/c = 0,5$ + biowęgiel),



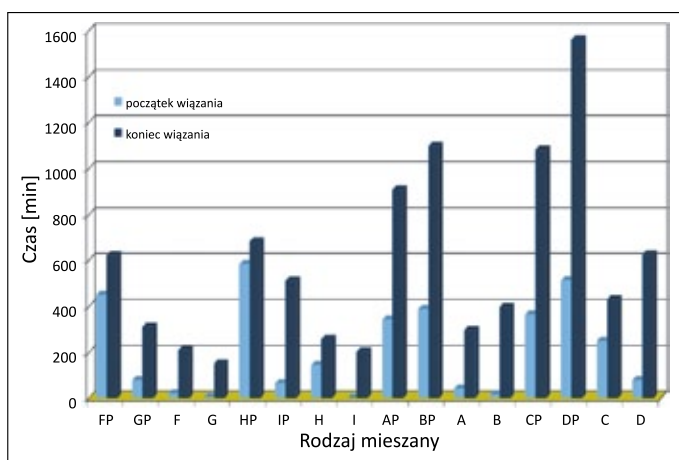
Rysunek 9. Porównanie przewodności cieplnej zestalonych próbek biowęgla

Figure 9. Comparison of thermal conductivity of solidified biochar samples



Rysunek 10. Porównanie wytrzymałości na ściskanie zestalonych próbek biowęgla

Figure 10. Comparison of compressive strength of solidified biochar samples



Rysunek 11. Porównanie czasów wiązania zestalonych próbek biowęgla

Figure 11. Comparison of binding times of solidified biochar samples

C (cement w/c = 0,6 + biowęgiel). W odciekach z próbek B (cement w/c = 0,5 + szkło wodne + biowęgiel), D (cement w/c = 0,6 + szkło wodne + biowęgiel), H (spoiwo hydrauliczne w/s = 0,6 + biowęgiel) oraz I (spoiwo hydrauliczne w/s = 0,6 + szkło wodne + biowęgiel) oznaczono wyższe zawartości substancji rozpuszczonych, w granicach od 1077 mg/dm³ (próbka B) do 1402 mg/dm³ (próbka I). Należy zauważyć, że chociaż występuje wyraźne zróżnicowanie w zawartości substancji rozpuszczonych w poszczególnych odciekach, to wszystkie kształtują się na niskim poziomie i nie przekraczają dopuszczalnych wartości ustalonych na 100 000 mg/dm³. Wymywalność substancji rozpuszczalnych zwiększa się dla kamieni uzyskanych z dodatkiem szkła wodnego sodowego R-145 oraz dla spoiwa hydraulicznego. Podsumowując, analizy zawartości poszczególnych składników odcieków (TDS, chlorków, siarczanów, fluorków, rozpuszczonego węgla organicznego oraz metali ciężkich: As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn), stanowiących kryteria dopuszczające dany materiał do składowania w żadnym przypadku nie wykazały przekroczenia dopuszczalnych wartości wymywania.

Wnioski

Przeprowadzone próby zestalania biowęgla uzyskanego po procesie pirolizy potwierdziły możliwość wykorzystania cementu portlandzkiego i zastosowanego spoiwa hydraulicznego do zagospodarowania powstałych produktów. Maksymalny stosunek objętościowy biowęgla do zaczynów cementowych w mieszaninie wynosi 1 : 1. Większa zawartość biowęgla uniemożliwia prawidłowe wymieszanie składników i ich zestalenie.

Uzyskane wartości wytrzymałości na ściskanie zestalonych próbek potwierdzają możliwość zastosowania ich do wypełniania wyrobisk. Przeprowadzone dodatkowo pomiary ich przewodności cieplnej wskazują na możliwość wykorzystania ich jako materiałów termoizolacyjnych.

W celu potwierdzenia bezpieczeństwa stosowania zestalonych próbek istnieje konieczność określenia wymywalności toksycznych związków chemicznych z próbek po zestaleniu.

Zastosowanie spoiwa hydraulicznego zamiast cementu portlandzkiego przyczynia się do skrócenia czasu końca wiązania zestalonych mieszanin o około 50%. Próbkę biowęgla zestalane badanym spoiwem hydraulicznym wykazują mniejszą wytrzymałość na ściskanie o 30–40% niż próbki zestalane cementem portlandzkim bez dodatku szkła wodnego. Próbkę z dodatkiem szkła wodnego mają porównywalne wartości wytrzymałości na ściskanie i są one niższe od wartości bez dodatku szkła wodnego. Próbkę zestalane spoiwem hydraulicznym wykazują wyższe wartości przewodnictwa cieplnego niż odpowiadające

Tabela 5. Badania laboratoryjne wymywalności z zestalonych węgli pirolitycznych przy zastosowaniu środków wiążących cementu i spoiwa hydraulicznego z dodatkiem szkła wodnego sodowego

Table 5. Laboratory tests of leachability from solidified pyrolytic coals using cement and hydraulic binder agents with the addition of sodium water glass

Oznaczenie	Jednostka	Analizowana próbka						Wartości dopuszczalne
		odciek wodny (10 : 1) z kamieni cementowych po zestaleniu węgla pirolitycznego						
		A	B	C	D	H	I	
pH		10,12	10,10	9,92	10,09	10,54	10,04	–
Stale związki rozpuszczone (TDS)	[mg/kg s.m.]	317	1077	421	1182	1261	1402	100 000
Zawartość jonów Cl ⁻		38,57	29,03	25,50	30,01	338,0	312,0	25 000
Zawartość jonów SO ₄ ²⁻		57,0	480	140	500	200	350	50 000
Zawartość jonów F ⁻		0,68	1,80	1,21	1,44	0,79	1,04	500
Rozpuszczony węgiel ogólny		811	770	810	813	864	887	–
Rozpuszczony węgiel organiczny (DOC)		537	512	564	552	617	633	1 000
Rozpuszczony węgiel nieorganiczny		64	58	46	61	47	54	–
Arsen (As)		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	25
Bar (Ba)		0,84	0,79	0,82	0,77	0,83	0,89	300
Kadm (Cd)		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	5
Chrom (Cr)		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	70
Miedź (Cu)		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	100
Rtęć (Hg)		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	2
Nikiel (Ni)		0,045	0,052	0,061	0,054	0,066	0,058	40
Ołów (Pb)	0,019	0,015	0,017	0,031	0,021	0,012	50	
Antymon (Sb)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	5	
Selen (Se)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	7	
Cynk (Zn)	1,01	0,96	1,15	0,84	0,84	0,77	200	
Cyna (Sn)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	–	
Molibden (Mo)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	30	
Kobalt (Co)	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	–	

n.s. – nie stwierdzono, "–" – nie określono dopuszczalnej wartości

im próbki zestalane cementem, co sprawia, że są one gorszym materiałem termoizolacyjnym.

Nie stwierdzono nadmiernego wymywania składników i przekroczenia kryteriów dopuszczających materiał do składowania ani wzrostu toksyczności odcieków.

Niekorzystne zmiany parametrów zaczynów cementowych powodują konieczność weryfikacji ich przydatności do konkretnych zastosowań, np. do wypełniania wyrobisk lub wykonywania podbudowy drogi czy przegród betonowych. Natomiast obniżenie przewodności cieplnej sugeruje możliwość użycia zestalonych węgla pirolitycznych jako materiałów termoizolacyjnych.

Każde wykorzystanie zestalonego biowęgla odpadowego po procesie pirolizy powinno zostać poprzedzone doboru proporcji mieszanin oraz przeprowadzeniem badań kluczowych parametrów wymaganych dla danego zastosowania.

Z uwagi na słabą zwilżalność badanego biowęgla można sądzić, że większość wymywanych substancji mineralnych pochodzi z zastosowanych mieszanin wiążących. Natomiast właściwości uzyskiwanego biowęgla (powstawanie pyłów oraz możliwość wytworzenia nieprzepuszczalnej warstwy, zaburzającej obieg wody w glebie), w przypadku uzyskiwania dużych ilości tego odpadu w procesach przemysłowych, powodują, że jego składowanie w niezmienionej postaci może stanowić zagrożenie dla środowiska i będzie wymagało właściwego zagospodarowania.

Podsumowując, analizy zawartości poszczególnych składników odcieków (TDS, chlorków, siarczanów, fluorków, rozpuszczonego węgla organicznego oraz metali ciężkich: As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn), stanowiących kryteria dopuszczające dany materiał do składowania, w żadnym przypadku nie wykazały przekroczenia dopuszczalnych wartości wymywania.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Opracowanie technologii pirolizy biomasy odpadowej ukierunkowanej na pozyskanie produktów ciekłych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0045/KW/KE/2023; 0045/KW/KE/2024; nr archiwalny: DK-4100-45/24.

Literatura

Biocarbon – produkt przyszłości w rolnictwie. <<https://agronews.com.pl/artykul/biocarbon-produkt-przyszlosci-w-rolnictwie/>> (dostęp: 5.09.2024).

Biochar for Carbon sequestration and large-scale removal of greenhouse gases (GHG) from the atmosphere. <<https://cordis.europa.eu/article/id/169552-biochar-for-carbon-sequestration/pl>> (dostęp: 5.09.2024).

Biowęgiel jako materiał budowlany. <https://www.bankier.pl/forum/temat_biowegiel-jako-material-budowlany,20820825.html> (dostęp: 5.09.2024).

Biowęgiel z biomasy – sposób na mniej niż zero emisji CO₂. <<https://czysteogrzewanie.pl/>> (dostęp: 5.09.2024).

Bis Z., 2012. Biowęgiel – powrót do przeszłości, szansa dla przyszłości. *Czysta Energia*, 6: 28–31.

Gładki J., 2017. Biowęgiel szansą dla zrównoważonego rozwoju: na podstawie prac i badań własnych. *Oficyna Poligraficzna Apla, Kielce*.

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(1): 113787. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113787.

Malińska K., Mełgieś K., 2016. Aktualne wymagania jakościowe i prawne dla biowęgla jako nawozu i polepszacza gleby. *Prace ICIMB*, 26: 82–95.

Medyńska-Juraszek A., 2016. Biowęgiel jako dodatek do gleb. *Soil Science Annual*, 67(3): 151–157. DOI: 10.1515/ssa-2016-0018.

Mierzwa-Hersztek M., Gondek K., Bajda T., Kopeć M., 2019. Zastosowanie biowęgla i zeolitu jako adsorbentów zanieczyszczeń mineralnych. *Przemysł Chemiczny*, 98(12): 1969–1972. DOI: 10.15199/62.2019.12.19.

Murawska K., Fastyn J., Drożdżyński A., 2021. Zastosowanie w sektorze przemysłowym biokarbonizatu otrzymywanego metodami przetwarzania biomasy. *Technologia i Jakość Wytwarzania*, 66: 185–197.

Poluszyńska J., Ślęzak E., Wieczorek P.P., 2019. Biowęgiel jako środek polepszający właściwości gleby. *Przemysł Chemiczny*, 98(1): 98–105. DOI: 10.15199/62.2019.1.15.

Retajczyk M., Wróblewska A., 2018. Piroliza biomasy jako źródło energii. *Wiadomości Chemiczne*, 72(3–4): 127–146.

Sisman M., Teomete E., Yanik J., Malayoglu U., Tac G.D., 2023. Wpływ nanometrycznego karbonizatu z łupin pestek moreli na właściwości mechaniczne kompozytów cementowych. *Cement Wapno Beton*, 28(1): 2–15. DOI: 10.32047/CWB.2023.28.1.1.

Ślądceczek F., Głodek-Bucyk E., 2017. Badania wykorzystania niskotemperaturowej pirolizy do przetwarzania biomasy odpadowej na biowęgiel w instalacji testowej. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Warszawa*, 28: 50–61.

Steliga T., Uliasz M., 2018. Innowacyjna technologia zestalania zużytych płuczek wiertniczych. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu*, 221: 1–272. DOI: 10.18668/PN2018.221.

Steliga T., Uliasz M., Błaż S., Zima G., Jasiński B., Szajna A., Szubra G., Klug D., Jakubowicz P., Bęben D., 2020. Sposób zestalania zużytych wodnodypersyjnych płuczek wiertniczych typu bentonitowego i polimerowego. Patent Nr PL 234371. WUP 02/2020.

Steliga T., Uliasz M., Kotwica Ł., Kremieniewski M., 2018. Assessment of mechanical parameters and physical and chemical properties of solidified drilling-related waste. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*, 34(1): 97–118. DOI: 10.24425/118645.

Uliasz M., Błaż S., Zima G., 2010. Zagospodarowanie zużytych płuczek otworowych poprzez ich zestalanie. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu. Wydanie konferencyjne Geopetrol*, 2010, 170: 745–749.

Uliasz M., Kremieniewski M., 2012. Określenie efektywności zestalania urobku w aspekcie zagospodarowania odpadów wiertniczych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 9(217): 12–19.

Uliasz M., Steliga T., Błaż S., Zima G., Kinel D., Szubra G., Klug D., Jakubowicz P., 2013. Kompozycja środka do zestalania zużytych płuczek wiertniczych. Patent Nr PL 213056 B1. WUP 01/2013.

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: 29.08.2024).

Akty prawne i dokumenty normatywne

Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 8 stycznia 2013 r. w sprawie kryteriów oraz procedur dopuszczania odpadów do składowania na składowisku odpadów danego typu (Dz.U. z 2013 r. poz. 38).



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. 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 Piotr JAKUBOWICZ
Adiunkt w Zakładzie Technologii Eksploatacji
Płynów Złożowych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: piotr.jakubowicz@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 PRZESYŁANIA I DYSTRYBUCJI GAZU

- badania wyrobów z polietylenu do budowy gazociągów, wodociągów oraz kanalizacji deszczowej i sanitarnej;
- badania systemów rurowych z tworzyw sztucznych do instalacji wody ciepłej i zimnej;
- badania armatury metalowej do sieci i instalacji gazowych oraz wodociągowych;
- badania armatury sanitarnej oraz do instalacji centralnego ogrzewania i solarnych;
- badania powłok ochronnych z tworzyw sztucznych na rurach i armaturze stalowej;
- ocena stopnia zagrożenia korozyjnego gazociągów stalowych;
- ocena stanu technicznego izolacji gazociągów stalowych metodami bezwykopowymi;
- badania nowych materiałów z tworzyw sztucznych do budowy gazociągów;
- badania systemów z PE pod kątem możliwości ich stosowania do przesyłania mieszaniny gazu ziemnego i wodoru;
- specjalistyczne szkolenia – szkolenie i kwalifikacja personelu zgrzewającego rury i kształtki z PE wg PN-EN 13067 w INiG-PIB jako Ośrodku Szkoleniowym i Egzaminacyjnym uznanym przez UDT-CERT.



Kierownik: mgr inż. Piotr Szewczyk Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków
Telefon: 12 617 74 42 Faks: 12 653 16 65 E-mail: piotr.szewczyk@inig.pl



INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy