

BIOWĘGIEL JAKO MATERIAŁ POMOCNICZY W PROCESIE PRODUKCJI BIOGAZU

Krystyna Malińska¹, Jacek Dach²

¹ Instytut Inżynierii Środowiska, Politechnika Częstochowska, ul. J.H. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa, e-mail: kmalinska@is.pcz.czyst.pl

² Instytut Inżynierii Biosystemów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 50, 60-637 Poznań, e-mail: jdach@up.poznan.pl

STRESZCZENIE

Biowęgiel z uwagi na swoje właściwości fizyko-chemiczne może znaleźć zastosowanie w wielu obszarach inżynierii i ochrony środowiska. Ostatnie doniesienia literaturowe podają, że biowęgiel może być również wykorzystywany do zwiększenia efektywności produkcji biogazu. O jego przydatności decydują m.in. takie właściwości jak stabilność pod względem chemicznym, rozwinięta powierzchnia właściwa, mikroporowatość oraz obecność grup funkcyjnych. Wyniki nielicznych prac badawczych wskazują, że biowęgiel może przyczyniać się do wzrostu tempa mineralizacji materii organicznej i produkcji metanu. Z uwagi na relatywnie wysoki koszt biowęgla wskazuje się na przyjęcie kompleksowego rozwiązania w produkcji biogazu zakładającego zastosowanie biowęgla do: (1) pozyskiwania biomasy do produkcji biogazu (dodatek do paszy i ściółki, polepszacz do gleb), (2) przygotowania wsadu do procesu fermentacji (dodatek do wsadu), (3) zaszczepiania wsadu w procesie fermentacji (nośnik mikroorganizmów), (4) oczyszczania biogazu (absorbent zanieczyszczeń), (5) oczyszczania frakcji ciekłej pofermentu (sorbent), (6) zagospodarowanie frakcji stałej pofermentu (substrat do produkcji biowęgla). Jednakże dostępne w literaturze wyniki prac badawczych wymagają dalszych badań i weryfikacji w warunkach rzeczywistych oraz poznania i wyjaśnienia wpływu biowęgla i jego właściwości na dynamikę przebiegu procesu fermentacji metanowej.

Słowa kluczowe: biowęgiel, fermentacja metanowa, produkcja biogazu, usuwanie amoniaku, pulpa pofermentacyjna, poferment.

BIOCHAR AS A SUPPLEMENTARY MATERIAL FOR BIOGAS PRODUCTION

ABSTRACT

In view to numerous physical and chemical properties biochars can be used in many applications in the area of environmental protection and engineering. Recent findings show that biochar can be also applied in biogas production. Relatively high chemical stability and low susceptibility to degradation, high specific surface area, microporosity and the presence of functional groups indicate that biochar can have a potential for production of biogas. The available results from laboratory studies show that biochar can facilitate mineralization of organic matter and increase the yield of methane. Due to relatively high cost of biochar, the most favourable solution would include the following applications of biochar: (1) production of biomass for biogas production (as an additive to animal feed and bedding, a soil conditioner), (2) preparation of mixture (as an amendment), (3) inoculation of microorganisms (as an inoculum carrier), (4) treatment of biogas (as an absorbent), (5) treatment of liquid fraction of digestate (as a sorbent), (6) management of solid fraction of digestate (as a substrate for biochar production). However, the conducted studies need further work and confirmation in larger scale. Also, the effects of biochar on anaerobic fermentation dynamics should be investigated and explained.

Keywords: biochar, anaerobic digestion, biogas yield, removal of ammonia, digestate,

WSTĘP

W ostatnim czasie obserwuje się rosnące zainteresowanie właściwościami biowęgla i jego zastosowaniami w energetyce, przemyśle, rolnic-

twie ale przede wszystkim w ochronie środowiska. Można nawet zaryzykować stwierdzenie, że biowęgiel – a co za tym idzie jego właściwości i potencjalne zastosowania – jest obecnie odkrywany na nowo. Biowęgiel pod względem struk-

tury i właściwości jest materiałem zbliżonym do tradycyjnego węgla drzewnego. Powstaje w wyniku termicznej konwersji biomasy, podczas której powstają również produkty ciekłe i gazowe o wartości energetycznej. Właściwości biowęgla takie jak stabilność pod względem chemicznym, rozwinięta powierzchnia właściwa, mikroporowatość i obecność grup funkcyjnych pozwalają na jego wykorzystanie w ochronie środowiska, m.in. do usuwania zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych z zanieczyszczonych wód i ścieków oraz gruntów i gazów procesowych [Ahmad i in., 2014; Mohan i in., 2014; Steiner i in. 2010] oraz do zwiększenia aktywności mikroorganizmów [Luo i in., 2015]. Z tego względu biowęgiel może być również wykorzystywany w procesie fermentacji metanowej jako materiał pomocniczy. Pomimo że proces fermentacji metanowej jest dość dobrze poznany i stosowany powszechnie w różnego typu biogazowniach, w dalszym ciągu istnieje konieczność jego optymalizacji. Problemy związane z produkcją biogazu dotyczą zapewnienia stabilności przebiegu procesu, wysokiego udziału metanu w biogazie oraz ograniczenia działania czynników hamujących proces fermentacji metanowej [Mumme i in., 2014; Luo i in., 2015]. Szczególnie dotyczy to substratów o dużej zawartości azotu (np. odpady pochodzenia zwierzęcego, produkty uboczne z rzeźni, itp.), z których można otrzymać najwięcej biogazu. W przypadku takich substratów niekorzystny wpływ na przebieg procesu może mieć wysokie stężenie azotu, który wpływa inhibującą na wzrost bakterii metanogennych, tym samym może doprowadzić do zahamowania procesu metanogenezy (stężenie azotu powyżej 3 g/L jest toksyczne dla mikroorganizmów). Amoniak powstający z nadmiaru azotu działa również hamująco na przebieg metanogenezy [Czerwińska i Kalinowska, 2014; Mumme i in., 2014]. Wśród metod pozwalających na obniżenie stężenia amoniaku podczas fermentacji metanowej jest stosowanie w reaktorach materiałów nieorganicznych takich jak np. zeolity czy też węgiel aktywny. Zeolity pozwalają na usuwanie amoniaku i jonów amonowych na drodze adsorpcji i wymiany jonowej na ich powierzchni reaktywnej [Zabochnicka-Świątek i Malińska, 2010].

Z uwagi na właściwości fizyko-chemiczne, również i biowęgiel może być z powodzeniem stosowany do usuwania amoniaku (NH_3) i jonów amonowych (NH_4^+) w procesie fermentacji metanowej. Co więcej, dodatek biowęgla o dużej mikroporowatości jest korzystny dla rozwoju i

aktywności mikroorganizmów. W rezultacie, proces fermentacji przebiega korzystniej i możliwe jest uzyskanie większej ilości metanu. Należy jednak podkreślić, że przykłady badań nad możliwościami wykorzystania biowęgla w procesie fermentacji są nieliczne i dotyczą głównie skali laboratoryjnej. Brak też w literaturze wyjaśnienia mechanizmów procesów, w szczególności procesów mikrobiologicznych, zachodzących podczas fermentacji metanowej na skutek obecności biowęgla [Luo i in., 2015]. Z uwagi na bariery ekonomiczne celowym jest zintegrowanie zastosowań biowęgla w procesie produkcji biowęgla i uzyskanie efektu synergii. Biowęgiel może być zatem wykorzystywany w fermentacji metanowej jako dodatek do wsadu, tym samym wspomagać efektywność przebiegu procesu i produkcję biogazu podczas procesu. Powstały w wyniku fermentacji metanowej poferment może być wykorzystany do produkcji biowęgla lub hydrowęgla [Mumme i in., 2011], których zastosowanie może również obejmować oczyszczanie otrzymanego biogazu np. ze związków siarki (Graydon i in., 2012). Wskazuje się, że biowęgiel może pozostać w pofermencie bez konieczności oddzielania, i może być z powodzeniem stosowany jako polepszacz do gleb, np. do nawożenia pól ryżowych [Luo i in., 2015; Watanabe i in., 2013]. Co więcej, wskazuje się, że dodatek biowęgla do gleb może znacząco redukować emisje gazów cieplarnianych z gleb podczas uprawy roślin energetycznych, które również wykorzystywane są jako substraty do fermentacji metanowej czy też otrzymywania biowęgla [Case i in., 2014].

Celem niniejszej pracy jest analiza aktualnego stanu wiedzy na temat możliwości wykorzystania biowęgla w procesie produkcji biogazu, jego wpływu na dynamikę przebiegu fermentacji metanowej i produkcję biogazu oraz wskazanie dalszych kierunków badań.

BIOWĘGIEL – PRODUKCJA, WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIA

Biowęgiel (karbonizat, biokarbon, bioczar – ang. *charcoal*, *biocarbon*, *biochar*) to – wg definicji *International Biochar Initiative* – drobnoziarnisty karbonizat o wysokiej zawartości węgla organicznego i o nieznacznej podatności na degradację, produkowany w procesie pirolizy biomasy i odpadów biodegradowalnych. Badacze określają biowęgiel jako

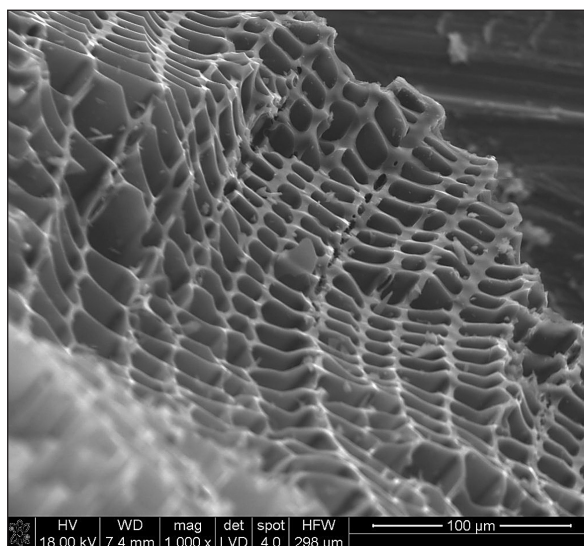
porowatą, węglową pozostałość otrzymaną w procesie termochemicznej konwersji materiałów organicznych w atmosferze beztlenowej, który posiada fizyko-chemiczne właściwości pozwalające na bezpieczne i długotrwałe przechowywanie węgla w środowisku [Bis, 2012; Shackely i in., 2012]. Należy podkreślić, że *European Biochar Certificate* (EBC) wyklucza z definicji biowęgla produkty otrzymane w wyniku procesów hydrotermicznej karbonizacji, toryfikacji i koksowania. Biowęgiel pod względem struktury i właściwości jest zbliżony do tradycyjnego węgla drzewnego, przy czym różnią się one zastosowaniem. Termin „biowęgiel” podkreśla możliwości wykorzystania tego materiału na cele inne niż odzysk energii, tj. przede wszystkim w rolnictwie i ochronie środowiska. Wskazuje również na fakt, że substraty wykorzystane do produkcji biowęgla to biomasa roślinna i odpady organiczne, a nie tworzywa sztuczne, np. opony gumowe. Co więcej, biowęgiel wykorzystywany na cele rolnicze powinien spełniać określone wymagania jakości i bezpieczeństwa wprowadzania do gleb. Wymagania te podaje tzw. *European Biochar Certificate* (EBC) – certyfikat, który został wprowadzony w 2013 w Szwajcarii (jest to jedyny kraj w Unii Europejskiej posiadający system oceny jakości biowęgla). Dotyczą one przede wszystkim zawartości mikrozanieczyszczeń takich jak wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), polichlorowane bifenyle (PCB), dioksyny i furany oraz metale ciężkie (Pb, Cd, Cu, Ni, Hg, Zn, Cr).

Biowęgiel produkowany jest na drodze termicznej konwersji biomasy w wysokiej temperaturze bez dostępu tlenu, podczas której oprócz karbonizatu powstają produkty o znaczeniu energetycznym: olej będący mieszaniną ciekłych węglowodorów oraz gaz syntetyczny będący mieszaniną gazowych węglowodorów [Lewandowski i in., 2010; Verheijen i in., 2010]. Literatura podaje szeroki zakres temperatury stosowanej do termicznej konwersji biomasy do biowęgla, tj. od 100 do 1000 °C. Udział biowęgla w produktach pirolizy zależy od parametrów procesu, przede wszystkim od temperatury procesu i czasu przebywania w temperaturze końcowej. Podczas szybkiej pirolizy (temp. 300–1000 °C, <2 s) można uzyskać ok. 12% biowęgla, umiarkowanej pirolizy (500 °C, 10–20 s) ok. 25%, a powolnej pirolizy (100–1000 °C, 5–30 min.) ok. 35% [Mohan et al., 2006; Brown, 2009; Lewandowski i in., 2010; Ahmad i in., 2014]. Do produkcji biowęgla można wykorzystywać różne rodzaje biomasy,

które klasyfikuje się w dwie grupy substratów: (1) tzw. pierwotna biomasa na cele bioenergetyczne i do produkcji biowęgla oraz (2) tzw. biomasa odpadowa [Brick, 2010]. Przy czym, wykorzystanie biomasy odpadowej jest bardziej uzasadnione z uwagi na czynniki ekonomiczne oraz brak konkurencji upraw roślin energetycznych z uprawami roślin żywnościowych. Wśród substratów do produkcji biowęgla znajdują się: rośliny energetyczne (np. miskant, wierzba), odpady leśne, biomasa rolnicza (np. rzepak, słonecznik, kolby kukurydzy), odpady z przetwórstwa rolno-spożywczego, osady ściekowe, organiczna frakcja odpadów komunalnych, odpady z hodowli i przetwórstwa zwierząt gospodarskich i drobiu (np. kości, obornik, pomiot kurzy) oraz biomasa alg czy też roślin wodnych [Sánchez i in., 2009; Kwapinski i in., 2010; Bird i in., 2011; Song i Guo, 2012; Ibarrola i in., 2012; Novotny i in., 2012; Muradov i in., 2012].

Na właściwości fizyko-chemiczne biowęgla wpływa wiele czynników, z których najistotniejsze to rodzaj i właściwości substratu oraz parametry procesu pirolizy. Biowęgiel może charakteryzować się wysokim udziałem węgla 50–90%, substancji lotnych 0–40%, substancji mineralnych 0,5–5% [Lehman i Joseph, 2009; Verheijen i in., 2010]. Biowęgiel jest stabilny pod względem składu chemicznego, ponieważ wykazuje niewielką podatność na degradację oraz rozkład mikrobiologiczny. Wśród parametrów fizycznych, w dużej mierze odpowiedzialnych za przebieg wielu przemian i procesów, wyróżnia się porowatość i powierzchnię właściwą biowęgla. Zależą one od rodzaju substratu oraz parametrów pirolizy (głównie temperatury). Ze wzrostem temperatury rośnie powierzchnia właściwa oraz objętość porów [Ahmad i in., 2014; Ahmad i in. 2012; Chen i Chen, 2009; Mohan i in., 2011; Karaosmanoğlu i in., 2000; Liu i in., 2010]. Na przykład piroliza rzepaku (cała roślina) w temperaturze 500 i 900 °C pozwala na uzyskanie biowęgla o powierzchni właściwej odpowiednio 15,7 i 140,4 m²·g⁻¹ oraz objętości porów odpowiednio 1,150 i 1,323 cm³·g⁻¹ [Karaosmanoğlu i in., 2000]. Podczas gdy np. osady ściekowe poddane pirolizie w temperaturze 300 i 700 °C dają biowęgiel o powierzchni właściwej odpowiednio 4,5 i 54,8 m²·g⁻¹ oraz objętości porów odpowiednio 0,010 i 0,050 cm³·g⁻¹ [Ahmad i in., 2014]. Zastosowanie biowęgla do usuwania zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych ze środowiska zależy również od obecności powierzchniowych

grup funkcyjnych (np. karboksylowej, hydroksylowej, fenolowej). Podane przykłady świadczą o tym, że dobór odpowiedniego substratu i parametrów procesu pozwala na zaprojektowanie końcowych właściwości biowęgla, tak aby odpowiadał danemu zastosowaniu.



Rys. 1. Struktura biowęgla z odpadów drzewnych w powiększeniu (materiały własne)

Fig. 1. Structure of biochar produced from wood biomass under magnification (the author's material)

Aktualna lista potencjalnych zastosowań biowęgla dotyczy energetyki, ochrony środowiska, rolnictwa oraz przemysłu i obejmuje wykorzystanie biowęgla np.:

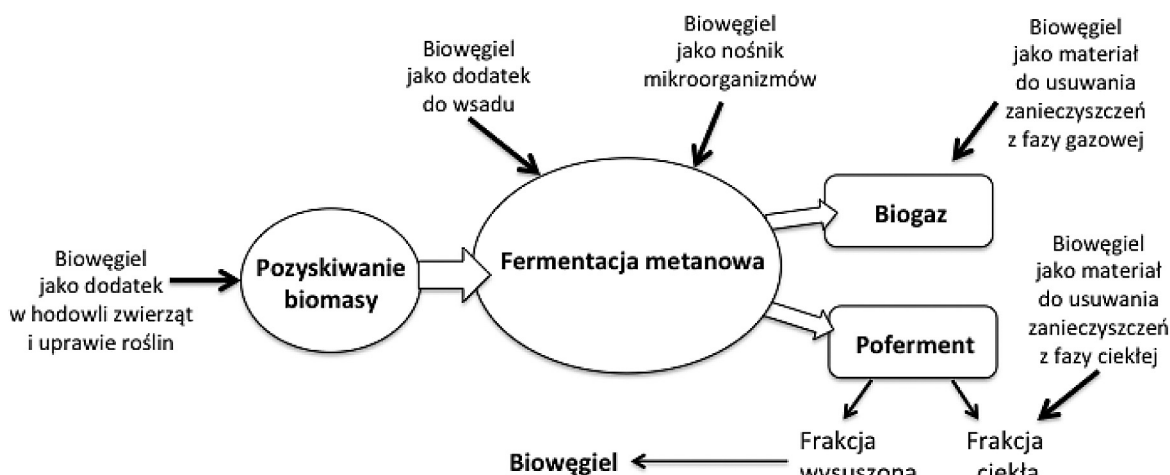
- w chowie zwierząt (dodatek do kiszzonek, dodatek do pasz, dodatek do ściółki, materiał pomocniczy w kompostowaniu obornika i pomiotu kurzego, materiał stosowany do oczyszczania wody w stawach rybnych, itp.) [Schmidt, 2012b; Pereira i in., 2014],
- jako polepszaczka do gleb (naturalny nawóz z dodatkiem gnojowicy, komposty z dodatkiem biowęgla, substytut torfu, itp.),
- jako materiał pomocniczy w kompostowaniu i wermikompostowaniu [Malińska et al., 2014, Malińska i Zabochnicka-Świątek, 2014; Steiner i in., 2011; Steiner i in., 2010],
- jako materiał w budownictwie (materiał izolacyjny, składnik lekkich materiałów budowlanych, materiał zapobiegający wilgoci i zanieczyszczeniu powietrza, chroniący przed promieniowaniem elektromagnetycznym) [Schmidt, 2012a],
- do usuwania zanieczyszczeń ze środowiska gruntowo-wodnego (remediacja gleb, „zielony” sorbent, składnik barier, itp.) [Mohan i in.,

- 2014; Ahmad i in., 2014; Tang i in., 2013],
- do oczyszczania ścieków [Schmidt, 2012a; Mohan i in., 2014],
- w uzdatnianiu wody do picia (mikro i makro-filtry),
- jako dodatek wspomagający do wsadu w procesie fermentacji metanowej oraz absorbent do usuwania związków siarki z biogazu [Schmidt, 2012a; Luo i in., 2015].

PRZYDATNOŚĆ BIOWĘGLA W PROCESIE PRODUKCJI BIOGAZU

Nieliczne prace badawcze wskazują, że biowęgiel z uwagi na swoje właściwości fizyko-chemiczne może być przydatny również w procesie produkcji biogazu. Biowęgiel może być wykorzystywany w wielu etapach procesu produkcji biogazu, a wskazane w literaturze możliwości zastosowania obejmują takie obszary jak (rys. 2):

- pozyskanie biomasy do produkcji biogazu – biowęgiel może być wykorzystywany w chowie zwierząt (dodatek do paszy, do ściółki, itp.) ograniczając np. emisję gazów cieplarnianych podczas hodowli, w uprawie roślin redukując emisję gazów cieplarnianych z gleby podczas uprawy,
- przygotowanie wsadu do fermentacji – biowęgiel jako dodatek wspomagający proces poprzez usuwanie nadmiaru amoniaku (NH_3) i jonów amonowych (NH_4^+) oraz wspomaganie aktywności mikroflory bakteryjnej,
- zaszczepienie wsadu do fermentacji – biowęgiel może być nośnikiem mikroorganizmów i służyć jako zaszczepka (np. po impregnacji) do ponownego zastosowania w procesie fermentacji [Inthapanya i in., 2012],
- oczyszczanie biogazu – biowęgiel może być wykorzystany do usuwania np. związków siarki z biogazu [Graydon i in., 2012],
- oczyszczanie frakcji ciekłej pofermentu – biowęgiel może być wykorzystywany do usuwania zanieczyszczeń [Schmidt, 2012a],
- zagospodarowanie frakcji stałej pofermentu – frakcja stała pofermentu, tzw. pulpa pofermentacyjna po osuszeniu może być substratem do produkcji biowęgla, który następnie może być wykorzystany na cele energetyczne lub np. do przygotowania wsadu lub oczyszczania biogazu [Inyang i in., 2010; Graydon i in., 2012; Funke i in., 2013]. Co więcej, poferment zawierający biowęgiel (bez konieczności jego



Rys. 2. Możliwości wykorzystania biowęglu do produkcji biogazu
 Fig. 2. Potential applications of biochar for production of biogas

oddzielania) może być wykorzystywany jako polepszacz do gleb [Luo i in., 2015].

Wpływ biowęglu na przebieg fermentacji metanowej i produkcję biogazu

Wyniki dotychczasowych badań laboratoryjnych nad wpływem biowęglu na przebieg fermentacji metanowej oraz produkcję biogazu wskazują, że biowęgiel:

- wpływa stymulująco na rozwój biofilmu mikroorganizmów na powierzchni cząstek biowęglu i tym samym przyczynia się do wzrostu tempa mineralizacji materii organicznej i produkcji metanu; wskazuje się, że biowęgiel z uwagi na swoją rozwiniętą powierzchnię stanowi medium, które podczas procesu jest zasiedlane przez mikroorganizmy, w rezultacie są unieruchomione tworząc razem z biowęglem biofilm i zwiększając tym samym efektywność procesu produkcji metanu [Inthapanya i in., 2012; Mumme i in., 2014; Luo i in., 2015],
- zwiększa produkcję metanu i wpływa na stężenie poszczególnych gazów; dodatek biowęglu spowodował wzrost stężenia metanu i wodoru przy jednoczesnym obniżeniu dwutlenku węgla i amoniaku [Inthapanya i in., 2012; Kumar i in., 1987]; np. dodatek do biorektora biowęglu o cząstkach 0,5–1% z glukozą (4, 6 i 8 g/L) spowodował znaczne skrócenie lag-fazy nawet o 30% przy jednoczesnym zwiększeniu ilości metanu nawet o ponad 80% [Luo i in., 2015],
- usuwa nadmiar azotu i amoniaku, które są czynnikami działającymi inhibującą na bakterie metanogenne [Mumme i in., 2014],

- nadaje inne właściwości funkcjonalne pofermentowi, dzięki dodatkowi biowęglu do wsadu [Mumme i in., 2014].

Produkcja i zastosowanie biowęglu z pofermentu

W procesie fermentacji metanowej w biogazowniach powstaje produkt uboczny tzw. poferment, który charakteryzuje się cennymi właściwościami nawozowymi i energetycznymi [Czekała i in., 2012]. Oprócz tradycyjnych kierunków zagospodarowania pofermentu jak kompostowanie, suszenie i peletyzacja czy zagospodarowanie metodą odzysku R10, poferment może stanowić substrat do produkcji biowęglu. Na przykład, odwodniony poferment po fermentacji metanowej poddany został peletyzacji, a następnie procesom termicznej konwersji do biowęglu. W rezultacie uzyskano karbonizat o wartości energetycznej 27 506 MJ kg [Maroušek, 2013]. Innym przykładem jest produkcja innowacyjnego biowęglowego absorbenta z odwodnionej pulpy pofermentacyjnej (np. po fermentacji beztlenowej obornika czy biomasy roślinnej). Taki absorbent może powstać podczas jednostopniowej obróbki termicznej w warunkach beztlenowych w temperaturze 500–900 °C. Czynnikiem aktywacyjnym jest gaz (np. azot, dwutlenek węgla, gazy wylotowe z procesu spalania, itp.) o odpowiedniej wilgotności względnej (w zakresie 2–95%), który przepuszczany jest przez złożę pulpy w reaktorze przez okres od 30 min. do 3 h. Proces nie wymaga dodatku związków chemicznych takich jak np. KOH. Umiarkowane warunki procesu pozwalają

Tabela 1. Wpływ wybranych rodzajów biowęglu na produkcję metanu w warunkach laboratoryjnych
Table 1. The effect of selected types of biochar on production of methane in laboratory scale

Rodzaj biowęglu	Tematyka badań	Rezultaty	Źródło
Biowęgiel otrzymany z łusek ryżowych (900-1000°C)	Ocena wpływu dodatku biowęglu na mineralizację materii organicznej i produkcję biogazu podczas fermentacji metanowej gnojowicy bydłowej (temp. 35 °C).	Dodatek 1% biowęglu do fermentatora zwiększył produkcję metanu o 31% po 30 dniach fermentacji ciągłej.	Inthapanya i in., 2012
Biowęgiel otrzymany z drewna owocowego (800°C)	Ocena wpływu wielkości cząstek biowęglu (2-5 mm, 0,5-1mm, 75-150 µm) na długość lag-fazy i ilość otrzymanego metanu podczas fermentacji metanowej osadów ściekowych (temp. 35 °C).	Np. dla cząstek o wielkości 75 µm – lag-faza skrócona o 38,0%, produkcja metanu większa o 70,6%.	Luo i in., 2015
Biowęgiel otrzymany z drewna iglastego (szydlica japońska)	Ocena wpływu biowęglu jako materiału wspomagającego rozwój i aktywność mikroorganizmów podczas fermentacji metanowej glicerolu (temp. 35 °C).	Produkcja metanu w reaktorze z dodatkiem biowęglu była wyższa o 1,6 przy jednoczesnej stabilnej jego produkcji przez okres 50 dni.	Watanabe i in., 2013

na otrzymanie aktywnego absorbentu węglowego, zachowując przy tym strukturę włókien, a usuwając związki celulozowe i hemicelulozowe. Otrzymany absorbent może być wykorzystywany do usuwania związków siarki z biogazu, a po zużyciu może znaleźć zastosowanie w ogrodnictwie i rolnictwie [Graydon et al., 2012]. Biowęglowy absorbent może być alternatywą dla węgla aktywnego, który produkowany jest przeważnie z paliw kopalnych. Okazuje się również, że biowęgiel otrzymany z odwodnionej pulpy pofermentacyjnej może charakteryzować się innymi właściwościami niż biowęgiel otrzymany z tradycyjnej biomasy. Inyang i in., [2010] porównywali właściwości biowęglu otrzymanego z przefermentowanych i świeżych wysłodzin z trzciny cukrowej. Okazało się, że biowęgiel z przefermentowanych wysłodzin charakteryzował się wyższym pH, większą powierzchnią właściwą oraz kationową i anionową pojemnością wymienną, jak również hydrofobowością. Właściwości te są korzystne w przypadku zastosowania biowęglu do remediacji zanieczyszczonych gleb czy oczyszczania ścieków. Otrzymane przez badaczy rezultaty wskazują, że piroliza stałej frakcja pofermentu może być jednym z uzasadnionych ekonomicznie i środowiskowo kierunków zagospodarowania tego typu odpadów i tym samym może być z powodzeniem wykorzystywana jako substrat do otrzymania ekonomicznego absorbentu.

Inne zastosowania biowęglu w produkcji biogazu

Wśród innych zastosowań biowęglu naukowcy wskazują jego wykorzystanie jako katalizatora dla reformingu biogazu. Okazuje się,

że w porównaniu do tradycyjnych katalizatorów (tj. metali szlachetnych takich jak Pt, Rh, Ir) katalizatory oparte na biowęglu są tańsze i bardziej odporne na deaktywację w obecności siarkowodoru lub innych gazów zawierających siarkę [Muradov i in., 2012].

PODSUMOWANIE

Literatura podaje nieliczne przykłady badań nad zastosowaniem biowęglu w procesie fermentacji metanowej i jego wpływem na produkcję biogazu. Przeprowadzone do tej pory prace badawcze ograniczają się do skali laboratoryjnej, a otrzymane wyniki wymagają dalszej weryfikacji w warunkach instalacji pilotażowych oraz przemysłowych. Wyniki badań laboratoryjnych wskazują konieczność prowadzenia dalszych prac dotyczących wpływu biowęglu na przebieg procesu fermentacji metanowej oraz produkcji biogazu. Wśród przyszłych kierunków badań wskazuje się przede wszystkim poznanie mechanizmów interakcji pomiędzy biowęgłem a mikroorganizmami w procesie fermentacji metanowej oraz ich wpływu na dynamikę przebiegu procesu, a w szczególności na produkcję metanu. Z uwagi na zróżnicowane właściwości biowęgli otrzymanych z różnych rodzajów substratów i przy różnych parametrach procesu pirolizy niezbędne będzie określenie właściwości fizyko-chemicznych biowęgli, które to właściwości będą korzystnie wpływały na przebieg procesu fermentacji metanowej. Pozwoli to na odpowiedni dobór substratów i parametrów procesu pirolizy w celu „zaprojektowania” właściwości biowęglu przydatnych w procesie fermentacji.

tacji metanowej. Relatywnie wysokie koszty produkcji biowęgla są wskazywane jako jedną z poważniejszych barier w jego szerszym zastosowaniu. Z tego względu za zasadne uważa się rozważenie kompleksowego rozwiązania dla wykorzystania biowęgla w procesie produkcji biogazu w biogazowniach, co w rezultacie może zapewnić efekt synergii.

PIŚMIENNICTWO

- Ahmad M., Lee S.S., Dou X., Mohan D., Sung J.K., Yang J.E., Ok Y.S. 2012. Effects of pyrolysis temperature of soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology* 118, 536–544.
- Ahmad M., Rajapaksha A.U., Lim J.E., Zhang M., Bolan D.M., Vithanage M., Lee S.S., Ok S.Y. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* 99, 19–33.
- Bargmann I., Rilling M.C., Buss W., Kruse A., Kuecke M. 2013. Hydrochar and biochar effects on germination of spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science* 199, 360–373.
- Bird M.I., Wurster C.M., de Paula Silva P.H., Gass A.M., de Nys R. 2011. Algal biochar – production and properties. *Bioresource Technology* 102, 1886–1891.
- Bis Z., 2012. Biowęgiel – powrót do przeszłości, szansa dla przyszłości. *Czysta Energia* 6.
- Brick S. 2010. Biochar: Assessing the Promise and Risks to Guide US Policy. *Natural Resource Defence Council, USA*.
- Brown R. 2009. Biochar production technology. W: Lehmann J., Joseph S. *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscans, UK, 127–146.
- Case S.D.C., McNamara N.P., Reay D.S., Whitaker J. 2014. Can biochar reduce soil greenhouse gas emissions from a *Miscanthus* bioenergy crop? *Glob. Change Biol. Bioenergy* 6, 76–89.
- Czekała W., Pilarski K., Dach J., Janczak D., Szymańska M. 2012. Analiza możliwości zagospodarowania pofermentu z biogazowni. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 4, 13–15.
- Chen B., Chen Z., 2009. Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. *Chemosphere* 76, 127–133.
- Czerwińska E., Kalinowska K. 2014. Warunki prowadzenia procesu fermentacji metanowej w biogazowni. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* 2, 12–14.
- European Biochar Certificate, <http://www.european-biochar.org/en>
- Funke A., Mumme J., Koon M., Diakite M. 2013. Cascaded production of biogas and hydrochar from wheat straw: Energetic potential and recovery of carbon and plant nutrients. *Biomass and Bioenergy* 58, 229–237.
- Graydon J.W., Kirk D.W., Andrew J.W. 2012. Patent application WO 2012094736: Production of biochar adsorbent from anaerobic digestate (PCT/CA2012/000022).
- Ibarrola R., Shackely S., Hammond J. 2012. Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: a life cycle carbon assessment. *Waste Management* 32, 859–868.
- International Biochar Initiative, <http://www.biochar-international.org>
- Inthapanya S., Preston T.R., Leng R.A. 2012. Biochar increases biogas production in a batch digester with cattle manure. *Livestock Research for Rural Development* 24, <http://www.lrrd.org/lrrd24/12/sang24212.htm>
- Inyang M., Gao B., Pullammanappallil P., Ding W., Zimmerman A.R. 2010. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresource Technology* 10, 8868–8872.
- Karaosmanoğlu F., Ergudenler A.I., Sever A. 2000. Biochar from the straw-stalk of rapeseed plant. *Energy Fuels* 14, 336–339.
- Kwapiński W., Byrne C.M.P., Kryachko E., Wolfram P., Adley C., Leahy J.J., Novotny E.H., Hayes M.W.B. 2010. Biochar from Biomass and Waste. *Waste Biomass Valorization* 1, 177–189.
- Lehman J., Joseph S. (ed.). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan, London 2009.
- Lewandowski W.M., Ryms M., Meler P. 2010. Termiczno-chemiczna piroliza do biopaliw ciekłych i gazowych, jako metoda podnoszenia sprawności konwersji energii biomasy. *Nafta-Gaz* 8, 675–680.
- Liu Z., Zhang F.S., Wu J. 2010. Characterization and application of chars produced from pinewood pyrolysis and hydrothermal treatment. *Fuel* 89, 510–514.
- Luo C., Lü F., Shao L., He P. 2015. Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes. *Water Research* 68, 710–718.
- Malińska K. 2012. Biowęgiel odpowiedzią na aktualne problemy ochrony środowiska. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 15(4), 387–403.
- Malińska K., Dach J. 2014. Możliwości wykorzystania biowęgla w procesie kompostowania. *Inżynieria Ekologiczna* 36, 28–39.

27. Malińska K., Zabochnicka-Świątek M. 2014. The effect of sewage sludge mixture amended with biochar on activity of *Eisenia fetida* during laboratory vermicomposting. European Conference on Sludge Management, 26-27.05.2014, Turcja.
28. Malińska K., Zabochnicka-Świątek M., Dach J. 2014. Effect of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge. Ecological Engineering 71, 474–478.
29. Maroušek J. 2013. Removal of hardly fermentable balast from the maize silage to accelerate biogas production. Industrial Crop and Products 44, 253–257.
30. Mohan D., Pittman C.U., Steele P.H. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. Energy Fuels 20, 848–889.
31. Mohan D., Rajput S., Singh V.K., Steele P.H., Pittman C.U., Jr. 2011. Modeling and evaluation of chromium remediation from water using low cost bio-char, a green adsorbent. Journal of Hazardous Materials 188, 319–333.
32. Mohan D., Sarswat A., Ok S.Y., Pittman C.U. Jr. 2014. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. Bioresource Technology 160, 191–202.
33. Mumme J., Eckervogt L., Pielert J., Diakite M., Rupp F., Kern J. 2011. Hydrothermal carboization of anaerobically digeste maize silage. Bioresource Technology 102, 9255–9260.
34. Mumme J., Srocke F., Heeg K., Werner M. 2014. Use of biochars in anaerobic digestion. Bioresource Technology 164, 189–197.
35. Muradov N., Fidalgo B., Gujar A.C., Garceau N., T-Raissi A. 2012. Production and characterization of *Lemna minor* bio-char and its catalytic application for biogas reforming. Biomass and Bioenergy 42, 123–131.
36. Novotny E.H., Auccalse R., Velloso M.H.R., Correa C.J., Higarashi M.M., Abreu V.M.N., Rocha J.D., Kwapinski W. 2012. Characterization of phosphate structures in biochar from swine bones. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 47(5), 672–676.
37. Pereira R.C., Muetzel S., Arbestain M.C., Bishop P., Hina K., Hedley M. 2014. Assessment of the influence of biochar on rumen and silage fermentation: A laboratory-scale experiment. Animal Feed Science and Technology 196, 22–31.
38. Sánchez M.E., Lindao E., Margaleff D., Martínez O., Morán A. 2009. Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflower: production and characterization of bio-fuels and biochar soil management. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 85, 142–144.
39. Schmidt H.P. 2012a. 55 uses of biochar. Ithaca Journal 1, 286–289.
40. Schmidt H.P. 2012b. Treating manure with biochar. Ithaca Journal 1, 273–276.
41. Shackley S., Carter S., Knowles T., Middelink E., Haefele S., Sohi S., Cross A., Haszeldine S. 2012. Sustainable gasification-biochar systems? A case-study of environmental and health and safety issues. Energy Policy 42, 49–58.
42. Song W., Guo M. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 94, 138–145.
43. Steiner C., Das K.C., Melear N., Lakly D. 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. Journal of Environmental Quality 39(4), 1236–1242.
44. Steiner C., Melear N., Harris K., Das K.C. 2011. Biochar as bulking agent for poultry litter composting. Carbon Management 2(3), 227–230.
45. Tang J., Zhy W, Kookana R. Katayama A. 2013. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. Journal of Bioscience and Bioengineering 116(6), 653–659.
46. Verheijen F.G.A., Jeffery S., Bastos A.C., van der Velde M., Diafas I. 2010. Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Process and Functions. EUR 24099 EN.
47. Watanabe R., Tada C., Baba Y., Fukuda Y., Nakai Y. 2013. Enhancing methane production during the anaerobic digestion of crude glycerol using Japanese cedar charcoal. Bioresource Technology 150, 387–392.
48. Zabochnicka-Świątek M., Malińska K. 2010. Removal of ammonia by clinoptilolite. Global Nest Journal 10(2), 256–261.