

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA BIEWĘGLA W PROCESIE KOMPOSTOWANIA

Krystyna Malińska¹, Jacek Dach²

¹ Instytut Inżynierii Środowiska, Politechnika Częstochowska, ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa, e-mail: kmalinska@is.pcz.czest.pl

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

STRESZCZENIE

Biowęgiel – określany jako biokarbon czy też agrikarbon – posiada zbliżone właściwości co węgiel drzewny, jednakże wskazuje na jego zastosowania w rolnictwie i ochronie środowiska. Był on już stosowany w XIX wiecznych uprawach rolniczych w Europie i Ameryce Południowej. Obecnie, właściwości biowęglu są odkrywane na nowo, a nowe obszary zastosowań obejmują bioenergetykę, gospodarkę odpadami czy łagodzenie zmian klimatycznych. Biowęgiel może być również wykorzystany do sekwestracji węgla w glebie, remediacji gruntów zanieczyszczonych organicznymi i nieorganicznymi związkami. Biowęgiel może być produkowany na drodze pirolizy różnorodnych materiałów takich jak np. rośliny energetyczne, odpady leśne, biomasa rolnicza, osady ściekowe, odpady z produkcji i przetwórstwa żywności itp. W zależności od początkowych właściwości substratów i parametrów pirolizy biowęgle charakteryzują się różnymi właściwościami takimi jak zawartość węgla organicznego i związków mineralnych, wysoka porowatość i powierzchnia właściwa, a co za tym idzie właściwości sorpcyjne i retencja składników odżywczych. Ostatnie badania wskazują, że biowęgiel może być wykorzystywany również w procesie kompostowania i do produkcji kompostów i nawozów na bazie biowęglu. Biowęgiel może być stosowany jako materiał strukturotwórczy lub dodatek do odpadów o wysokiej zawartości wody i/lub azotu. Dodatek biowęglu do mieszanek kompostowych może ograniczyć emisję amoniaku, i tym samym ograniczyć straty azotu ogólnego podczas kompostowania oraz zwiększyć wodochłonność i retencję składników odżywczych. Co więcej, biowęgiel może pełnić funkcję nośnika dla mikroorganizmów oraz stanowić składnik złoża biofiltrów na kompostowniach. Literatura nie podaje zbyt wielu przykładów wykorzystania biowęglu do kompostowania, stąd wiedza na temat wpływu dodatku różnych rodzajów biowęglu do mieszanek kompostowych na dynamikę procesu oraz właściwości otrzymanych kompostów wymaga uzupełnienia i pogłębienia. Z tego względu niezbędne będzie przeprowadzenie badań nad rolą biowęglu w przebiegu procesu kompostowania oraz właściwościami kompostów z dodatkiem biowęglu. Artykuł przedstawia dotychczasowy stan wiedzy na temat właściwości biowęglu przydatnych w kompostowaniu, wpływu różnych rodzajów biowęglu na dynamikę procesu kompostowania odpadów biodegradowalnych oraz wskazanie kierunków dalszych badań dotyczących możliwości wykorzystania poznanych właściwości biowęglu do optymalizacji kompostowania.

Słowa kluczowe: biowęgiel, kompostowanie, materiał strukturotwórczy, dodatek funkcjonalny, sekwestracja węgla w glebie, emisje gazowe.

POTENTIAL APPLICATIONS OF BIOCHAR FOR COMPOSTING

ABSTRACT

Biochar – also referred to as biocarbon, agrichar – shows similar properties as charcoal but indicates applications for agriculture and environment protection. Biochar was applied in the 19th century agriculture practices in Europe and South America. At present, the properties of biochar are being „rediscovered” and new areas of applications include production of bioenergy, waste management or mitigation of climate change. Also, it can be used for sequestration of carbon in soils, remediation of soil contaminated with organic and inorganic compounds. Biochar can be produced through pyrolysis of a wide range of feedstock materials including energy crops, forestry residues, agricultural biomass, sewage sludge, food processing waste, etc. Depending on the initial properties of substrates and parameters of pyrolysis biochars can demonstrate various properties such as high content of stable organic carbon and minerals, high porosity and surface area, and thus increased sorption and nutrient retention properties. Recent studies show that biochar can be also used in composting and production of biochar-based composts and fertilizers. Biochar can function as a bulking agent or an amendment for composting of materials with high moisture and/or nitrogen contents. The addition of biochar to composting mixtures can reduce ammonia emissions, and thus limit nitrogen losses during composting, increase water holding capacity and retention of nutrients. Biochar can also function as a carrier substrate for microbial inoculants and a scrubbing material used in biofilters at composting facilities. Due to the fact that the literature does not provide many examples of biochar applications for composting, and there is little known about the effects of biochar added to composting mixtures on composting dynamics and properties of final composts, further investigations should focus on mechanisms of biochar-composting mixtures interactions and analysis of properties of biochar-based composts. The overall goal of the article is to analyze the potentials of biochars for composting, to report the effects of various biochars on composting dynamics and quality of produced biochar-based composts, and to indicate the areas of further studies on biochar properties that would allow optimization of composting and improve the quality of final products.

Keywords: biochar, composting, bulking agent, functional amendment, carbon sequestration in soil, gaseous emissions.

WSTĘP

Kompostowanie jest powszechnie stosowaną metodą tzw. recyklingu organicznego i unieszkodliwiania stałych odpadów ulegających biodegradacji, takich jak selektywnie zbierana frakcja odpadów komunalnych, odpady z rolnictwa, leśnictwa, sadownictwa, produkcji żywności, przemysłu drzewnego czy skórzanego, a także osadów ściekowych z komunalnych jak i niektórych przemysłowych oczyszczalni ścieków [Jędrzak i Haziak, 2005]. Podczas kompostowania zawarta w odpadach materia organiczna w warunkach tlenowych rozkładana jest przez mikroorganizmy powodując wzrost temperatury do zakresu termofilowego. W wyniku zachodzących przemian biochemicznych następuje inaktywacja mikroorganizmów patogennych,

redukcja zawartości wody i objętości odpadów. Otrzymany produkt – kompost – zbliżony jest do próchnicy, zawiera substancje humusowe i biogenne, jest stabilny i pewny sanitarnie oraz pozbawiony odorów i patogenów [Haug, 1993]. Kompost o wysokiej jakości wykorzystywany jest na potrzeby rolnictwa, ogrodnictwa, zieleni miejskiej i/lub rekultywacji terenów zdegradowanych. Pomimo że kompostowanie – najczęściej prowadzone w technologii pryzmowej – uznawane jest za nieskomplikowaną metodę zagospodarowywania i unieszkodliwiania odpadów, która charakteryzuje się niskimi nakładami kosztów i powszechną akceptacją społeczną [Jędrczak i Haziak, 2005], wymaga zapewnienia odpowiednich parametrów na każdym etapie procesu.

Za najistotniejszy w procesie kompostowania uważa się etap wstępny, tj. dobór substratów i przygotowanie mieszanek kompostowych. Z uwagi na różnorodność odpadów poddawanych kompostowaniu i ich właściwości, takich jak C/N, zawartość wody, podatność na biodegradację, gęstość nasypową, porowatość i przepuszczalność powietrzną, warunkiem koniecznym dla prawidłowego przebiegu procesu kompostowania jest odpowiedni dobór substratów i przygotowanie mieszanek kompostowych tak, aby spełniały wymagania optymalnego C/N, zawartości wody oraz dostępu tlenu w pryzmie. W przypadku kompostowania materiałów o dużej wilgotności, niskim C/N, niskiej porowatości oraz podatności na kompakcję w pryzmie, np. pomiotu kurzego, obornika świńskiego czy bydłęcego, osadów ściekowych, może dochodzić do emisji gazów, np. amoniaku, a tym samym strat azotu w finalnym kompoście, powstawania odorów uciążliwych dla otoczenia kompostowni, zagrożenia mikrobiologicznego na skutek nieuzyskania wystarczającej temperatury do inaktywacji mikroorganizmów patogennych, itp. Z tego względu niezbędny jest dodatek takich substratów pomocniczych, które będą warunkować prawidłowy przebieg procesu, np. materiałów strukturotwórczych i/lub materiałów pochłaniających wodę, ograniczających straty azotu podczas kompostowania odpadów o wysokiej zawartości związków azotu, itp. [Chen i in., 2010; Doublet i in., 2011; Wysokiński i Kalembasa, 2011]. Do najczęściej wykorzystywanych w kompostowaniu materiałów strukturotwórczych należą: słoma, ścinki drzewne, trociny, liście, odpady zielone z zakładów zieleni miejskiej, kora, torf, itp. [Malińska i Zabochnicka-Świątek, 2013; Malińska, 2012; Doublet i in., 2011; Chen i in., 2010, Dach, 2010; Adhikari i in., 2009, Rak, 2008; Das i in., 2003]. Natomiast wśród materiałów mających przede wszystkim za zadanie pochłaniać nadmiar wody, ograniczać straty azotu czy też wpływać na tempo zachodzących przemian biochemicznych, można wskazać na naturalne zeolity, popioły ze spalania węgla kamiennego, fosfogips, torf [Zorpas i Loizidou, 2008] oraz biowęgiel [Chen i in., 2010].

Biowęgiel jest produktem otrzymywanym w procesie termicznej konwersji biomasy roślinnej i odpadów organicznych, w wyniku której powstają produkty ciekłe i gazowe o wartości energetycznej [Igliński i in., 2009; Lehmann i Joseph, 2009; Bis, 2012; Malińska, 2012]. Chociaż biowęgiel i jego zastosowanie są znane od wieków – szczególnie w rolnictwie jako dodatek do gleb zwiększający ich żyzność – obecnie jego właściwości są „odkrywane na nowo”, a możliwości wykorzystania obejmują obszary związane m.in. z produkcją energii, gospodarką odpadami, łago-

dzeniem skutków zmian klimatycznych czy też poprawą właściwości gleb [Lehmann i Joseph, 2009]. W ostatnich latach – z uwagi na rosnące zainteresowanie biowęgłem i możliwościami jego zastosowania – prowadzone są również badania nad wykorzystaniem biowęgla w procesie kompostowania w celu optymalizacji samego procesu i/lub nadania nowych właściwości otrzymanym kompostom. W zależności od swoich właściwości biowęgiel może np. pełnić rolę materiału strukturotwórczego, czynnika ograniczającego emisję gazów cieplarnianych (szczególnie CH_4 , N_2O), a także straty azotu w finalnym produkcie, nośnika dla mikroorganizmów oraz materiału nadającego nowe właściwości kompostom [Dias i in., 2010; Steiner i in., 2011]. Co więcej, biowęgiel z uwagi na swoje właściwości sorpcyjne może być wykorzystany w oczyszczaniu powietrza z gazów procesowych np. z kompostowni. Pomimo poznanych już wielu korzyści ze stosowania różnych rodzajów biowęgla w rolnictwie, literatura podaje niewiele informacji dotyczących badań nad wykorzystaniem biowęgla w procesie kompostowania oraz wpływem właściwości fizyko-chemicznych biowęgla na przebieg procesu kompostowania, na właściwości otrzymanych kompostów jak i wpływu takich kompostów na środowisko glebowe i wzrost roślin [Dias i in., 2010].

Celem artykułu jest przedstawienie dotychczasowego stanu wiedzy na temat właściwości biowęgla przydatnych w kompostowaniu, wpływu różnych rodzajów biowęgla na dynamikę procesu kompostowania odpadów biodegradowalnych oraz wskazanie kierunków dalszych badań dotyczących możliwości wykorzystania poznanych właściwości biowęgla do optymalizacji kompostowania.

BIOWĘGIEL I JEGO WŁAŚCIWOŚCI

Biowęgiel – często określany również jako karbonizat, biokarbonizat, biokarbon lub agrokarbon (ang. *biochar*, *biocarbon*, *agrichar*) – jest stałą pozostałością otrzymywaną na drodze pirolizy biomasy roślinnej i odpadów organicznych, w wyniku której powstają ciekłe i gazowe produkty o wartości energetycznej. Pod względem właściwości fizyko-chemicznych jest zbliżony do tradycyjnego karbonizatu, z tym że biowęgiel w odróżnieniu od karbonizatu – paliwa odnawialnego – jest wykorzystywany na cele inne niż odzysk energii, tj. w rolnictwie i ochronie środowiska [Lehmann, 2007; Lewandowski i in., 2010; Verheijen i in., 2010; Lehmann i Joseph, 2009]. Określenie karbonizatu terminem „biowęgiel” wskazuje również na to, że substraty wykorzystane w procesie pirolizy to materiały biologiczne w odróżnieniu od np. tworzyw sztucznych [Malińska, 2012].

Do produkcji biowęgla można wykorzystywać wiele substratów o różnym pochodzeniu i właściwościach. Do nich można zaliczyć: rośliny energetyczne [Kwapiński i in., 2010], odpady leśne, biomasa rolnicza [Sanchez i in., 2009], osady ściekowe, organiczna frakcja odpadów komunalnych, pozostałości z przetwórstwa rolnego i produkcji żywności, pomiot kurzy [Song i Guo, 2012; Ibarolla i in., 2012], obornik bydlęcy, biomasa alg [Bird i in., 2011], a także biomasa z upraw przeznaczonych

specjalnie na produkcję biowęgla [McHenry, 2009]. Biowęgiel otrzymuje się w procesie pirolizy bez dostępu tlenu i w zakresie temperatury 350–700 °C. Powstaje wtedy olej będący mieszaniną węglowodorów, gaz syntetyczny będący mieszaniną gazowych węglowodorów i biowęgiel będący stałą pozostałością. Udział otrzymanych produktów determinuje tempo przyrostu temperatury, czasu rozkładu, temperatury i ciśnienia. Największy udział biowęgla w produktach pirolizy można uzyskać na drodze powolnej pirolizy przy względnie niskiej temperaturze reaktora, tj. 400 °C, wolnym tempie przyrostu temperatury, tj. 0,01–2 °C/s oraz dłuższym czasie przebywania w temperaturze końcowej [Lehmann, 2007; Lewandowski i in., 2010]. Na przykład, podczas pirolizy wierzby, sosny i miskanta w temperaturze 500 °C prowadzonej przez 10 min. otrzymano odpowiednio 25,0–26,2%, 22,2–22,5% oraz 25,9–26,2% biowęgla [Kwapiński i in., 2010].

Otrzymane biowęgle różnią się między sobą właściwościami, które w dużej mierze uzależnione są od pochodzenia i właściwości substratów oraz parametrów procesu pirolizy. Wśród właściwości biowęgla wyróżnia się: skład chemiczny, stabilność, powierzchnię właściwą i porowatość, gęstość nasypową, pH, pojemność jonowymienna. Przykładowo, biowęgiel może zawierać 50–90% węgla organicznego, 1–15% wody, 0–40% substancji lotnych, 0,5–5% substancji mineralnych. Biowęgle mogą charakteryzować się C/N w zakresie 7–500 i neutralnym lub zasadowym pH [Verheijen i in., 2010]. Biowęgle o dużym udziale makrospory w swojej strukturze można otrzymać, np. z biomasy lignocelulozowej w procesie powolnej pirolizy [Downie i in., 2009]. Wypełnione powietrzem makrospory pozwalają na zapewnienie warunków tlenowych w glebie czy też w pryzmie kompostowej.

Do celów rolniczych za najważniejsze właściwości biowęgla uznaje się skład chemiczny – głównie zawartość węgla w formie stabilnej – i zawartość składników odżywczych, zawartość popiołu, właściwości sorpcyjne w stosunku do związków

Tabela 1. Właściwości fizyko-chemiczne wybranych rodzajów biowęgla użytych w procesie kompostowania [Jindo i in., 2012; Steiner i in., 2011; Che i in., 2010; Dias i in., 2010]

Table 1. Physical and chemical properties of selected biochars used in composting [Jindo i in., 2012; Steiner i in., 2011; Che i in., 2010; Dias i in., 2010]

Rodzaj biowęgla	Temp. [°C]	ZW [%]	C [g/kg]	N [g/kg]	GN [g/cm ³]	pH	Pow. wł. [m ² /g]
Biowęgiel otrzymany ze zrębek sosnowych	400	–	758,7	2,6	–	–	–
Biowęgiel otrzymany z bambusa	600	11,0	–	–	0,40	8,82–8,86	359,0
Biowęgiel otrzymany z dębu kasztanolistnego	400–600	–	791,5	37,6	–	7,23	255,0
Biowęgiel otrzymany z eukaliptusa	300–450	7,1	497,8	6,1	–	7,64	–

Oznaczenia: Temp. – temperatura pirolizy, ZW – zawartość wody, C – węgiel całkowity, N – azot całkowity, GN – gęstość nasypowa, Pow. wł. – powierzchnia właściwa.

organicznych i nieorganicznych, retencję wody, powierzchnię właściwą, porowatość i rozmiar cząstek oraz gęstość nasypową [Kwapiński i in., 2010]. O przydatności biowęgla do kompostowania będą przede wszystkim decydowały takie właściwości fizyko-chemiczne jak porowatość powietrzna, powierzchnia właściwa oraz wielkość cząstek, które to wpływają na wodochłonność, zdolności sorpcyjne i retencję składników odżywczych [Atkinson i in., 2010; Bis, 2012]. W Tabeli 1 przedstawiono właściwości fizyko-chemiczne wybranych rodzajów biowęgla wykorzystanych jako dodatek do mieszanek kompostowych.

ZASTOSOWANIE BIOWĘGLA W PROCESIE KOMPOSTOWANIA

Biowęgiel z uwagi na swoje właściwości fizyko-chemiczne może być wykorzystywany jako dodatek do sporządzania mieszanek kompostowych zawierających odpady organiczne o dużej wilgotności oraz wysokiej zawartości azotu, np. osady ściekowe, obornik bydlęcy, pomiot kurzy, wytloki jabłkowe, itp. [Dias i in., 2010; Steiner i in., 2011]. W zależności od właściwości biowęgiel może pełnić funkcję czynnika strukturotwórczego i/lub materiału funkcjonalnego, który może np. ograniczać emisję gazów czy też zwiększać retencję wody podczas kompostowania. Z uwagi na rozwinięte właściwości sorpcyjne biowęgiel może stanowić materiał filtracyjny w biofiltrach stosowanych np. do oczyszczania powietrza procesowego w kompostowniach.

Biowęgiel jako materiał strukturotwórczy

Biowęgiel – w zależności od porowatości, powierzchni właściwej i wielkości cząstek – może być wykorzystany w procesie kompostowania jako czynnik strukturotwórczy. Dodatek materiału strukturotwórczego ma za zadanie zwiększenie porowatości powietrznej w pryzmie, a tym samym umożliwić prawidłowy transport tlenu oraz odprowadzenie wody i ciepła z pryzmy podczas kompostowania (Haug, 1993).

Za materiały strukturotwórcze przydatne do kompostowania wskazuje się biowęgle otrzymane z biomasy lignocelulozowej w warunkach powolnej pirolizy. Takie biowęgle charakteryzują się znacząco dużym udziałem makrospor [Downie i in., 2009], które pozwalają na utrzymanie odpowiednich warunków tlenowych w pryzmie kompostowej. Co więcej, zwiększają retencję wody w mieszanekach kompostowych [Steiner i in., 2011; Jindo i in., 2012]. Po zakończeniu procesu kompostowania nie ma potrzeby oddzielania biowęgla od przekompostowanego materiału, ponieważ kompost z dodatkiem biowęgla wprowadzony do gleb może korzystnie wpływać na ich właściwości [Steiner i in., 2011].

Udział biowęgla jako czynnika strukturotwórczego może nawet wynosić do 50% udziału wagowego w mieszance [Fischer i Glaser, 2012]. Literatura podaje różne wartości dodatku biowęgla do kompostowanych materiałów. Steiner i in. [2011] kompostowali pomiot kurzy z 5% i 20% (udział wagowy suchej masy) dodatkiem biowę-

gła, podczas gdy Dias i in. [2010] badali proces kompostowania mieszanki pomiotu kurzego i biowęgla w stosunku 1:1 (udział wagowy). Dostępne w literaturze wyniki badań nad możliwościami wykorzystania biowęgla jako materiału strukturotwórczego do kompostowania nie podają pełnej charakterystyki właściwości biowęgla jak np. gęstości nasypowej, porowatości powietrznej, powierzchni właściwej oraz wielkości cząstek. Tym bardziej brak jest danych dotyczących wpływu wielkości udziału biowęgla w mieszankach kompostowych na porowatość powietrzną w przyźmie, jak również optymalnego dodatku biowęgla jako materiału strukturotwórczego w celu zapewnienia odpowiednich warunków tlenowych w przyźmie.

Biowęgiel jako dodatek funkcjonalny

Z uwagi na wiele korzystnych właściwości fizyko-chemicznych biowęgla może być również stosowany w kompostowaniu jako dodatek funkcjonalny do mieszanek kompostowych lub gotowych kompostów nadając im inne, nowe właściwości. W zależności od składu chemicznego i właściwości fizyko-chemicznych biowęgla dodany do mieszanek kompostowych przede wszystkim zwiększa ich początkową porowatość powietrzną, wiąże nadmiar wody oraz dostarcza związków odżywczych i mikroelementów. Dzięki temu, podczas kompostowania możliwe jest zapewnienie odpowiednich parametrów warunkujących prawidłowy przebieg procesu kompostowania. Otrzymane komposty, w których jednym ze składników jest biowęgiel, mogą posiadać dodatkowe właściwości funkcjonalne, takie jak polepszone właściwości sorpcyjne, zwiększoną retencję składników odżywczych, zwiększoną pojemność wodną, itp. Jindo i in. [2012] prowadzili badania nad właściwościami biochemicznymi kompostów otrzymanych w wyniku kompostowania przyżmowego zmieszanego pomiotu kurzego, łusek ryżowych, wytlóków jabłkowych i biowęgla. Badacze stwierdzili, że niewielki dodatek biowęgla miał korzystny wpływ na właściwości otrzymanych kompostów. Zaobserwowali m.in. spadek węgla rozpuszczalnego o 30% czy też zwiększenie aktywności enzymatycznej ureazy, fosfatazy i oksydazy polifenolowej o 30–40% w porównaniu do kompostów bez dodatku biowęgla. Fischer i Glaser [2012] wskazują, że pomimo zachodzącego w różnym stopniu rozkładu biowęgla, w dłuższej perspektywie czasu wprowadzone do gleby komposty z dodatkiem biowęgla będą wolniej ulegały mineralizacji niż te, które w swym składzie nie zawierają biowęgla.

Komposty z dodatkiem biowęgla wprowadzone do gleby mogą obniżać biodostępność i toksyczność organicznych i nieorganicznych zanieczyszczeń dla żywych organizmów [Beesley i in., 2010].

Z uwagi na rozwiniętą strukturę porowatą i powierzchnię właściwą biowęgla może stanowić przyjazne środowisko dla mikroorganizmów, stwarzając tym samym korzystne warunki dla ich rozwoju i aktywności. Dlatego też biowęgiel może być również stosowany w kompostowaniu jako tzw. nośnik dla mikroorganizmów [Fischer i Glaser, 2012].

WPŁYW BIEWĘGLA NA DYNAMIKĘ PROCESU KOMPOSTOWANIA

W oparciu o przeprowadzone do tej pory badania nad wpływem dodatku różnych rodzajów biowęglu do mieszanek kompostowych na dynamikę procesu kompostowania zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych zaobserwowano, że biowęgiel dodany do badanych mieszanek kompostowych przyczynił się do:

- wzrostu temperatury podczas całego procesu jak również wydłużenia fazy termofilowej. Jindo i in., (2012) zaobserwowali wzrost temperatury podczas 150-dniowego procesu kompostowania w pryzmach mieszanki pomiotu kurzego, wytlóków jabłkowych, łusek ryżowych oraz kory drzewnej (udział objętościowy: 20%, 50%, 20%, 10%) oraz mieszanki o takim samym składzie z dodatkiem biowęglu (2% obj.) jak również nieznaczne wydłużenie fazy termofilowej. W pryzmie z dodatkiem biowęglu temperatura w początkowej fazie kompostowania dochodziła do 65 °C podczas gdy w pryzmie bez dodatku biowęglu nie przekroczyła 55 °C. Steiner i in. [2011] podczas kompostowania pomiotu kurzego z dodatkiem biowęglu zaobserwowali, że zainicjowanie procesu, a tym samym wzrost temperatury, nastąpiło wcześniej niż w przypadku mieszanki bez dodatku biowęglu. Utrzymanie wyższej temperatury przez dłuższy czas może pozwolić na inaktywację mikroorganizmów patogennych np. podczas kompostowania osadów ściekowych.
- ograniczenia strat azotu podczas kompostowania poprzez sorpcję gazowego NH_3 oraz rozpuszczalnego w wodzie jonu NH_4^+ [Steiner i in., 2011]. Podczas kompostowania mieszanek pomiotu kurzego z 5% i 20% wagowym dodatkiem biowęglu otrzymanego ze zrębek sosnowych, emisja gazowego amoniaku była niższa nawet o 64% w przypadku mieszanki z 20% udziałem biowęglu, a całkowite straty azotu zostały ograniczone o 52%. Przy czym, dodatek biowęglu z uwagi na zawartość trudnodostępnego dla mikroorganizmów węgla, nie zmienił znacząco C/N w badanych mieszankach. Zaobserwowano również ograniczenie emisji H_2S w mieszankach z udziałem biowęglu [Steiner i in., 2011]. Wysoka zawartość azotu oraz niski C/N typowe dla pomiotu kurzego sprzyjają emisji gazowego amoniaku podczas kompostowania, a straty azotu mogą wynosić nawet 71–88% [Ogunwande i in., 2008]. Dias i in. [2010] również zaobserwowali pozytywny wpływ dodatku biowęglu na ograniczenie strat azotu. Za możliwy mechanizm ograniczania emisji NH_3 wskazuje się adsorpcję NH_4^+ przez biowęgiel. Z tego względu badacze stwierdzają, że dodatek biowęglu jest korzystny w kompostowaniu odpadów organicznych bogatych w azot [Steiner i in., 2011].
- ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, np. CH_4 , N_2O czy CO_2 podczas kompostowania materiałów bogatych w azot. Sonoki i in., [2011] prowadzili badania nad wpływem dodatku biowęglu do obornika bydłowego na emisję gazów cieplarnianych. Zaobserwowali, że po 21 dniach kompostowania ilość emitowanego CH_4 z mieszanki bez dodatku biowęglu wynosiła 35 mg $\text{CH}_4/\text{d}/\text{m}^2$, podczas gdy w przypadku obornika z dodatkiem biowęglu było to 9 mg $\text{CH}_4/\text{d}/\text{m}^2$. Badacze wskazują, że ograniczenie emisji CH_4 podczas kompostowania mieszanki obor-

nika i biowęgla spowodowane było przede wszystkim zwiększeniem porowatości, a tym samym polepszeniem warunków powietrznych w pryzmie. W konsekwencji w warunkach tlenowych doszło do inhibicji bakterii metanogennych odpowiedzialnych za produkcję metanu.

- wzrostu aktywności mikroorganizmów [Fischer i Galser, 2012]. Steiner i in. [2011] zaobserwowali zwiększenie współczynnika respiracji, tj. stężenia CO₂, w mieszance pomiotu kurzego z 20% dodatkiem biowęgla. Węgiel zawarty w biowęgłu występuje w formie stabilnej i tym samym nie jest dostępny dla mikroorganizmów. Wzrost współczynnika respiracji spowodowany był zwiększeniem porowatości, a tym samym zwiększeniem dostępu tlenu dla mikroorganizmów w tej mieszance kompostowej.
- wzrostu retencji wody podczas kompostowania [Steiner i in., 2011].

W literaturze można znaleźć niewiele przykładów badań nad zmianami właściwości fizyko-chemicznych biowęgla na skutek złożonych przemian biochemicznych zachodzących podczas kompostowania. Nguyen i in. [2010] zaobserwowali, że wzrost temperatury w trakcie kompostowania powoduje intensyfikację procesów utleniania biowęgla zwiększając reaktywność powierzchni biowęgla i tym samym sorpcję składników odżywczych.

KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Literatura podaje nieliczne przykłady prac badawczych dotyczących wykorzystania biowęgla w procesie kompostowania. Na podstawie dostępnych wyników badań oraz poznanych właściwości fizyko-chemiczne różnych rodzajów biowęgla niewątpliwie można stwierdzić, że dodatek biowęgla do mieszanek kompostowych ma korzystny wpływ na dynamikę procesu kompostowania. Jednakże wyniki prac badawczych nie pozwalają w pełni na poznanie i wyjaśnienie wpływu właściwości fizyko-chemicznych biowęgla na mechanizm przemian zachodzących podczas procesu kompostowania jak również wpływu na jakość otrzymywanych kompostów. Wskazuje się na konieczność prowadzenia dalszych badań w kierunku:

- poznania właściwości fizyko-chemicznych biowęgla otrzymywanych z różnych substratów pod kątem ich zastosowania do kompostowania,
- analizy potencjalnych zagrożeń jakie mogą powodować związki toksyczne obecne w biowęgłu (np. WWA, dioksyny, furany, które mogą powstawać podczas pirolizy) na aktywność mikroorganizmów podczas kompostowania,
- opracowania jednolitej metodyki wyznaczania właściwości fizykochemicznych biowęgla umożliwiającej porównanie i wybór odpowiedniego rodzaju biowęgla do kompostowania,
- określenia systemu klasyfikacji i certyfikacji biowęgla w zależności od rodzaju substratu, właściwości fizykochemicznych i kryteriów zastosowań otrzymanych biowęgla [23, 38],

- określenia wpływu dodatku biowęgla na zachodzące podczas kompostowania przemiany biochemiczne (tj. rozkład materii organicznej, humifikacja, adsorpcja gazów, retencja składników odżywczych),
- określenia optymalnego udziału biowęgla jako materiału strukturalnego w mieszankach kompostowych,
- analizy możliwości doboru odpowiednich substratów i parametrów prowadzenia procesu pirolizy w celu nadania biowęgłom właściwości fizykochemicznych przydatnych w kompostowaniu, np. materiałów o wysokiej zawartości azotu,
- analizy zmian właściwości fizykochemicznych biowęgla na skutek zachodzących przemian podczas kompostowania,
- określenia kosztów produkcji biowęgla i przygotowywania mieszanek kompostowych z jego dodatkiem,
- określenie wpływu kompostów na bazie biowęgla na właściwości gleb i wzrost roślin,
- określenie możliwości wykorzystania biowęgla jako nośnika dla mikroorganizmów czy też jako materiału filtracyjnego stosowanego w biofiltrach np. do oczyszczania powietrza z gazów procesowych z kompostowni.

PODSUMOWANIE

Dostępne w literaturze wyniki badań dotyczące analizy właściwości różnych rodzajów biowęgla pozwalają stwierdzić, że biowęgiel może być z powodzeniem wykorzystywany w procesie kompostowania przede wszystkim jako materiał strukturotwórczy i/lub dodatek funkcjonalny. O przydatności biowęgla do kompostowania mogą decydować skład chemiczny, porowatość powietrzna, powierzchnia właściwa, wielkość cząstek, które mogą determinować właściwości sorpcyjne, wodochłonność oraz retencję składników odżywczych. W procesie kompostowania biowęgla, m.in. może zwiększać porowatość powietrzną, wiązać nadmiar wody, ograniczać emisję gazowego amoniaku, a tym samym straty azotu w otrzymanym kompoście, zwiększać aktywność mikroorganizmów, a także retencję składników odżywczych. Jednakże z uwagi na nieliczne prace badawcze dotyczące wykorzystania biowęgla w procesie kompostowania konieczne będą dalsze badania umożliwiające określenie wpływu dodatku biowęgla na dynamikę procesu kompostowania i jakość otrzymanych na bazie biowęgla kompostów.

PIŚMIENNICTWO

1. Adhikari B.K., Barrington S., Martinez J., King S. 2009. Effectiveness of three bulking agents for food waste composting. *Waste Management* 29, 197-203.
2. Atkinson C.J., Fitzgerald J.D., Hips N.A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: review. *Plant Soil* 337, 1-18.

3. Beesley L., Moreno-Jimenez E., Gomez-Eyles J.L. 2010. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution* 158(6), 2282-2287.
4. Bird M.I., Wurster C.M., de Paula Silva P.H., Bass A.M., de Nys R. 2011. Algal biochar – production and properties. *Bioresource Technology* 102(2), 1886-1891.
5. Bis Z. 2012. Biowęgiel – powrót do przeszłości, szansa dla przyszłości. *Czysta Energia*, 6.
6. Chen Y-X., Huang X-D., Han Z-Y., Hu B., Shi D-Z., Wu W-X. 2010 Effects of bamboo charcoals and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere* 78, 1177-1181.
7. Dach J. 2010. Wpływ dodatku różnego rodzaju słomy na dynamikę procesu i wielkość emisji amoniaku z kompostowanych osadów ściekowych. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 55(2), 8-13.
8. Das K.C., Tollner E.W., Eiteman M.A. 2003. Comparison of synthetic and natural bulking agents in food waste composting. *Compost Science & Utilization*, 11(1), 27-35.
9. Dias B.O., Silva C.A., Higashikawa F.S., Roig A., Sanchez-Monedeira M.A. 2010. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: effect on organic matter degradation and humification. *Bioresouce Technology* 101, 1239-1246.
10. Doublet J., Francou C., Poitrenaud M., Houot S. 2011. Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability. *Bioresource Technology* 102, 1298-1307.
11. Downie A., Crosky A., Munroe P. Physical properties of biochar. W: Lehman J., Joseph S. *Biochar for Environmental Management – Science and Technology*. Earthscan, London, 2009.
12. Fischer D., Glaser B. 2012. Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. In: *Management of organic waste*, ed. Kumar Sunil, InTech, 184-197.
13. Haug R.T. *Practical handbook of compost engineering*. Lewis Publishers, 1993.
14. Ibarolla R., Shackely S., Hammond J. 2012. Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: a life cycle carbon assessment. *Waste Management* 32, 859-868.
15. Igliński B., Buczkowski R., Cichosz M. *Technologie bioenergetyczne*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2009.
16. Jędrzak A., Haziak K. Określenie wymagań dla kompostowania i innych metod biologicznego przetwarzania odpadów. *Zielona Góra*, 2005.
17. Jindo K., Suto K., Matsumoto K., Garcia C., Sonoki T., Sanchez-Monedeira M.A. 2012. Chemical and biochemical characterization of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology* 110, 396-404.
18. Kwapinski W., Byrne C.M.P., Kryachko E., Wolfram P., Adley C., Leahy J.J., Novotny E.H., Hayes M.H.B. 2010. Biochar from biomass and waste. *Waste Biomass Valorization* 1, 177-189.
19. Lehmann J. 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5(7), 381-387.
20. Lehmann J., Joseph S. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, 2009.
21. Lehmann J., Rilling M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biology & Biochemistry* 43, 1812-1836.
22. Lewandowski W.M., Rymus M., Meller P. 2010. Termiczno-chemiczna piroliza do biopaliw ciekłych i gazowych, jako metoda podnoszenia sprawności konwersji energii biomasy. *NAFTA-GAZ*, 8: 675-680.

23. Lim S.S., Lee D.S., Lee S.I., Park H.J., Kwak J.H., Choi W.J. 2010. Reduction of ammonia volatilization and nitrogen loss by addition of zeolite and phospho-gypsum to cattle manure mixed with rice hull and sawdust as bedding materials. The 9th International Conference of the East and Southeast Asia Federation of Soil Science Societies, 434-435.
24. Malińska K. 2012. Biowęgiel odpowiedzią na aktualne problemy ochrony środowiska. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 15(4), 387-403.
25. Malińska K. 2012. Laboratoryjne wyznaczenie porowatości powietrznej materiałów przeznaczonych do kompostowania. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 15(2), 155-167.
26. Malińska K., Zabochnicka-Świątek M. 2013. Selection of bulking agents for composting of sewage sludge. *Environmental Protection Engineering* 39(2): 89-101.
27. McHenry M.P. 2009. Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: certainty, uncertainty and risk. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129, 1-7
28. Nguyen B.T., Lehmann J., Hockaday W.C., Joseph S. Masiello C. 2010. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. *Environmental Science & Technology*, 44(9), 3324-3331.
29. Ogunwande, G.A., Osunade J.A., Adekalu K.O., Ogunjimi L.A.O. 2008. Nitrogen loss in chicken litter compost as affected by carbon to nitrogen ratio and turning frequency. *Bioresource Technology* 99, 7495-7503.
30. Rak A. 2008. Wpływ parametrów materiału strukturotwórczego na jakość kompostu uzyskanego w wyniku tlenowego – zamkniętego procesu kompostowania osadu ściekowego. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 11(3), 301-309.
31. Sanchez M.E., Lindao E., Margaleff D., Martinez C. , Moran 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.
32. 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.
33. Sonoki T., Furukawa T., Mizumoto H., Jindo K., Aoyama M., Sanchez-Monedero M.A. 2011. Impacts of biochar addition on methane and carbon dioxide emissions during composting of cattle manure. *Asia Pacific Biochar Conference Kyoto*.
34. Steiner C., Melear N., Harris K., Das K.C. 2011. Biochar as bulking agent for poultry litter composting. *Carbon Management* 2(3).
35. Stylianou M.A., Inglezakis V.J., Moustakas K.G., Loizidou M.D. 2008. Improvement of the quality of sewage sludge compost by adding natural clinoptilolite. *Desalination* 224, 240-249.
36. Verheijen F.G.A., Jeffery S., Bastos A.C., van der Velde M., Diafas I. Biochar Application to Soils – a critical scientific Review of Effects on Soil Properties, Process and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 2010.
37. Verheijen F.G.A., Montanarella L., Bastos A.C. 2012. Sustainability, certification, and regulation of biochar. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 47(9), 649-653.
38. Wysokiński A., Kalembsa S. 2011. Wpływ dodatków mineralnych i organicznych do osadów ściekowych oraz kompostowania uzyskanych mieszanin na ich wybrane właściwości. *Inżynieria Ekologiczna* 27, 240-249.
39. Zorpas A.A., Loizidou M. 2008. Sawdust and natural zeolite as a bulking agent for improving quality of composting product from anaerobically stabilized sewage sludge. *Bioresource Technology* 99, 7545-7552.