

Krystyna MALIŃSKA

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

Biowęgiel odpowiedzią na aktualne problemy ochrony środowiska

Streszczenie: Narastające problemy ochrony środowiska związane z postępującą degradacją gleb, nasilającymi się skutkami zmian klimatycznych, produkcją energii oraz zagospodarowaniem odpadów wymagają poszukiwania nowych, skuteczniejszych i tańszych rozwiązań. Jednym z proponowanych rozwiązań aktualnych problemów w obszarze ochrony środowiska jest biowęgiel, czyli karbonat otrzymany w procesie pirolizy biomasy roślinnej oraz odpadów organicznych. Biowęgiel i jego zastosowanie nie jest rozwiązaniem nowym - od wieków stosowany był w rolnictwie. Jednakże w ostatnich latach jego właściwości i potencjalne zastosowania „odkrywane” są na nowo i obecnie można stwierdzić, że tradycyjnie znany karbonat, w odpowiedzi na współczesne potrzeby i zastosowania w obszarze ochrony środowiska, zyskał nową „markę” i funkcjonuje jako biowęgiel. Substraty do produkcji biowęglu obejmują zróżnicowaną grupę materiałów, do której należą: rośliny energetyczne, odpady leśne, biomasa rolnicza, osady ściekowe, organiczna frakcja odpadów komunalnych czy pozostałości z przetwórstwa rolno-spożywczego. Wybór substratów uzależniony jest m.in. od właściwości fizykochemicznych (np. zawartości wody i substancji organicznej, rozmiaru cząstek), potencjalnego zastosowania (np. do produkcji energii, na cele rolnicze, do usuwania zanieczyszczeń), aspektów logistycznych oraz procesu pirolizy i jego parametrów. Biowęgiel dzięki takim właściwościom fizykochemicznym, jak wysoka zawartość węgla organicznego w formie stabilnej i substancji mineralnych, znacznie rozwiniętej porowatości i powierzchni właściwej, może być z powodzeniem wykorzystywany: w bioenergetyce jako paliwo odnawialne; do sekwestracji węgla w glebie; w procesie kompostowania jako materiał strukturalny czy dodatek ograniczający emisję amoniaku; w produkcji nawozów organicznych na bazie biowęglu; do poprawy właściwości gleb użytkowanych rolniczo; do usuwania zanieczyszczeń z roztworów wodnych, ścieków komunalnych i przemysłowych, oraz gazów procesowych; w remediacji gleb zanieczyszczonych związkami organicznymi i nieorganicznymi, oraz do ograniczania zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych poprzez retencję np. składników biogennych w glebie. Wykorzystanie biowęglu w ochronie środowiska niesie ze sobą wiele korzyści, m.in. takich, jak możliwość zastąpienia paliw kopalnych paliwem odnawialnym, poprawę właściwości gleb, np. zwiększenie ilości węgla w glebie czy pojemności wodnej gruntu, ograniczenie zużycia nawozów organicznych i nieorganicznych oraz środków ochrony roślin, a tym samym ryzyka zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych. Pomimo wielu rozpoznanych korzyści, produkcja biowęglu oraz wprowadzanie go do środowiska naturalnego może również nieść ze sobą pewne zagrożenia. Mogą one dotyczyć m.in. intensywnego pozyskiwania biomasy z upraw, a tym samym prowadzić do degradacji gleb, wprowadzania toksycznych związków, np. WWA, dioksyn i furanów, do środowiska glebowego, co wpływa negatywnie na żywe organizmy i może prowadzić do zanieczyszczenia wód podziemnych. Co więcej, właściwości fizykochemiczne biowęglu otrzymanego z różnych substratów, jak również procesy i mechanizmy długookresowego wpływu na środowisko naturalne, nie zostały jeszcze w pełni poznane. Dalsze kierunki badań powinny więc obejmować m.in. opracowanie systemu klasyfikacji biowęglu otrzymanych z różnych substratów w oparciu o ich właściwości fizykochemiczne i kryteria zastosowań, analizę możliwości optymalizacji parametrów procesu pirolizy w celu uzyskania pożądaných właściwości biowęglu dla różnych zastosowań w ochronie środowiska, ocenę wpływu stosowania biowęglu na środowisko naturalne w dłuższej perspektywie czasowej, określenie występowania potencjalnych zagrożeń związanych z wprowadzeniem

biowęgla do środowiska, analizę kosztów produkcji biowęgla oraz dostępności substratów przydatnych do jego produkcji oraz kosztów stosowania biowęgla, np. do produkcji energii, remediacji zanieczyszczonych gruntów, poprawy właściwości gleb czy też usuwania zanieczyszczeń ze ścieków komunalnych i przemysłowych.

Słowa kluczowe: biowęgiel, biokarbonat, agrokarbonat, karbonat, piroliza, sekwestracja węgla w glebie, biomasa, odpady organiczne, ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, kompostowanie, odzysk energii

Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się narastające problemy związane z koniecznością zagospodarowywania odpadów ulegających biodegradacji, osadów ściekowych oraz biodegradowalnej frakcji odpadów komunalnych w procesach odzysku materii lub/i energii, poprawy właściwości gleb, ograniczenia stosowania nawozów mineralnych oraz środków ochrony roślin, ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz sekwestracji węgla w glebie. Z tego względu poszukuje się nowych rozwiązań, które umożliwią znalezienie wspólnej płaszczyzny do rozwiązania tych problemów zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Odpowiedzią na aktualne problemy ochrony środowiska może być biowęgiel.

Biowęgiel to stałe paliwo odnawialne zbliżone do powszechnie znanego węgla drzewnego, powstające podczas termicznej konwersji biomasy roślinnej i odpadów organicznych, w wyniku której, obok samego biowęgla, powstaje szereg produktów ciekłych i gazowych o wysokiej wartości energetycznej [1, 2, 3]. W produkcji biowęgla można uzyskać energię w postaci ciepła lub w formie chemicznej (biopaliwa), które następnie można wykorzystać do produkcji energii elektrycznej czy też paliw transportowych [4]. Biowęgiel i jego wykorzystanie nie jest nowym rozwiązaniem, szczególnie dotyczy to jego wykorzystania w rolnictwie. Był stosowany w Europie i Ameryce Południowej w tradycyjnej XIX-wiecznej uprawie roli. Zainteresowanie biowęgłem zaczęło wzrastać od lat 80. XX wieku. Można stwierdzić, że jest on obecnie „odkrywany” na nowo [5]. Literatura podaje, że dodatek biowęgla do gleb zwiększa ich żyzność oraz wpływa na zmiany klimatyczne poprzez sekwestrację węgla w glebie, redukcję emisji N_2O oraz CH_4 z gleb. Biowęgiel zwiększa pojemność wodną gruntu oraz pH gleb, zapobiega wymywaniu składników pokarmowych oraz wiąże zanieczyszczenia organiczne i nieorganiczne [6]. Biowęgiel może pełnić rolę materiału strukturotwórczego oraz ograniczać straty azotu podczas kompostowania. Obecnie mamy do czynienia z koncepcją, w której biowęgiel może być odpowiedzią na problemy związane z (1) degradacją gleb i brakiem zapewnienia bezpiecznej produkcji żywności, (2) zmianami klimatycznymi, (3) zrównoważoną produkcją energii oraz (4) zagospodarowaniem odpadów [6, 7].

Celem artykułu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącej biowęgla i jego właściwości, możliwości wykorzystania w ochronie środowiska i rolnictwie oraz kierunków dalszych badań nad potencjalnymi zastosowaniami w tych obszarach.

1. Biowęgiel i jego produkcja

Biowęgiel (ang. *biochar*, *biocarbon*) to stałe paliwo odnawialne otrzymywane z różnych rodzajów biomasy w procesie pirolizy, podczas której powstają paliwa ciekłe i gazowe wykorzystywane do produkcji energii [3]. Wg *International Biochar Initiative* [8] biowęgiel definiowany jest jako drobnoziarnisty karbonat o wysokiej zawartości węgla i niskiej podatności na rozkład. Jest otrzymywany w procesie pirolizy biomasy roślinnej oraz odpadów organicznych. Biorąc pod uwagę właściwości fizykochemiczne, biowęgiel i karbonat zasadniczo stanowią ten sam materiał. Jediną różnicą pomiędzy biowęgłem a karbonatem jest jego zastosowanie. Ogólnie przyjmuje się, że biowęgiel stosowany jest m.in. do remediacji skażonych gleb, sekwestracji węgla w glebie i innych zastosowań w obszarze ochrony środowiska, podczas gdy karbonat jest wykorzystywany jako paliwo odnawialne do otrzymywania energii [9, 10]. Biowęgiel wykorzystywany w rolnictwie w celu poprawy właściwości gleb nazywany jest również agrokarbonatem (ang. *agrichar*) [2, 9]. Należy podkreślić, że termin „biowęgiel” wskazuje również na biologiczne pochodzenie substratów użytych w procesie pirolizy w odróżnieniu od np. tworzyw sztucznych czy innych niż biologiczne materiałów. Można stwierdzić, że tradycyjnie znany karbonat w odpowiedzi na współczesne potrzeby i zastosowania w obszarze ochrony środowiska, zyskał nową „markę” i funkcjonuje jako biowęgiel.

Substraty do produkcji biowęgla stanowią bardzo zróżnicowaną i liczną grupę, do której można zaliczyć rośliny energetyczne (np. miskant, wierzba) [11], odpady leśne, biomasę rolniczą (np. rzepak, słonecznik, kolby kukurydzy) [12], osady ściekowe, organiczną frakcję odpadów komunalnych, pozostałości z przetwórstwa rolno-spożywczego (np. owies pofermentacyjny, łuski ryżowe, skorupki orzechów, kokos, puste owoce olejowca), a także pomiot kurzy [13, 14], obornik bydłocy, biomasę alg [15], przekompostowaną frakcję odpadów komunalnych [16]. Biowęgiel można również uzyskiwać z różnego rodzaju odpadów powstających w gospodarstwach rolnych. Odpady te mogą być poddawane pirolizie w instalacjach dostosowanych do potrzeb gospodarstw lub też w specjalnych instalacjach przemysłowych. Wykorzystanie tego typu odpadów do produkcji biowęgla pozwoli na ograniczenie ich ilości kierowanych na składowiska, a także kosztów związanych ze stosowaniem innych metod zagospodarowania [17]. Co więcej, w rezultacie odzyskiwana jest energia i otrzymywany jest dodatek poprawiający własności gleb. Do produkcji biowęgla można wykorzystywać biomasę z upraw przeznaczonych specjalnie na ten cel. Jednakże z uwagi na wysokie koszty związane z produkcją biomasy i jej konkurencyjności wobec produkcji żywności i pasz uważa się, że takie rozwiązanie nie jest ekonomicznie uzasadnione [18]. Wybór substratów do produkcji biowęgla uzależniony jest od takich czynników, jak właściwości fizykochemiczne substratów (np. zawartość wody, zawartość węgla, rozmiar cząstek), aspektów logistycznych, potencjalnych zastosowań (np. produkcja energii, produkcja dodatku poprawiającego własności gleb), procesu pirolizy i jego parametrów.

Otrzymywanie biowęgla odbywa się w procesie pirolizy. Piroliza jest najstarszym procesem termicznego przetwarzania biomasy, podczas którego bez dostępu

tlenu w temperaturze 350–700°C powstają produkty takie, jak olej będący mieszaniną węglowodorów, gaz syntetyczny będący mieszaniną gazowych węglowodorów oraz biowęgiel. Proporcje poszczególnych produktów pirolizy biomasy zależą od tempa przyrostu temperatury, czasu rozkładu, temperatury i ciśnienia [2].

Tabela 1

Udział produktów pirolizy prowadzonej w różnych warunkach procesu [2, 10]

Proces	Udział produktów w procesie pirolizy %		
	Produkty ciekłe	Syngaz	Biowęgiel
Szybka piroliza	75	13	12
Umiarkowana piroliza	50	30	20
Biokarbonizacja	30	35	35
Gazyfikacja	5	85	10

Podczas szybkiej pirolizy (temperatura 500°C, czas przebywania w temperaturze końcowej 1 s) powstaje ok. 12% biowęgla. Piroliza umiarkowana (temperatura 500°C, czas przebywania w temperaturze końcowej 10-20 s) pozwala uzyskać ok. 20% biowęgla. Powolna piroliza, tj. biokarbonizacja (temperatura 500°C, czas przebywania w temperaturze końcowej 5-30 min.) prowadzi do otrzymania 35% biowęgla. Natomiast w przypadku gazyfikacji (temperatura >800°C, czas przebywania w temperaturze końcowej 10-20 s) powstaje ok. 10% biowęgla [2, 10]. Poszczególne produkty termicznej konwersji biomasy można dowolnie otrzymać, zmieniając warunki pirolizy, np. temperaturę czy czas przebywania w końcowej temperaturze. Maksymalizacja produkcji biowęgla jest możliwa na drodze powolnej pirolizy przy względnie niskiej temperaturze reaktora (400°C), wolnym tempie przyrostu temperatury (0,01-2°C/s) oraz dłuższym czasie przebywania w temperaturze końcowej. Przykładowo w procesie pirolizy (550°C) rzepaku i słonecznika otrzymano odpowiednio 34 i 30% biooleju, 25 i 36% biowęgla oraz 41 i 34% gazu [12]. Natomiast piroliza wierzby, sosny i miskanta prowadzona przez 10 min. w temperaturze 500°C pozwoliła uzyskać odpowiednio 25,0-26,2%, 22,2-22,5% oraz 25,9-26,2% biowęgla [11]. Piroliza osadów ściekowych w 300, 400, 500 i 700°C pozwoliła uzyskać odpowiednio 72,3%, 63,7%, 57,9% oraz 52,4% biowęgla [19]. W przypadku pirolizy makroalg testowano następujące temperatury: 307, 414, 450, 512°C. Najkorzystniejsza okazała się temperatura 450°C, która pozwoliła uzyskać zadowalającą efektywność pirolizy przy mniejszych stratach masy [15]. Lehmann (2007) za optymalną temperaturę do produkcji biowęgla podaje 550°C [7]. Temperatura ta pozwala na uzyskanie najkorzystniejszych właściwości biowęgla, tj. zawartości węgla, pojemności wymiany kationowej oraz powierzchni właściwej. Biowęgiel otrzymany w temperaturze niższej niż 400°C charakteryzuje się niską powierzchnią właściwą i z tego względu nie będzie wykazywał korzystnych właściwości jako polepszający dodatek do gleb. Dodatkowo w wyniku procesu pirolizy uzyskuje się eliminację patogenów obecnych w substratach, a także możliwa jest transformacja niektórych metali ciężkich w formy mniej toksyczne [18]. Jed-

nakże w wyniku pirolizy niektórych substratów oraz warunków prowadzenia procesu może dochodzić do wytworzenia się fitotoksycznych i potencjalnie kancerogennych związków.

2. Właściwości biowęgla

Właściwości biowęgla różnią się znacznie i zależą od rodzaju biomasy użytej do produkcji biowęgla oraz warunków prowadzenia procesu pirolizy. Do najważniejszych właściwości biowęgla należą: skład chemiczny, stabilność, powierzchnia właściwa i porowatość.

Skład chemiczny biowęgla różni się znacznie między sobą i zależy od składu chemicznego substratów oraz prowadzenia procesu pirolizy i jego parametrów [7]. Biowęgle zawierają względnie stabilny węgiel organiczny, węgiel wymywalny oraz popiół [20]. Zawierają związki aromatyczne, związki alifatyczne oraz łatwo ulegające degradacji utlenione związki węgla [7]. Biorąc pod uwagę skład chemiczny, biowęgle różnią się od innych rodzajów materii organicznej tym, że zawierają znacznie większe ilości aromatycznych związków węgla. Biowęgle zawierają również frakcję mineralną, na którą składają się makro- i mikroelementy, dzięki której są cennym źródłem substancji mineralnych (m.in. wapnia, magnezu, węglanów) dla mikroorganizmów glebowych [20]. W zależności od użytej biomasy oraz warunków procesu termicznego biowęgiel może charakteryzować się wysoką zawartością węgla 50-90%. Zawartości wody mogą wynosić 1-15%, substancji lotnych 0-40%, a substancji mineralnych 0,5-5%. Stosunek C/N może wynosić od 7 do 500 lub więcej [6, 10]. Biowęgiel charakteryzuje się neutralnym lub zasadowym pH. Zawartość P i K w biowęgłach znacznie się różni i dla P jest to zakres 2,7-480 g/kg, a dla K 1,0-58 g/kg [9]. Biowęgle wykazują niewielką podatność na degradację oraz rozkład mikrobiologiczny, dlatego też wprowadzone do gleb wykazują się znaczną stabilnością pod względem składu chemicznego. Niektóre rodzaje biowęgla wprowadzone do gleby mogą ulegać względnie szybkiemu rozkładowi, inne mogą pozostawać niezmienione przez długi okres czasu, jednakże ostatecznie wszystkie ulegną w glebie mineralizacji. Stabilność biowęgla w środowisku determinują takie czynniki jak rodzaj substratu użytego do produkcji biowęgla oraz parametry procesu pirolizy, właściwości gleby oraz warunki klimatyczne [7]. Struktura porowata i powierzchnia właściwa biowęgla są najważniejszymi właściwościami fizycznymi i to one odpowiedzialne są za przebieg różnych procesów w glebie [21]. Biowęgiel charakteryzuje się znacząco rozwiniętą wewnętrzną porowatością [3], co wpływa na wodochłonność, zdolności sorpcyjne oraz retencję składników pokarmowych w glebie.

Wśród innych właściwości biowęgla determinujących jego zastosowania są również: pH, pojemność jonowymienna, gęstość nasypowa. Biowęgle na ogół charakteryzują się zasadowym pH. Jednakże pH jest w dużej mierze uzależnione od właściwości substratów i parametrów procesu pirolizy i może wynosić od 4 do 12 [7]. Wzrost temperatury pirolizy może powodować wzrost pH niektórych rodzajów

biowęgla. Pojemność jonowymienna biowęgla uzależniona jest od temperatury pirolizy. W niższych temperaturach otrzymuje się biowęgla z wysoką pojemnością jonowymienną, podczas gdy temperatura powyżej 600°C znacznie zmniejsza pojemność jonowymienną [7]. Gęstość nasypowa biowęgla uwarunkowana jest wielkością cząstek, i np. biowęgiel z odpadów drzewnych może posiadać gęstość nasypową ok. 250 kg/m³ [22], a biowęgiel otrzymany z bambusa ok. 40 kg/m³ [23].

Fizykochemiczne właściwości biowęgla, tj. przede wszystkim zawartość węgla organicznego w formie stabilnej i substancji mineralnych, znacznie rozwinięta porowatość i powierzchnia właściwa, sprawiają, że może on być z powodzeniem wykorzystywany w ochronie środowiska.

3. Biowęgiel w ochronie środowiska

Biowęgiel oraz możliwości jego zastosowania mogą być odpowiedzią na aktualne problemy ochrony środowiska, które w ogólnym ujęciu dotyczą postępującej degradacji gleb, nasilających się skutków zmian klimatycznych, produkcji energii oraz zagospodarowania odpadów zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju (rys. 1).



Rys. 1. Potencjalne obszary zastosowań biowęgla [6]

Produkcja biowęgla z różnych rodzajów biomasy w procesie pirolizy pozwala na uzyskanie paliw ciekłych i gazowych do produkcji energii, a powstający biowęgiel stanowi stałe paliwo odnawialne wykorzystywane w energetyce [3]. Otrzymywanie biowęgla z odpadów biodegradowalnych może być jedną z metod ich zagospodarowywania pozwalającą m.in. na redukcję ilości odpadów kierowanych

na składowiska oraz odzysk energii. Właściwości fizyko-chemiczne biowęgla, takie jak np. wysoka zawartość węgla organicznego, stabilność pod względem chemicznym, znacząco rozwinięta powierzchnia właściwa oraz porowatość, pozwalają na wykorzystanie biowęgla do: sekwestracji węgla w glebie, optymalizacji procesu kompostowania i produkcji nawozów organicznych na bazie biowęgla, remediacji zanieczyszczonych gleb, poprawy właściwości gleb, ograniczania zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych oraz usuwania zanieczyszczeń [6].

Odzysk energii

Jednym z najbardziej znanych zastosowań biowęgla jest wykorzystanie go w bioenergetyce jako paliwo odnawialne. Biowęgiel może być spalany lub współspalany w elektrociepłowniach czy elektrowniach. Stanowi on alternatywę dla paliw kopalnych, a otrzymany z odpadów biodegradowalnych pozwala na odzysk energii z opadów kierowanych na składowiska. Wartość opałowa przykładowych biowęgla jest wyższa niż węgla brunatnego i zbliżona do węgla kamiennego (tab. 2).

Tabela 2

Parametry wybranych paliw i biowęgla otrzymanych z różnych rodzajów biomasy [12, 24-26]

Wybrane paliwa	Wartość opałowa MJ/kg	Węgiel %	Substancje lotne %	Popiół %
Paliwa kopalne				
Gaz ziemny	48,0	75,0	100,0	0,0
Węgiel kamienny	25,0	60,0	25,0	12,0
Węgiel brunatny	7,5-21,0	66,0-73,0	40,0-60,0	10,0-20,0
Biomasa				
Drewno	10,5	35,0	55,0	1,0
Słoma	15,0	43,0	73,0	3,0
Rzepak	15,3	44,7	78,7	7,3
Słonecznik	15,7	17,2	74,5	8,3
Biowęgiel				
Biowęgiel z rzepaku	23,4	72,7	13,6	21,8
Biowęgiel ze słonecznika	20,5	63,4	13,4	28,9
Biowęgiel firmy FLUID	25,0	> 70,0	< 0,01	< 6,0
Biowęgiel z pozostałości owoców olejowca	17,1	53,8	81,9	3,1
Biowęgiel z drewna czereśniowego	27,7	59,5	22,2	9,1

Zagospodarowanie odpadów biodegradowalnych

Odpady biodegradowalne, np. odpady z przetwórstwa rolno-spożywczego, odpady zwierzęce i biomasa rolnicza czy też organiczna frakcja odpadów komunalnych, z uwagi na szybko zachodzące procesy rozkładu i zagrożenie mikrobiologiczne, powinny być zagospodarowywane metodami innymi niż składowanie na składowiskach odpadów. Odpady te z powodzeniem mogą być surowcami do pro-

dukcji energii w procesie pirolizy, podczas której otrzymuje się również biowęgiel. Pozwala to na redukcję objętości i masy poddawanych pirolizie odpadów oraz umożliwia eliminację drobnoustrojów patogennych występujących np. w oborniku czy osadach ściekowych. Wykorzystanie odpadów biodegradowalnych do produkcji biowęglu w procesie pirolizy może pośrednio przyczynić się do ograniczenia ilości odpadów ulegających biodegradacji kierowanych na składowiska, a tym samym do redukcji emisji metanu ze składowisk odpadów, możliwości odzysku energii z odpadów oraz obniżenia kosztów transportu i stosowania innych metod zagospodarowania odpadów [6].

Optymalizacja procesu kompostowania

Biowęgiel dzięki swoim właściwościom fizykochemicznym może być stosowany w kompostowaniu jako materiał strukturalny, jak również jako dodatek ograniczający emisję amoniaku. Kompostowanie materiałów o wąskim C/N powoduje zwiększoną emisję amoniaku podczas procesu kompostowania, a w konsekwencji obniżoną zawartość azotu w otrzymanym kompoście [27]. Biowęgiel jako materiał strukturalny w procesie kompostowania może zwiększać całkowitą porowatość, porowatość powietrzną oraz pojemność wodną [28]. Biowęgle uzyskane z materiałów lignocelulozowych podczas powolnej pirolizy uzyskują duży udział makrospor w swojej strukturze [29], które wypełnione są powietrzem i pozwalają na utrzymanie warunków tlenowych w glebie [30]. Dias i in. prowadzili badania nad wykorzystaniem biowęglu z biomasy eukaliptusowej w kompostowaniu obornika ptasiego [31]. Stwierdzili, że dodatek biowęglu pozwala na optymalizację procesu kompostowania poprzez redukcję odorów oraz ograniczenie strat azotu. Steiner i in. również kompostowali obornik ptasi z dodatkiem biowęglu [32]. Dodatek biowęglu przyspieszył procesy biodegradacji oraz ograniczył emisję amoniaku o 64%. Badacze stwierdzili, że biowęgiel może być stosowany jako materiał strukturotwórczy do kompostowania odpadów bogatych w azot. Uzasadnione wydaje się więc wykorzystanie biowęglu jako materiału strukturalnego w procesie kompostowania lub jako dodatek do otrzymanego kompostu. Pomimo wielu korzyści wynikających z rolniczego zastosowania biowęglu, w literaturze nie ma informacji dotyczących wykorzystania biowęglu jako materiału strukturotwórczego w procesie kompostowania oraz efektu składu chemicznego biowęglu na stabilizację materii organicznej oraz humifikacji podczas fazy dojrzewania w tym procesie [31]. Co więcej, nie ma też wielu danych dotyczących wpływu dodatku biowęglu na jakość otrzymanych kompostów. Jindo i in. (2012) badali wpływ dodatku biowęglu na jakość otrzymanego kompostu z mieszanki kompostowej przygotowanej z pomiotu kurzego, wycieków jabłkowych i łusek ryżowych kompostowanych w pryzmach. Podczas kompostowania przygotowanej mieszanki z dodatkiem biowęglu (2% obj.) zaobserwowano wzrost temperatury w pryzmie w porównaniu do mieszanki kontrolnej. Powodem była zwiększona powierzchnia właściwa oraz duża pojemność wodna biowęglu, które przyczyniły się do stworzenia bardziej korzystnych warunków dla mikroorganizmów, co również spowodowało nieznaczne wydłużenie fazy termofilowej kompostowania. Badacze podjęli próbę określenia wpływu dodatku biowęglu do badanej mieszanki kompostowej na właściwości fizykochemiczne doj-

rzałego kompostu. Dodatek niewielkiej ilości biowęgla miał pozytywny wpływ na jakość dojrzałego kompostu. Jednakże na jakość otrzymywanych kompostów ma wpływ przede wszystkim zmienność jakości substratów wykorzystywanych do przygotowania mieszanki kompostowej oraz warunki prowadzenia procesu [33]. Komposty otrzymywane z mieszanek kompostowych z udziałem biowęgla mogą posiadać dodatkowe właściwości funkcjonalne dzięki właściwościom fizykochemicznym biowęgla. Badania prowadzone nad wykorzystaniem biowęgla jako dodatku do konwencjonalnych i organicznych nawozów wskazały na większą stabilizację węgla i ograniczenie nitryfikacji w doświadczeniach wazonowych. Jednakże niezbędne są dalsze badania nad wpływem dodatku biowęgla na właściwości nawozów organicznych oraz wzrost roślin [34].

Sekwestracja węgla w glebie

W ostatnich latach obserwuje się ciągły wzrost emisji CO₂ do atmosfery w ilości ok. 4,1 GtC/rok [4], co prowadzi do znaczącej dysproporcji w emisji i pochłanianiu węgla w przyrodzie. Z tego względu konieczne są działania mające na celu zbilansowanie węgla w atmosferze poprzez jego wychwyt i magazynowanie w postaci stabilnej poza atmosferą, np. w glebie [3]. Obecnie duży potencjał magazynowania węgla w glebie posiada właśnie biowęgiel otrzymywany z różnych rodzajów biomasy. Biowęgiel wprowadzany do gleby pozwala na długookresowe magazynowanie pierwiastka węgla. Szacuje się, że dodatek biowęgla do gleb w dawce 13,5 t/ha (co stanowi 3% górnej warstwy o głębokości 30 cm) zapewnia magazynowanie węgla przez przynajmniej dwa stulecia [4]. Co więcej, węgiel zmagazynowany w glebie pozostaje stabilny pod względem chemicznym przez tysiąclecia. Jeżeli 10% światowych zasobów biomasy zostałyby poddane konwersji do biowęgla z efektywnością procesu ok. 50% i uzyskaniem 30% energii z substancji lotnych, to możliwa byłaby sekwestracja węgla w ilości 4,8 GtC/rok, co stanowi ok. 20% obecnego rocznego wzrostu ilości węgla atmosferycznego (tj. 4,1 GtC/rok) [4]. Szacuje się, że konwersja węgla zawartego w biomase do biowęgla pozwala na sekwestrację ok. 50% początkowej ilości węgla w porównaniu do pozostałości po spalaniu (tj. 3%) i biologicznym rozkładzie (mniej niż 10-20%) [35].

Poprawa właściwości gleb

Obecnie szacuje się, że większość gleb użytkowanych rolniczo jest uboga w materię organiczną [36]. Co więcej, skutki zmian klimatycznych, stosowanie nawozów mineralnych i zanieczyszczenie gleb powodują znaczne zubożenie gleb użytkowanych rolniczo [18, 37]. Wyniki badań przeprowadzonych przez Beesely i in. (2011) oraz Nigussie i in. (2012) wskazują, że biowęgiel dodany do gleb ubogich i zdegradowanych może przyczynić się do poprawy żyzności i produktywności gleb oraz ochrony przed chorobami roślin. Biowęgiel znacząco wpływa na właściwości gleb. Literatura podaje, że dodatek biowęgla do gleb zwiększa żyzność gleb oraz wpływa na zmiany klimatyczne poprzez sekwestrację węgla w glebie, redukcję emisji N₂O oraz CH₄ z gleb [10]. Biowęgiel zwiększa pojemność wodną gruntu oraz pH gleb. W badaniach prowadzonych przez Karhu i in. (2011) nad wpływem dodatku biowęgla na pojemność wodną gleby oraz wiązanie CH₄ doda-

tek biowęgla w ilości 9 t/ha zwiększył pojemność wodną gleby o 11% [28]. Biowęgiel z uwagi na wysoką pojemność jonowymienną charakteryzuje się zdolnością do retencji i wymiany substancji pokarmowych w glebie [6, 7, 18]. Dodatek biowęgla z osadów ściekowych w ilości 10 t/ha w doświadczeniu wazonowym zwiększył plonowanie pomidorów o 64% w porównaniu do kontroli. Spowodowane było to synergicznym efektem zwiększonej dla roślin dostępności składników odżywczych oraz poprawą właściwości gleby [19]. Na przykład, biowęgiel otrzymany z łodyg kukurydzy dodany do gleb zanieczyszczonych chromem i kontrolnych zwiększył pH, przewodnictwo elektryczne, węgiel organiczny, całkowity azot, dostępny fosfor, pojemność wymiany kationowej oraz zwiększył wymianę jonową badanych gleb [38]. Jednakże retencja substancji pokarmowych w glebie może być ograniczona w przypadku biowęgla otrzymanych przy wyższych temperaturach procesu pirolizy. Spowodowane jest to brakiem grup funkcyjnych umożliwiających wymianę jonową na skutek zachodzących podczas pirolizy procesów dehydratacji i dekarboksylacji [11].

Usuwanie zanieczyszczeń

Właściwości sorpcyjne biowęgla mogą być wykorzystywane w procesach usuwania różnego rodzaju zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych z fazy gazowej, stałej i ciekłej. Korzystne właściwości sorpcyjne wykazują biowęgla otrzymane w wyższej temperaturze, która pozwala na uzyskanie większej powierzchni właściwej i mikroporowatości. Charakteryzują się one nieregularną, porowatą strukturą. Zawierają głównie związki aromatyczne, znacznie mniej alifatycznych związków węgla i grup funkcyjnych. Z tego względu w niewielkim stopniu mogą przyczynić się do poprawy właściwości gleb, ale mogą być wykorzystywane jako sorbenty.

Dotychczas prowadzono badania nad wykorzystywaniem biowęgla z różnych substratów (np. słomy, obornika, beztlenowo stabilizowanej biomasy, bambusa, trzciny cukrowej, drzewa orzesznika, itp.) do usuwania m.in. pozostałości farmaceutyków, takich jak związki zakłócające działanie endokrynne czy antybiotyki bakteriostatyczne (np. sulfametoksazol) ze ścieków [39, 40], miedzi, rtęci, niklu, ołowiu, kadmu i chromu z wodnych roztworów lub ścieków komunalnych i przemysłowych [41, 42, 43, 44], pestycydów, takich jak np. karbaryl, atrazyna, symazyna, acetochlor z gleb [45, 46, 47] jak również wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych czy polichlorowanych bifenyli [48]. Odprowadzanie oczyszczonych ścieków komunalnych zawierających w dalszym ciągu pozostałości farmaceutyków do środowiska glebowego może mieć toksyczne działanie na organizmy żywe oraz doprowadzić do zanieczyszczenia wód podziemnych [40]. Biowęgiel może również adsorbować dwutlenek węgla, tlenki azotu i dwutlenek siarki z gazów procesowych. Ta zdolność może być wykorzystywana do redukcji emisji ze spalania paliw kopalnych, np. w połączeniu ze spalaniem węgla kamiennego [7]). W zależności od uzyskanych właściwości fizykochemicznych i strukturalnych biowęgla mogą stanowić tańszą alternatywę do węgla aktywnych i innych technologii oczyszczania ścieków komunalnych i przemysłowych [41].

Remediacja zanieczyszczonych gruntów

Zanieczyszczenie gleb substancjami organicznymi, jak i nieorganicznymi występuje coraz powszechniej w wielu regionach świata, niosąc ze sobą zagrożenie dla żywych organizmów i zdrowia człowieka. Z tego względu poszukuje się nowych, skutecznych i tanich rozwiązań remediacji *in situ*, które umożliwiłyby w sposób naturalny usunięcie substancji toksycznych i szkodliwych z gleb przy jednoczesnej rewitalizacji ekosystemu glebowego i stymulacji wzrostu roślin [49]. Takim rozwiązaniem może być dodatek biowęgla do zanieczyszczonych gleb. W zależności od substratów użytych do produkcji biowęgla posiada on właściwości, dzięki którym może wiązać zanieczyszczenia organiczne i metale ciężkie w glebach, tym samym ograniczając ich biodostępność dla żywych organizmów. Zanieczyszczenia te mogą ulegać procesom sorpcji na biowęglu lub/i immobilizacji w strukturze glebowej. Szacuje się, że zanieczyszczenia organiczne w glebach dwukrotnie szybciej ulegają procesom sorpcji na biowęglu niż na naturalnie występującej materii organicznej [49].

Literatura podaje przykłady badań prowadzonych w celu określenia możliwości wykorzystania biowęgla otrzymanego z różnych substratów do remediacji gleb zanieczyszczonych związkami organicznymi i nieorganicznymi. Na przykład, Beesley i in. (2010) badali wpływ dodatku biowęgla oraz kompostów z odpadów zielonych na mobilność, biodostępność oraz toksyczność zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych w glebach [50]. Dodatek biowęgla znacznie bardziej zmniejszył biodostępność wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych oraz kadmu i cynku niż kompost z odpadów zielonych. Yu i in. (2009) badali dodatek dwóch rodzajów biowęgla z biomasy eukaliptusowej otrzymanych w temp. 450 i 850°C na degradację i sekwestrację insektycydów [51]. Stwierdzili, że dodatek biowęgla do gleb zanieczyszczonych insektycydami spowodował znaczną redukcję ich biodostępności dla roślin. Innym przykładem może być biowęgiel wyprodukowany z łodyg kukurydzy, który dzięki wysokim zdolnościom adsorpcyjnym zmniejszył znacznie stężenie chromu w tkankach sałaty (*Lactuca sativa*) uprawianej na glebie zanieczyszczonej chromem [38].

Ograniczenie zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych

Biowęgle wprowadzone do środowiska glebowego mogą również ograniczać przenikanie zanieczyszczeń do wód podziemnych i powierzchniowych. Dodatek biowęgla do gleb może redukować zanieczyszczenie wód poprzez zatrzymywanie pierwiastków biogennych, takich jak azot i fosfor, w glebach, tym samym ograniczając ilość tych pierwiastków przedostających się do wód podziemnych lub trafiających ze spływem powierzchniowym do wód powierzchniowych [7]. Prowadzone badania nad sorpcją fosforanów, amoniaku oraz azotanów w kolumnach wypełnionych glebą piaszczystą z wykorzystaniem różnych rodzajów biowęgla wskazują na możliwość ograniczania wymywania pierwiastków biogennych w glebie z dodatkiem biowęgla. Przykładowo, dodatek biowęgla otrzymanego z pieprzowca brazylijskiego w temp. 600°C pozwolił na ograniczenie wymywania azotanów, amoniaku i fosforanów z badanej gleby odpowiednio o 34,0, 34,7 i 20,6% [40]. Biowęgiel może więc ograniczyć zanieczyszczenie wód poprzez poprawę retencji składników

odżywczych w wierzchnich warstwach gleby, co wpływa na redukcję ilości nawozów i środków ochrony roślin potrzebnych do uprawy roślin [7].

4. Kierunki dalszych badań

W oparciu o wyniki dotychczasowych badań nad właściwościami i możliwościami zastosowania biowęgla z różnych substratów, można stwierdzić, że biowęgiel może być odpowiedzią na aktualne problemy ochrony środowiska. Jednakże większość prac badawczych prowadzona była w warunkach laboratoryjnych lub wazonowych w stosunkowo krótkich okresach czasu, z tego względu otrzymane wyniki badań nie pozwalają jeszcze na pełne poznanie właściwości fizykochemicznych biowęgla, zrozumienie oraz wyjaśnienie procesów i mechanizmów jego oddziaływania na środowisko.

Z tego względu kierunki dalszych badań dotyczących biowęgla będą obejmowały zarówno obszar badań podstawowych, jak i aplikacyjnych z uwzględnieniem analizy ekonomicznej i potencjału rynkowego biowęgla. Niezbędne będzie:

- określenie kosztów produkcji biowęgla oraz dostępności substratów przydatnych do jego produkcji,
- pełne poznanie właściwości biowęgla otrzymywanych z różnych substratów,
- opracowanie systemu klasyfikacji biowęgla otrzymanych z różnych substratów w oparciu o ich właściwości fizykochemiczne i kryteria zastosowań [11],
- analiza możliwości optymalizacji parametrów procesu pirolizy w celu uzyskania pożądaných właściwości biowęgla dla różnych zastosowań w ochronie środowiska,
- ocena wpływu stosowania biowęgla na środowisko naturalne w dłuższej perspektywie czasowej,
- analiza możliwości długookresowej sekwestracji węgla w glebie,
- ocena zmian właściwości fizykochemicznych biowęgla po wprowadzeniu do środowiska glebowego w dłuższym okresie czasu,
- określenie występowania potencjalnych zagrożeń związanych z wprowadzeniem biowęgla do środowiska, np. interakcji biowęgla ze środowiskiem glebowym [9],
- analiza kosztów stosowania biowęgla do produkcji energii, remediacji zanieczyszczonych gruntów, poprawy właściwości gleb, itp. [4],
- wskazanie optymalnych dawek biowęgla w celu polepszenia właściwości gleb z uwzględnieniem różnych rodzajów gleb oraz warunków klimatycznych [4, 28],
- określenie możliwości wykorzystania biowęgla jako materiału strukturotwórczego i czynnika ograniczającego straty azotu podczas kompostowania oraz jego wpływ na dynamikę procesu [31],
- ocena wpływu dodatku biowęgla na jakość nawozów na bazie kompostów [33],
- ocena możliwości wykorzystania różnych rodzajów biowęgla jako sorbentów w usuwaniu zanieczyszczeń.

W Europie wyrazem zainteresowania właściwościami biowęgla i możliwościami jego zastosowania jest m.in. powołanie akcji COST o tematyce związanej z biowęgłem (*Biochar as option for sustainable resource management*). Akcja ma za zadanie koordynowanie badań i stworzenie wspólnej platformy badawczo-rozwojowej w Europie ukierunkowanej na zastosowanie biowęgla na potrzeby zrównoważonej gospodarki zasobami, polepszania właściwości gleb, sekwestracji węgla oraz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. W ramach akcji prowadzone są badania w czterech obszarach: produkcja i charakterystyka biowęgla, wykorzystanie biowęgla na cele rolnicze, analiza ekonomiczna w oparciu o analizę cyklu życia (LCA) oraz ocena oddziaływania na środowisko.

Podsumowanie

Opracowywanie rozwiązań dla aktualnych problemów ochrony środowiska często wiąże się z poszukiwaniem nowych możliwości wykorzystania już częściowo poznanych materiałów czy technologii. Tak też jest w przypadku biowęgla, którego możliwości zastosowania w obszarze ochrony środowiska i rolnictwa są obecnie „odkrywane” na nowo. Biowęgiel nie jest rozwiązaniem nowym i od wieków wykorzystywany był w rolnictwie do polepszania właściwości gleb użytkowanych rolniczo. Obecnie, dobrze poznanym zastosowaniem biowęgla w zależności od wartości kalorycznej jest odzysk energii podczas jego spalania. Jako paliwo odnawialne biowęgiel może mieć znaczenie dla przyszłości rozwoju bioenergetyki. Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że biowęgiel może być odpowiedzią na problemy związane z nasilającymi się skutkami zmian klimatycznych, gospodarką odpadami, produkcją energii i postępującą degradacją gleb. Dzięki swoim właściwościom fizykochemicznym, takim jak: wysoka zawartość węgla organicznego, stabilność pod względem chemicznym, mocno rozwinięta powierzchnia właściwa i porowatość, biowęgiel może być wykorzystywany również do sekwestracji węgla w glebie, optymalizacji procesu kompostowania i produkcji nawozów na bazie biowęgla, remediacji gleb zanieczyszczonych substancjami organicznymi i nieorganicznymi, poprawy właściwości gleb i stymulacji wzrostu roślin, ograniczania zanieczyszczenia wód podziemnych i powierzchniowych oraz usuwania zanieczyszczeń. Przy czym wprowadzanie biowęgla do środowiska glebowego ma na celu osiągnięcie efektu synergii dla remediacji zanieczyszczonych gruntów, poprawy właściwości gleby użytkowanych rolniczo oraz długookresowej sekwestracji węgla w glebie.

Niewątpliwie, wykorzystanie biowęgla w ochronie środowiska może przynieść wiele korzyści. Literatura podaje liczne przykłady możliwych rozwiązań problemów ochrony środowiska wykorzystując do tego biowęgiel, jednakże nie podaje krytycznej analizy potencjalnych zagrożeń, jakie może powodować produkcja biowęgla oraz wprowadzenie go do środowiska naturalnego. Na przykład, biowęgiel może zawierać toksyczne związki i zanieczyszczenia, takie jak wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne czy dioksyny i furany, które powstają podczas termicznej konwersji biomasy. Produkcja biowęgla z różnych rodzajów biomasy na

drodze procesów termicznych wymaga stałych dostaw biomasy. Intensywne pozyskiwanie biomasy z upraw może prowadzić do degradacji gleb, negatywnie wpływać na produktywność gleb i naturalne siedliska oraz powodować zanieczyszczenie środowiska. Należy również podkreślić, że pomimo licznych prac badawczych, w dalszym ciągu właściwości fizykochemiczne biowęgli otrzymanych z różnych substratów nie zostały w pełni poznane, a procesy i mechanizmy długookresowego oddziaływania biowęglu na środowisko wymagają głębszego zrozumienia i wyjaśnienia. Oczekuje się, że realizacja dalszych badań pozwoli na opracowanie skutecznych rozwiązań z wykorzystaniem biowęglu dla problemów ochrony środowiska zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Literatura

- [1] Igliński B., Buczkowski R., Cichosz M., Technologie bioenergetyczne, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2009.
- [2] Lewandowski W.M., Radziemska E., Ryms M., Ostrowski P., Nowoczesne metody termochemiczne konwersji biomasy w paliwa gazowe, ciekłe i stałe, Proceedings of ECOpole, 2010, 4(2).
- [3] Bis Z., Biowęgiel - powrót do przeszłości, szansa dla przyszłości, Czysta Energia 2012, 6.
- [4] Matovic D., Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective, Energy 2011, 36, 2011-2016.
- [5] Jaworski J., Biowęgiel. Kontekst ponownego 'odkrycia' zastosowania węgla drzewnego w agrokulturze oraz jego potencjalne znaczenie odnośnie kryzysów globalnych, a także ruch społeczny z tym związany (przedsiębiorstwa, organizacje, konferencje, źródła informacji online) <http://www.sibg.org.pl/UserFiles/File/opracowanie%20biowegiel%20kontekst%20znaczenie%20ruch%20spoleczny.pdf> (09.05.2012).
- [6] Lehman J., Joseph S. (ed). Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Earthscan, London 2009.
- [7] Lehman J., Bio-energy in the black, Frontiers in Ecology and the Environment 2007, 5(7), 381-387.
- [8] Raport. International Biochar Initiative <http://www.biochar-international.org/biochar> (10.05.2012).
- [9] Laird D.A., Brown R.C., Amonette J.E., Lehmann J., Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar., Biofuels, Bioproducts, Biorefining 2009, 3, 547-562.
- [10] Verheijen F.G.A., Jeffery S., Bastos A.C., van der Velde M., Dias I., Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoiils_docs/other/eur24099.pdf (10.05.2012).
- [11] Kwapinski W., Byrne C.M.P., Kryachko E., Wolfram P., Adley C., Leahy J.J., Novotny E.H., Hayes M.H.B., Waste Biomass Valorization 2010, 1, 177-189.
- [12] Sánchez M.E., Lindao E., Margaleff D., Martínez O., Morán A., Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflower: production and characterization of bio-fuels and biochar soil management. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2009, 85, 142-144.
- [13] Song W., Guo M. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2012, 94, 138-145.
- [14] Ibarrola R., Shackely S., Hammond J., Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: a life cycle carbon assessment. Waste Management 2012, 32, 859-868.

- [15] Bird M.I., Wurster C.M., de Paula Silva P.H., Bass A.M., de Nys R., Algal biochar - production and properties, *Bioresource Technology* 2011, 102, 1886-1891.
- [16] Laine J., Perspective of the preparation of agrichars using fossil hydrocarbon coke, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012, 16, 5597-5602.
- [17] Krull E., Biochar - its role in crop nutrition. <http://www.grdc.com.au/Research-and-Development/Research-Updates/2010/02/Biochar-its-role-in-crop-nutrition> (09.05.2012).
- [18] McHenry M. P., Agricultural bio-char production, renewable energy generation and farm carbon sequestration in Western Australia: Certainty, uncertainty and risk, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 2009, 129, 1-7.
- [19] Hossain M.K., Strezov V., Chan K.Y., Ziolkowski A., Nelson P.F., Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar, *Journal of Environmental Management* 2011, 92, 223-228.
- [20] Lehmann J., Rilling M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D., Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biotechnology and Biochemistry* 2011, 43, 1812-1836.
- [21] Atkinson C.J., Fitzgerald J.D., Higgs N.A., Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: review, *Plant Soil* 2010, 337,1-18.
- [22] Husk B., Preliminary evaluation of biochar in a commercial farming operation in Canada. http://www.blue-leaf.ca/main-en/files/BlueLeaf_Biochar_Field_Trial_2008_fv.pdf (06.06.2011).
- [23] Chen Y-X., Huang X-D., Han Z-Y., Huang X., Hu B., Shi D-Z., Wu W-X., Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting, *Chemosphere* 2010, 78, 1177-1181.
- [24] Materiały firmy FLUID <http://fluid.pl/oferta/produkcja-i-sprzedaz-biowegla-marki-fluid-dla-energetyki-zawodowej-i-rolnictwa/> (15.12.2012)
- [25] Sukiran M.A., Kheang L.S., Baker N.A., May C.Y., Production and characterization of biochar from the pyrolysis of empty fruit bunches. *American Journal of Applied Sciences* 2011, 8(10), 984-988.
- [26] Gheorghie C., Marculescu C., Badea A., Dinca C., Apostol T., Effect of pyrolysis conditions on bio-char production from biomass, *Materiały konferencyjne, 3rd WSEAS International Conference on Renewable Energy Sources 2009*, 239-241
- [27] Dach J., Wpływ dodatku różnego rodzaju słomy na dynamikę procesu i wielkość emisji amoniaku z kompostowanych osadów ściekowych, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 2010, 55(2), 8-13.
- [28] Karhu K., Mattila T., Bergstrom I., Regina K., Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity - Results from a short-term pilot field study, *Agriculture, Ecosystems and Environment* 2011, 140, 309-313.
- [29] Downie A., Crosky A., Munroe P., Physical properties of biochar, [In:] Lehmann J., Joseph S. (ed.), *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*, Earthscan, London 2009.
- [30] Van Zwieten L., Singh B., Joseph S., Kimber S., Cowei A., Chan K.Y., Biochar and emissions of non CO₂ greenhouse gases from soil, [In:] Lehmann J., Joseph S. (ed.), *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*, Earthscan, London 2009.
- [31] Dias B.O., Silva C.A., Higshikawa F.S., Roig A., Sanchez-Monedero M.A., Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure: effect on organic matter degradation and humification, *Bioresource Technology* 2010, 101, 1239-1246.
- [32] Steiner C., Das K.C., Melear N., Lakly D., Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar, *Journal of Environmental Quality* 2010, 39 (4), 1236-1242.

- [33] Jindo K., Suto K., Matsumoto K., Garcia C., Sonoki T., Sanchez-Monedero M.A., Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended compost prepared from poultry manure, *Bioresource Technology* 2012, 110, 396-404.
- [34] Schulz H.S., Glaser B.G., Compared biochar and compost effects on plant growth and soil factors as reported for three consequent greenhouse trial setups, *Geophysical Research Abstracts* 2012, 14, EGU 2012-1114.
- [35] Lehmann J., Gaunt J., Rondon M., Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems, *Mitig. Adapt. Strat. Glob Change* 2006, 11, 395-419.
- [36] Vaccari F.P., Baronti S., Lugato E., Genesio L., Castaldi S., Fornasier F., Miglietta F., Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat, *European Journal of Agronomy* 2011, 34, 231-238.
- [37] Ociepa A., Pruszek K., Lach J., Ociepa E., Influence of long-term cultivation of soils by means of manure and sludge on the increase of heavy metals content in soils, *Chemia i Inżynieria Ekologiczna* 2008 S, 15(1),103-109.
- [38] Nigussie A., Kissi E., Misganaw M., Ambaw G., Effect of biochar application on soil properties and nutrient uptake of lettuces (*Lactuca sativa*) grown in chromium polluted soils, *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 2012, 12(3), 369-376.
- [39] Sun K., Ro K., Guo M., Novak J., Mashayekhi H., Xing B., Sorption of bisphenol A, 17 α -ethinyl estradiol and phenanthrene on thermally and hydrothermally produced biochars, *Bioresource Technology* 2011, 102, 5757-5763.
- [40] Yao Y., Gao B., Chen H., Jinag L., Inyang M., Zimmerman A.R., Cao X., Yang L., Xue Y., Li H., Adsorption of sulfamethoxazole on biochar and its impact on reclaimed water irrigation, *Journal of Hazardous Materials* 2012, 209-210, 408-413.
- [41] Tong X., Li J., Yuan J. Xu R., Adsorption of Cu(II) by biochars generated from three crop straws, *Chemical Engineering Journal* 2011, 172, 828-834.
- [42] Regmi P., Moscoso J.L.G., Kumar S., Cao X., Mao J., Scharfan G. Removal of copper and cadmium from aqueous solutions using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process, *Journal of Environmental Management* 109, 61-69.
- [43] Inyang M., Gao B., Yao Y., Xue Y., Zimmerman A.R., Pullammanappallil P., Cao X., Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass, *Bioresource Technology* 2012, 110, 50-56.
- [44] Mohan D., Rajput S., Singh V.K., Steele P.H., Pittman C.U., Modelling and evaluation of chromium remediation from water using low cost bio-char, a green adsorbent, *Journal of Hazardous Materials* 2011, 188, 319-333.
- [45] Zhang W., Guo M., Chow T., Bennet D.N., Rajagopalan N., Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides, *Journal of Hazardous Materials* 2010, 181, 121-126.
- [46] Zhang P., Sun H., Yu L., Sun T., Adsorption and catalytic hydrolysis of carbaryl and antrazine on pig manure-derived biochars: impact of structural properties of biochars, *Journal of Hazardous Materials* 2013, 244-245, 217-224.
- [47] Spokas K.A., Koskinen W.C., Baker J.M., Reicosky D.C., Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil, *Chemosphere* 77, 574-581.
- [48] Corenlissen G., Gustafsson O., Bucheli T.D., Jonker M.T.O., Koelmans A.A., Van Noort P.C.M. Extensive sorption of organic compounds to black carbon, coal, and kerogen in sediments and soils: Mechanisms and consequences for distribution, bioaccumulation, and biodegradation, *Environmental Science & Technology* 2005, 39, 6881-6895.
- [49] Beesely L., Moreno-Jiménez E., Gomez-Eyles J.L., Harris E., Robinson B., Sizmur T., A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils, *Environmental Pollution* 2011, 159, 3269-3282.

- [50] Beesley L., Moreno-Jimenez E., Gomez-Eyles J.L., Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, availability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil, *Environmental Pollution* 2010, 158 (6), 2282-2287.
- [51] Yu X-Y., Ying G-G., Kookana R.S., Reduced uptake of pesticides with biochar additions to soil, *Chemosphere* 2009, 76, 665-671.

Biochar - a Response to Current Environmental Issues

In recent years the most pressing environmental issues include widespread degradation of soil, global climate change, production of energy and management of waste. Therefore, there is a need for new more efficient and affordable methods that would allow for addressing all of these issues. Biochar and its properties could be a response to current environmental challenges. Biochar is a solid carbon-rich product referred to as charcoal obtained from pyrolysis of various biomass feedstock. Biochar is not a new idea as it has been applied in agriculture for centuries. However, its properties and potential applications are being "re-discovered" now, and traditionally known charcoal was "rebranded" to biochar to address the needs and applications for environment protection. There is a diversified group of feedstock materials that can be used for production of biochar including energy crops, forestry residues, agricultural biomass, sewage sludge, biodegradable fraction of municipal waste and food processing residues. Selection of a feedstock material depends on physical and chemical properties (i.e. moisture content, organic matter content, particle size, etc.), potential applications (i.e. energy production, agriculture, removal of contaminants, etc.), biomass provision and logistics, and also pyrolysis technology and process parameters. Biochar due to its properties such as high content of stable organic carbon and minerals, high porosity and surface area can be applied for bioenergy production, sequestration of carbon in soil, composting and production of biochar-based composts and fertilizers, improvement of soil properties, removal of contaminants from liquid solutions, municipal and industrial wastewater. Also, treatment of post-processing gases, remediation of soil contaminated with organic and inorganic compounds, and reduction of contamination of groundwater and surface water through retention of nutrients in soil can be obtained using biochar. Applications of biochar have a number of benefits for protection of natural environment including substitution of fossil fuels, improvement of soils through increase in carbon content or water holding capacity, reduction of organic and inorganic fertilizers and pesticides, and thus mitigation of groundwater and surface water contamination. Despite the great potential of biochar and numerous benefits of its applications, production of biochar and its introduction to soil may also pose some threats. These threats may include intensive biomass production that could lead to competition with land or food production, degradation of soil, contamination of soil with toxic compounds, e.g. PAHs, dioxins and furans which have negative effects on biota and cause contamination of groundwater. It has to be pointed out that some of the physical and chemical properties of biochars produced from different feedstock materials as well as processes and mechanisms behind the biochar-soil interactions, and also long-term effects of biochar on natural environment are still not fully understood and explained. Therefore, future research should focus on development of a biochar classification system based on physical and chemical properties and selected applications, evaluation of pyrolysis parameters in order to engineer biochars with required properties for selected applications, assessment of biochar effects on natural environment in long-term perspective, environmental risk assessment of various types of biochars, cost analysis for biochar production, biomass provision and applications for environmental protection, e.g. production of energy, remediation of contaminated soil, improvement of agricultural soil, and removal of contaminants from municipal and industrial wastewater.

Keywords: biochar, biocarbonate, agrichar, charcoal, pyrolysis, carbon sequestration in soil, biomass, organic waste, mitigation of GHG emissions, composting, energy recovery

