

Marta Wyzińska, Jerzy Grabiński

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

**BIOWĘGIEL – PERSPEKTYWY I MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA
W NOWOCZESNYM ROLNICTWIE***

Słowa kluczowe: biowęgiel, biochar, plonowanie, nowoczesne rolnictwo

Wstęp

Współczesne rolnictwo stoi przed coraz większymi wyzwaniami wynikającymi z postępujących zmian klimatycznych, w tym częstszych i bardziej intensywnych susz oraz długotrwałych fal upałów. Warunki te istotnie ograniczają wzrost i rozwój roślin, zwłaszcza sadowniczych, wpływając negatywnie na aktywność fotosyntetyczną, pobieranie składników pokarmowych oraz ogólną kondycję roślin uprawnych. W odpowiedzi na te zagrożenia coraz większą uwagę zwraca się na rozwiązania umożliwiające efektywne gospodarowanie zasobami wodnymi i poprawę jakości środowiska glebowego. Jednym z takich rozwiązań jest biowęgiel, który w połączeniu z mikroorganizmami może znacząco ograniczać skutki stresu abiotycznego, w tym suszy.

Jednocześnie biowęgiel, jako produkt o wysokiej zawartości węgla organicznego i niskiej podatności na degradację, staje się kluczowym narzędziem odbudowy materii organicznej w glebach. Jego zastosowanie przyczynia się do poprawy struktury gleby, zwiększenia zawartości próchnicy oraz aktywności mikrobiologicznej. Jest to szczególnie istotne w kontekście obserwowanego w Polsce pogarszania się jakości gleb spowodowanego zarówno działalnością rolniczą, jak i pozarolniczą. Niedobór próchnicy, będący efektem nieprawidłowego gospodarowania zasobami glebowymi, zmusza do poszukiwania alternatywnych źródeł materii organicznej, takich jak biowęgiel, który może odgrywać istotną rolę w odbudowie funkcji biologicznych i chemicznych gleb.

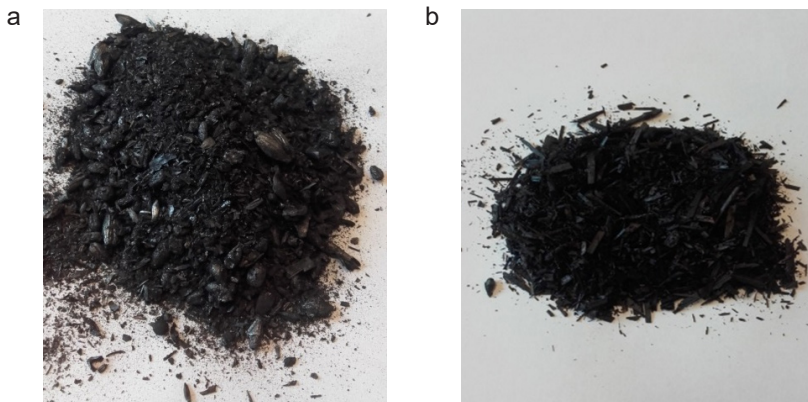
*Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.8. pt. „Wykorzystanie dronów w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2025 r.

Na świecie rośnie zainteresowanie produkcją i zastosowaniem biowęgla, szczególnie w rolnictwie i ochronie środowiska. Jako materiał pochodzący z pirolizy różnorodnej biomasy – od roślin energetycznych, przez odpady rolnicze, aż po osady ściekowe – biowęgiel znajduje zastosowanie głównie w celach nieenergetycznych. Postęp technologiczny w zakresie urządzeń do jego produkcji oraz możliwości wzbogacania biowęgla w mikroorganizmy, nawozy lub inne substancje bioaktywne otwiera nowe perspektywy dla jego roli jako komponentu poprawiającego jakość środowiska glebowego.

Biorąc pod uwagę rosnące zapotrzebowanie na żywność, szacuje się, że do 2050 r. produkcja zbóż musi wzrosnąć o 50–70%. Technologie takie jak biowęgiel mogą odegrać kluczową rolę nie tylko w podnoszeniu efektywności upraw, ale również w odbudowie zdolności produkcyjnej zdegradowanych gleb. Dlatego też, w świetle aktualnych i prognozowanych wyzwań klimatycznych oraz degradacyjnych biowęgla i jego zastosowania stają się jednym z najbardziej obiecujących kierunków badań i wdrożeń w nowoczesnym, zrównoważonym rolnictwie.

Jak powstaje biowęgiel

Biowęgiel (biochar) to drobnoziarnista substancja stała (fot. 1) bogata w węgiel organiczny, powstająca w procesie pirolizy biomasy w warunkach beztlenowych lub ograniczonego dostępu tlenu. Jego unikalne właściwości fizykochemiczne sprawiają, że coraz częściej postrzegany jest jako wszechstronny materiał do poprawy jakości gleby, łagodzenia skutków zmian klimatu oraz zwiększania efektywności produkcji roślinnej (Lehmann i in. 2017).



Fot. 1. Biowęgiel a) z roślin medycznych po ekstrakcji, b) ze słomy żytniej

Fot. Marta Wzyńska

Średnia temperatura dla powolnej pirolizy wynosi 300–900°C, dla szybkiej pirolizy – 350–1000°C, a dla torfikacji – 200–300°C; wydajność biowęgla dla powolnej

pirolizy wynosi 35–45%, dla szybkiej – 55–20%, a dla toryfikacji – 60–68% (Diatta i in. 2020, Gabhane i in. 2020) (tab. 1).

Tabela 1

Technologie produkcji biowęgla

Technologia	Opis metody
Metoda tradycyjna	W starożytności biowęgiel był wytwarzany na dwa sposoby: (i) spalano drewno na świeżym powietrzu, a następnie szybko przykrywano niedopalone drewno warstwami ziemi, (ii) układano drewno w dołach z ziemią, przykrywano je warstwami ziemi, a następnie stopniowo spalano przy braku dostępu lub przy ograniczonym dostępie powietrza.
Piroliza	<ul style="list-style-type: none"> • Spalanie biomasy zachodzi w temperaturach od 350°C do 1000°C w piecach i innych specjalistycznych urządzeniach przy częściowym lub całkowitym braku tlenu w celu wytworzenia biowęgla i biooleju. • W procesie powolnej pirolizy biomasa spalana jest w temperaturze 300–800°C i przy powolnym nagrzewaniu (od 0°C·s⁻¹ do 10°C·s⁻¹). • Powolny proces zachodzi zwykle przy ciśnieniu atmosferycznym i energii dostarczanej ze źródła zewnętrznego. • W przypadku pirolizy powolnej głównym produktem jest biowęgiel (35–45%), następnie bioolej (25–35%) i gaz syntezowy (20–30%). • Szybka piroliza zachodzi w temperaturach pomiędzy 350°C a 1000°C w warunkach beztlenowych, podobnie jak w przypadku wolnej pirolizy, chociaż szybkość nagrzewania w tym przypadku (17°C·s⁻¹) jest znacznie wyższa w porównaniu z wolną pirolizą.
Toryfikacja	<ul style="list-style-type: none"> • Jest to proces znany jako łagodna piroliza, służący do produkcji biowęgla. • Można go osiągnąć w różnych typach reaktorów. • Ogólnie rzecz biorąc, istnieją dwie główne kategorie reaktorów do toryfikacji: reaktory z ogrzewaniem bezpośrednim i reaktory z ogrzewaniem pośrednim.

Źródło: Alkharabsheh i in. 2021

Skład chemiczny i stabilność

Biowęgiel charakteryzuje się bardzo wysoką zawartością węgla organicznego (zazwyczaj powyżej 60%) oraz wyjątkowo niską podatnością na biodegradację. Dzięki temu może pozostawać w glebie przez setki, a nawet tysiące lat, pełniąc funkcję trwałego magazynu węgla. Jego wysoka stabilność termochemiczna wynika z obecności aromatycznych i kondensowanych struktur pierścieniowych, które są odporne na rozkład biologiczny (Lehmann i Joseph 2015).

Proces wytwarzania biowęgla polega na pirolizie biomasy w warunkach beztlenowych, co prowadzi do powstania materiału o dominującym udziale trwałych form węgla. Dzięki temu biowęgiel zachowuje się w środowisku znacznie dłużej

niż tradycyjna materia organiczna, co nadaje mu szczególne znaczenie w kontekście sekwestracji węgla i łagodzenia skutków zmian klimatu (Lehmann i Joseph 2015).

Skład chemiczny biowęgla zależy zarówno od rodzaju biomasy wykorzystywanej w procesie (np. drewno, słoma, odpady rolnicze), jak i od temperatury pirolizy, która zwykle mieści się w zakresie 300–700°C (tab. 2). Przy niższych temperaturach zachowuje się więcej związków organicznych, natomiast wyższe temperatury sprzyjają tworzeniu struktur bardziej stabilnych i odpornych na rozkład, zwiększając zawartość węgla organicznego do poziomu w granicach 50–90% (Glaser i in. 2002).

Tabela 2

Skład chemiczny różnych rodzajów biowęgla

Rodzaj biowęgla	Węgiel całkowity (%)	N (%)	S (%)	P (%)	pH	Temperatura spalania (°C)	Czas spalania (min)
1	70,8	3,9	0,074	0,320	8,50	550	bd ¹
2	63,5	1,8	0,890	0,095	10,00	600	bd
3	67,6	2,4	<0,100	0,330	6,79	500	4–7
4	42,6	3,6	0,224	4,420	6,78	550	240
5	70,5	1,2	0,146	0,260	9,65	550	180
6	75,6	1,9	0,136	0,120	8,32	550	240

¹1 – biowęgiel z plew zbożowych, 2 – biowęgiel z roślin medycznych po ekstrakcji, 3 – biowęgiel ze zrębków drzewnych „Fluid”, 4 – biowęgiel ze zrębków drzewnych, 5 – biowęgiel ze słomy żytniej, 6 – biowęgiel z mączki mięsno-kostnej;

²brak danych

Źródło: Wyzińska i Berbec 2024

Właściwości fizyczne

Biowęgiel charakteryzuje się porowatą strukturą, dużą powierzchnią właściwą (nawet powyżej 300 m²·g⁻¹) oraz niską gęstością objętościową. Takie właściwości fizyczne sprawiają, że przypomina on gąbkę zdolną do zatrzymywania znacznych ilości wody i składników pokarmowych w glebie. Dzięki temu biowęgiel szczególnie korzystnie wpływa na poprawę właściwości gleb lekkich, ograniczając straty wody przemieszczającej się poza strefę korzeniową.

Porowata struktura biowęgla pełni również istotną funkcję ekologiczną. Liczne mikropory stanowią dogodne środowisko dla mikroorganizmów glebowych, zapewniając im ochronę przed wysychaniem i promieniowaniem UV. Sprzyja to ich kolonizacji i zwiększa aktywność biologiczną gleby, co w konsekwencji poprawia jej żyzność oraz warunki wzrostu roślin (Kammann i in. 2015).

Zdolność sorpcyjna

Jednym z najważniejszych parametrów użytkowych biowęgla jest jego wysoka pojemność wymiany kationowej (CEC), która warunkuje zdolność do adsorpcji jonów i związków organicznych. Dzięki tej właściwości biowęgiel zwiększa retencję składników pokarmowych w glebie, ograniczając ich wymywanie, co ma szczególne znaczenie w przypadku gleb piaszczystych (Lehmann i in. 2017). Materiał ten efektywnie wiąże kationy, takie jak K^+ , NH_4^+ czy Ca^{2+} , a także niektóre substancje organiczne, przyczyniając się do poprawy żyzności i stabilności chemicznej środowiska glebowego.

Wartość CEC może ulegać dalszemu zwiększeniu w wyniku tzw. aktywacji biowęgla, polegającej m.in. na jego kompostowaniu z odpadami organicznymi lub inokulacji mikroorganizmami. Zabiegi te sprzyjają tworzeniu powierzchniowych grup funkcyjnych i zwiększeniu liczby miejsc sorpcyjnych, co poprawia dostępność składników pokarmowych dla roślin. Dodatkowo biowęgiel wykazuje zdolność do wiązania metali ciężkich oraz pozostałości pestycydów, co czyni go cennym materiałem wspomagającym procesy remediacji i rekultywacji gleb zdegradowanych (Lehmann i in. 2017).

Wpływ na właściwości chemiczne gleby

Biowęgiel może znacząco wpływać na odczyn gleby, najczęściej powodując jego wzrost. Właściwość ta jest szczególnie cenna w przypadku gleb kwaśnych, których zakwaszenie stanowi powszechny problem w warunkach klimatycznych Polski. Podwyższenie pH sprzyja lepszej dostępności makro- i mikroelementów, takich jak fosfor, wapń czy magnez, a jednocześnie ogranicza toksyczne działanie glinu i manganu.

Skład chemiczny biowęgla, w tym zawartość składników odżywczych, zależy od rodzaju użytej biomasy oraz parametrów procesu pirolizy. Wytworzony produkt może zawierać znaczące ilości wapnia, magnezu, fosforu i potasu, które przyczyniają się do poprawy żyzności gleb ubogich (Glaser i in. 2002). Na przykład popiół z biomasy drzewnej często charakteryzuje się wysoką zawartością potasu. Należy jednak podkreślić, że biowęgiel nie stanowi samodzielnego nawozu, lecz pełni rolę nośnika i stabilizatora składników pokarmowych, wspierając ich długotrwałą dostępność dla roślin.

Wpływ na właściwości biologiczne gleby

Wprowadzenie biowęgla do gleby może istotnie wspierać rozwój mikrobiomu glebowego poprzez tworzenie korzystnego mikrośrodowiska zapewniającego ochronę przed wysychaniem oraz odpowiednią powierzchnię do zasiedlania przez mikroorganizmy. Najlepsze efekty obserwuje się przy zastosowaniu biowęgla wzbogaconego

mikroorganizmami, uzyskanego np. poprzez proces kompostowania lub inokulację biofertylizatorami (Schmidt i in. 2014, Kammann i in. 2015).

Dzięki swojej porowatej strukturze biowęgiel sprzyja zwiększeniu liczebności i aktywności biologicznej drobnoustrojów glebowych. Pory materiału stanowią schronienie dla bakterii i grzybów, a obecne w nim związki organiczne mogą służyć jako źródło energii dla niektórych mikroorganizmów. Zastosowanie biowęgla w połączeniu z pożytecznymi mikroorganizmami, takimi jak *Bacillus* spp. czy *Trichoderma* spp., może dodatkowo stymulować procesy biologiczne w glebie i wspierać rozwój roślin.

Badania wskazują, że biowęgiel kompostowany (tzw. biochar compost) pełni funkcję promotora wzrostu, oddziałując zarówno na strukturę i aktywność mikrobiomu glebowego, jak i na zwiększenie dostępności składników pokarmowych dla roślin (Schmidt i in. 2014). Z tego względu rozwiązania oparte na biowęglu coraz częściej znajdują zastosowanie w rolnictwie regeneratywnym i systemach agroekologicznych.

Przeciwdziałanie degradacji gleb

W obliczu postępującego spadku zawartości próchnicy w glebach Polski biowęgiel staje się ważnym narzędziem wspierającym odbudowę zasobów węgla organicznego oraz poprawę jakości środowiska glebowego. Dzięki swojej wyjątkowej trwałości i odporności na rozkład, stanowi stabilny rezerwuuar węgla, przyczyniając się do długotrwałej stabilizacji materii organicznej i ograniczenia procesów degradacji chemicznej, fizycznej oraz biologicznej (Lehmann i Joseph 2015).

W warunkach pogarszającej się jakości gleb rolniczych – wynikającej m.in. z erozji, zakwaszenia, utraty próchnicy czy nadmiernego stosowania nawozów mineralnych – biowęgiel może odgrywać kluczową rolę w przywracaniu ich funkcji produkcyjnych. Jego obecność w glebie sprzyja odbudowie struktury próchnicznej, zwiększeniu aktywności mikrobiologicznej oraz poprawie ogólnej żyzności, czyniąc z niego trwały element wspierający zrównoważone gospodarowanie zasobami glebowymi.

Znaczenie w nowoczesnym rolnictwie

Biowęgiel ma porowatą strukturę i wysoką zawartość węgla, dzięki czemu jest trwały i stabilny w glebie nawet przez setki lat (Hoque i in. 2025). Poprawia jej strukturę, zwiększa retencję wody, pomaga w magazynowaniu składników odżywczych oraz wspiera rozwój mikroorganizmów glebowych. Dodatkowo biowęgiel może pomagać w sekwestracji węgla poprzez długotrwałe zatrzymywanie go w glebie, co przyczynia się do łagodzenia zmian klimatu (Anyebe i in. 2025) (tab. 3).

Tabela 3

Zalety stosowania biowęgla

Zaleta	Opis mechanizmu działania biowęgla	Źródło
Zwiększenie retencji wody	porowata struktura zwiększa pojemność wodną gleby i wykazuje właściwości sorbcyjne	Atkinson i in. 2010
Poprawa żyzności gleby	poprawia pojemność wymiany kationów, pH, wpływa na aktywność mikrobiologiczną gleby	Lehmann 2007, Lehmann i in. 2011, Ding i in. 2023
Poprawa plonowania roślin	lepsze warunki glebowe (lepsza struktura gleby, dostępność wody i substancji odżywczych) skutkują wyższymi plonami roślin	Ding i in. 2023 Antonangelo i in. 2025
Sekwestracja węgla	stabilny węgiel biogeniczny pozostaje w glebie przez setki lat, ograniczając emisję CO ₂	Woolf i in. 2010
Oczyszczanie zanieczyszczeń	adsorbując metale ciężkie i pestycydy, wspomaga remediację gleby i wody	Kabir i in. 2021

Źródło: opracowanie własne

Wpływ biowęgla na plonowanie i produktywność roślin

Długotrwałe stosowanie biowęgla w systemach rolniczych może przyczyniać się do zwiększenia stabilności plonów oraz poprawy efektywności wykorzystania nawozów mineralnych. Z tego powodu biowęgiel coraz częściej uwzględniany jest w strategiach zrównoważonego rolnictwa, agroleśnictwa i zarządzania krajobrazem (Kammann i in. 2015, Lehmann i in. 2015).

Zastosowanie biowęgla (biocharu) w praktyce rolniczej budzi rosnące zainteresowanie ze względu na jego zdolność do zwiększania produktywności roślin, szczególnie w warunkach stresu środowiskowego, takich jak susza, degradacja gleb czy zakwaszenie. Dzięki specyficznym właściwościom fizycznym, chemicznym i biologicznym biowęgiel może wpływać na wzrost i rozwój roślin, poprawiając dostępność wody i składników pokarmowych oraz zwiększając ogólną efektywność wykorzystania zasobów środowiskowych (Lehmann i Joseph 2015).

W jednej z kluczowych analiz przeglądowych Jeffery i in. (2011) przeanalizowali wyniki 16 badań terenowych, wykazując, że średni wzrost plonów po zastosowaniu biowęgla wynosił ok. 10%. Największe efekty uzyskano w glebach tropikalnych, gdzie plony wzrosły średnio o 25%, podczas gdy w strefie umiarkowanej reakcja roślin była słabsza, co przypisano korzystniejszym warunkom glebowym i klimatycznym.

Najbardziej wyraźne pozytywne efekty obserwowano w glebach o niskiej żyzności, kwaśnych i ubogich w materię organiczną, gdzie poprawa właściwości fizykoche-

micznych po dodaniu biowęgla znacząco zwiększała dostępność wody i składników odżywczych, przekładając się na wzrost produktywności roślin (Glaser i in. 2002, Jeffery i in. 2011).

Efekt plonotwórczy biowęgla wynika z synergicznego działania kilku mechanizmów:

- Poprawa retencji wody – biowęgiel zwiększa zdolność gleby do zatrzymywania wody, co zmniejsza stres wodny w okresach suszy (Kammann i in. 2011);
- Zwiększenie pojemności sorpcyjnej gleby – biowęgiel poprawia pojemność wymiany kationowej (CEC), co ogranicza wymywanie składników pokarmowych i zwiększa ich dostępność (Lehmann i in. 2011);
- Neutralizacja pH – w glebach kwaśnych biowęgiel może podnieść pH, co sprzyja lepszej dostępności fosforu i ograniczeniu toksyczności glinu (Glaser i in. 2002);
- Stymulacja mikroorganizmów glebowych – porowata struktura biowęgla stanowi niszę dla pożytecznych drobnoustrojów, co może poprawiać mineralizację i przyswajanie składników odżywczych (Thies i in. 2015).

Wpływ biowęgla na rośliny zależy w dużej mierze od:

- Rodzaju gleby – gleby piaszczyste i kwaśne wykazują wyraźnie większą reakcję na aplikację biowęgla niż gleby gliniaste i zasobne w próchnicę (Jeffery i in. 2011);
- Rodzaju biowęgla – jego właściwości zależą od materiału wyjściowego (np. drewno, słoma, obornik) oraz temperatury pirolizy. Biowęgiel z drewna twardego może mieć lepsze właściwości sorpcyjne, ale niższą zawartość składników pokarmowych (Lehmann i Joseph 2015);
- Dawki i sposobu aplikacji – zbyt niskie dawki (<5 t·ha⁻¹) mogą być niewystarczające, natomiast bardzo wysokie mogą wpływać negatywnie na rozwój roślin przez zaburzenie proporcji składników odżywczych (Kätterer i in. 2019).

W badaniach prowadzonych w strefie tropikalnej, m.in. w Brazylii, zastosowanie biowęgla w dawkach 10–20 t·ha⁻¹ przyczyniło się do znacznego wzrostu plonów manioku i kukurydzy – nawet o 30–50% (Steiner i in. 2007). W warunkach klimatu umiarkowanego, np. w Niemczech, dawka 16 t·ha⁻¹ pozwoliła zwiększyć plony pszenicy ozimej o 8–14%, szczególnie w okresach niedoboru wody (Kammann i in. 2011).

Pozytywne rezultaty uzyskano również w uprawach ogrodniczych. W doświadczeniach z pomidorem i papryką biowęgiel poprawiał dostępność azotu, co przekładało się na wzrost plonów o 10–20% (Rogovska i in. 2014). Jeszcze lepsze efekty osiągnano, gdy biowęgiel wzbogacano mikroorganizmami, tworząc tzw. biochar compost, który dodatkowo aktywizował mikrobiom glebowy i zwiększał przyswajalność składników pokarmowych (Schmidt i in. 2014).

Oprócz bezpośredniego wpływu na plonowanie biowęgiel przyczynia się do poprawy efektywności wykorzystania nawozów mineralnych, ogranicza straty wody oraz redukuje emisję gazów cieplarnianych z gleby. Jego wyjątkowa trwałość – się-

gająca setek lat – sprawia, że jest on jednym z kluczowych narzędzi wspierających długoterminową odbudowę żyzności gleb oraz adaptację rolnictwa do zmian klimatu (Woolf i in. 2010, Lehmann i in. 2015).

Wieloaspektowe badania nad zastosowaniem biowęgla w glebie potwierdzają, że choć ich dodatek zazwyczaj poprawia właściwości gleby i może sprzyjać wzrostowi plonów, to jednak zakres tej poprawy jest silnie uzależniony od warunków glebowych, klimatycznych oraz charakterystyki samego materiału, z którego wyprodukowano biowęgiel (Jeffery i in. 2011).

Trwałość biowęgla i jego znaczenie dla sekwestracji węgla

Należy wyraźnie podkreślić, że trwałość biowęgla w środowisku glebowym, sięgająca setek, a nawet tysięcy lat, czyni go jednym z najbardziej obiecujących narzędzi w kontekście długoterminowej sekwestracji węgla oraz mitygacji zmian klimatu. W przeciwieństwie do świeżej materii organicznej, która ulega stosunkowo szybkiemu rozkładowi biologicznemu i mineralizacji, biowęgiel charakteryzuje się wysokim stopniem aromatyzacji i odpornością na procesy biodegradacji (Zimmerman 2010, Lehmann i in. 2017).

Szacunki wskazują, że okres półtrwania węgla zawartego w biowęglu wynosi od 100 do ponad 1000 lat, w zależności od rodzaju surowca, temperatury pirolizy oraz warunków środowiskowych (Spokas 2010, Woolf i in. 2010, Singh i in. 2012). Długotrwała stabilność biowęgla wynika z przewagi związków aromatycznych o wysokim stopniu kondensacji pierścieni węglowych, które są wyjątkowo odporne na utlenianie zarówno chemiczne, jak i biologiczne (Lehmann i Joseph 2015).

Z perspektywy bilansu globalnego węgla, zastosowanie biowęgla w glebie stanowi formę trwałego magazynowania węgla atmosferycznego poprzez konwersję biomasy w formy stabilne chemicznie. W procesie pirolizy część węgla zostaje uwolniona jako CO₂, CH₄ czy tlenek węgla, natomiast znaczna część (20–50% pierwotnego węgla organicznego) pozostaje w postaci stabilnego biowęgla, który może być wprowadzony do gleby i akumulowany przez dziesięciolecia (Lehmann i in. 2006, Woolf i in. 2010).

W modelach klimatycznych wykazano, że globalne wdrożenie technologii biowęgla mogłoby przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych o 0,5–1,8 Gt CO₂ eq rocznie, co odpowiada ok. 1–3% obecnych globalnych emisji antropogenicznych (Woolf i in. 2010, Smith i in. 2016). Potencjał ten jest szczególnie istotny w kontekście strategii NRTs (ang. *negative emission technologies*), obok bioenergetyki z wychwytem i składowaniem węgla (BECCS) czy sekwestracji węgla w ekosystemach leśnych i glebowych (Lehmann i in. 2021).

Co więcej, stabilność biowęgla nie oznacza jego całkowitej biernej obecności w glebie. Z czasem ulega on powolnym przemianom powierzchniowym, które zwiększają jego zdolność sorpcyjną i umożliwiają interakcje z mikroorganizmami oraz związkami organicznymi, przyczyniając się do długofalowej poprawy właściwości

gleby i zwiększenia jej pojemności węglowej (Zimmerman 2010, Lehmann i Joseph 2015).

Biowęgiel stanowi wyjątkowo trwałą rezerwar węgla organicznego i tym samym realny mechanizm trwałej sekwestracji CO₂. Włączenie jego produkcji i aplikacji do strategii gospodarki węglowej oraz polityk klimatycznych może przyczynić się do osiągnięcia celów neutralności klimatycznej w perspektywie długoterminowej.

Podsumowanie

W obliczu pogłębiających się zmian klimatu i rosnącej presji na zwiększenie efektywności produkcji rolnej, biowęgiel (biochar) jawi się jako innowacyjne i wielofunkcyjne narzędzie wspierające zrównoważony rozwój rolnictwa. Jego unikalne właściwości fizykochemiczne – takie jak porowata struktura, wysoka zawartość trwałego węgla organicznego, zdolność do sorpcji wody i składników odżywczych – czynią go wartościowym komponentem poprawiającym jakość środowiska glebowego, zwłaszcza w glebach zdegradowanych, kwaśnych lub ubogich w próchnicę.

Biowęgiel wykazuje ponadto pozytywny wpływ na właściwości chemiczne i biologiczne gleby – podnosi pH, poprawia pojemność wymiany kationowej (CEC), wspiera rozwój mikrobiomu glebowego, a przy tym może wiązać zanieczyszczenia, takie jak metale ciężkie czy pestycydy. Jego potencjał jako narzędzia remediacji i odbudowy materii organicznej jest szczególnie istotny w kontekście degradacji gleb, która stanowi jedno z kluczowych wyzwań dla bezpieczeństwa żywnościowego.

Efekty stosowania biowęgla na plonowanie roślin są zróżnicowane, zależne od rodzaju gleby, typu biowęgla, dawki i sposobu aplikacji. Największe korzyści obserwuje się na glebach słabych, piaszczystych i kwaśnych, gdzie poprawa warunków glebowych przekłada się na wzrost plonów nawet o 20–50%. W połączeniu z mikroorganizmami i kompostem, biowęgiel może dodatkowo zwiększać efektywność wykorzystania nawozów oraz wspierać rolnictwo regeneratywne.

Zważywszy na konieczność zwiększenia produkcji rolnej o 50–70% do 2050 r. oraz pilną potrzebę adaptacji systemów rolniczych do zmian klimatu, biowęgiel stanowi jedno z najbardziej obiecujących narzędzi wspierających długoterminową żyzność gleb, efektywność wodno-nawozową i odporność upraw. Jego dalsze wdrażanie wymaga jednak pogłębionych badań terenowych, standaryzacji metod produkcji oraz integracji z lokalnymi strategiami gospodarowania zasobami środowiskowymi.

Literatura

1. Alkharabsheh H.M., Seleiman M.F., Battaglia M.L., Shami A., Jalal R.S., Alhammad B.A., Almutairi K.F., Al-Saif A.M.: Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: a review. *Agronomy*, 2021, **11**, 993; <https://doi.org/10.3390/agronomy11050993>

2. Antonangelo J.A., Gronwald N.J., Laird D.A., Lawrinenko M., Smith K.M.: Biochar impact on soil health and tree-based crops: a review. *Recent Advances in Biochar Research and Applications*. *Biochar* 2025, **7**, 51; <https://doi.org/10.1007/s42773-025-00450-6>
3. Anyebe O., Sadiq F.K., Monono B.O., Matsika T.A.: Biochar characteristics and application: Effects on soil ecosystem services and nutrient dynamics for enhanced crop yields. *Nitrogen*, 2025, **6(2)**, 31; <https://doi.org/10.3390/nitrogen6020031>
4. Atkinson C.J., Fitzgerald J.D., Hips N.A.: Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil*, 2010, **337**: 1-18.
5. Diatta A.A., Fike J.H., Battaglia M.L., Galbraith J., Baig M.B.: Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: a review. *Arabian Journal of Geoscience*, 2020, **13**, 595; <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05586-2>
6. Ding Y., Liu Y., Liu S., Li Z.: Biochar to improve soil fertility: a review. *Agronomy Sustain. Dev.*, 2023, **43**, 1114752.
7. Glaser B., Lehmann J., Zech W.: Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*: Springer, 2002, **35(4)**: 219-230.
8. Gabbane J.W., Bhange V.P., Patil P.D., Bankar S.T., Kumar S.: Recent trends in biochar production methods and its application as a soil health conditioner: a review. *SN Applied Sciences*, 2020, **2**: 1-21; <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3121-5>
9. Hoque M.M., Saha B.K., Scopa A., Drosos M.: Biochar in agriculture: A review on sources, production, and compositions related to soil fertility, crop productivity, and environmental sustainability. *Journal of Carbon Research*, 2025, **11(3)**, 50; <https://doi.org/10.3390/c11030050>
10. Jeffery S., Verheijen F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C.: A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*: Elsevier, 2011, **144(1)**: 175-187.
11. Kamann C.I., Ratering S., Eckhard C., Müller C.: Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils, *Journal of Environmental Quality*: ASA, CSSA, SSSA, 2011, **41(4)**: 1052-1066.
12. Kamann C.I., Schmidt H.P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., ... Glaser B.: Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports*: Nature Publishing Group, 2015, **5**, 11080.
13. Kättner T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L.: Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment, *Agriculture, Ecosystems & Environment*: Elsevier, 2019, **286**, 106665.
14. Kabir E., Kim K.H., Kwon E.E.: Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Journal of Environmental Management* 2021, **288**, 112409; <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112409>
15. Lehmann J., da Silva J., Steiner C., Nehls T., Zech W., Glaser B.: Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Fuel*: Elsevier, 2017, **209**: 230-240.
16. Lehmann J., Joseph S. (eds): *Biochar for environmental management. Science, Technology and Implementation*, Londyn: Routledge, 2015, pp. 976.
17. Lehmann J.: Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, **5**: 381-387.
18. Lehmann J., Abiven S., Kleber M., Pan G., Singh B.P., Sohi S., Zimmerman A.R.: Persistence of biochar in soil. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, **2**: 504-520.
19. Lehmann J., Gaunt J., Rondon M.: Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, **11**: 403-427.
20. Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., Masiello C.A., Hockaday W.C., Crowley D.: Biochar Effects on Soil Biota – A Review. *Soil Biology and Biochemistry* 2011, **43**: 1812-1836; <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>

21. Rogovska N., Laird D.A., Rathke S.J., Karlen D.L.: Biochar impact on midwestern mollisols and maize nutrient availability. *Geoderma*: Elsevier, 2014, **230–231**: 34-347.
22. Schmidt H.P., Pandit B.H., Martinsen V., Cornelissen G., Conte P., Kammann C., Fourfold increase in pumpkin yield in response to low-dosage root zone application of urine-enhanced biochar to a fertile tropical soil. *Agriculture*: MDPI, 2014, **4(4)**: 598-614.
23. Singh B.P., Cowie A.L., Smernik R.J.: Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46(21)**: 11770-11778.
24. Smith P. et al.: Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 2016, **6**: 42-50.
25. Spokas K.A.: Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 2010, **1(2)**: 289-303.
26. Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S.: Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 2010, **1**, 56.
27. Zimmerman A.R.: Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). *Environmental Science & Technology*, 2010, **44(4)**: 1295-1301.
28. Steiner C., Teixeira W.G., Lehmann J., Nehls T., de Macêdo J.L.V., Blum W.E.H., Zech W.: Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*: Springer, 2007, **291(1–2)**: 275-290.
29. Thies J.E., Rillig M.C., Graber E.R.: Biochar effects on the abundance, activity and diversity of the soil biota. *Soil Biology and Biochemistry*: Elsevier, 2015, **75**: 1-18.
30. Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S.: Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*: Nature Publishing Group, 2010, **1**, 56.
31. Wyzińska M., Berbeć A.K.: Impact of biochar dose and origin on winter wheat grain quality and quantity. *Agriculture*, 2024, **14(1)**, 39; <https://doi.org/10.3390/agriculture14010039>

Adres do korespondencji:

dr inż. Marta Wyzińska
dr hab. Jerzy Grabiński, prof. IUNG-PIB
Zakład Uprawy Roślin i Jakości Plonu
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel.: 81 47 86 814; 811
e-mail: mwyzińska@iung.pulawy.pl
jurek@iung.pulawy.pl

AUTOR	ORCID
Marta Wyzińska	0000-0002-2763-7955
Jerzy Grabiński	0000-0003-0427-9398