

Zastosowanie w sektorze przemysłowym biokarbonizatu otrzymanego metodami przetwarzania biomasy

Application in the industrial sector of biocarbonate obtained by biomass
processing methods

Karolina Murawska*, Julia Fastyn, Adam Drożdżyński

Studenckie Koło Naukowe BioMass, Wydział Biotechnologii i Nauk o Żywności, Politechnika
Łódzka

Abstrakt

Biokarbonizat, inaczej biowęgiel, jest to przetworzona biomasa otrzymana w procesach pirolizy, gazyfikacji lub pirolizy hydrotermalnej. Produkt ten jest zdecydowanie bardziej kaloryczny, łatwiejszy do transportu i magazynowania w porównaniu z wyjściową, surową biomasą. Biokarbonizat ma zastosowanie w przemyśle energetycznym, metalurgicznym, a także w bioremediacji gleby zanieczyszczonej. Aktywny biowęgiel może wykorzystywany być do usuwania niektórych związków z produktów wymagających wysokiej czystości (np. w sektorze farmaceutycznym). Ciekawym pomysłem na jego zastosowanie jest wytwarzanie, z jego udziałem, mikrobiologicznych ogniw paliwowych. Niniejszy artykuł przedstawia przegląd zastosowań przemysłowych biokarbonizatu, do którego produkcji wykorzystuje się szeroko pojętą biomasę.

Abstract

Biocarbonate, or biochar, is a processed biomass obtained in the processes of pyrolysis, gasification or hydrothermal pyrolysis. This product is definitely more caloric, easier to transport and store compared to the original raw biomass. Biocarbonate is used in the energy and metallurgical industries and in the bioremediation of contaminated soil. Active biochar can be used to remove some compounds from products that require high purity (e.g. in the pharmaceutical sector). An interesting idea for its use is the production of microbiological fuel cells with its participation. This article presents an overview of the industrial applications of a biocarbonate, which is a product of different types of biomass.

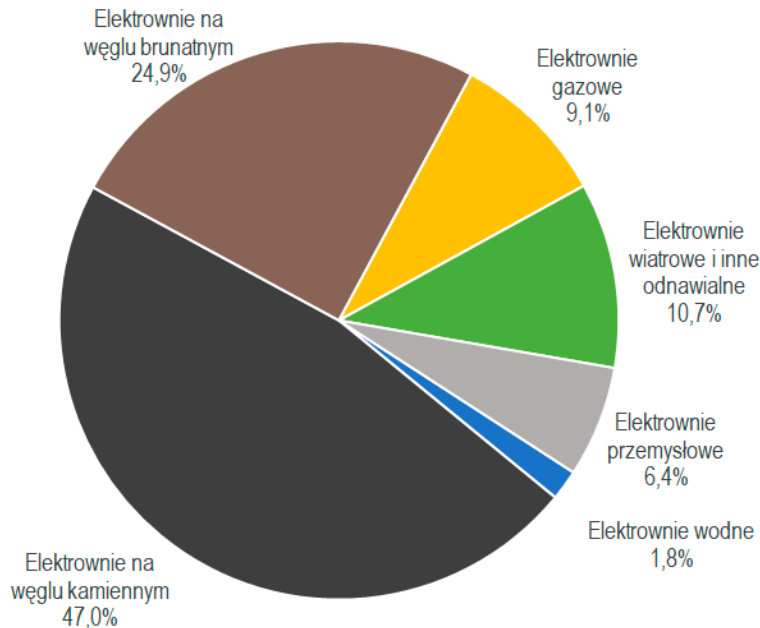
Słowa kluczowe: biowęgiel, biokarbonizat, biomasa, obróbka termiczna

Keywords: biochar, biocarbonysis, biomass, thermal treatment

* autor korespondencyjny: Karolina Murawska: adres e-mail: karolinamurawska08@gmail.com

1. Wstęp

Funkcjonowanie współczesnego świata w dużej mierze oparte jest na wykorzystaniu energii elektrycznej, której zużycie z roku na rok wzrasta. Głównym procesem wykorzystywanym do produkcji energii elektrycznej jest spalanie paliwa w kotłach energetycznych. W Polsce dominującym materiałem opalowym służącym do produkcji energii elektrycznej jest węgiel kamienny i brunatny (Rys.1). W chwili obecnej elektrownie węglowe odpowiadają za produkcję ok. 70% energii elektrycznej [1].



Rys.1. Struktura produkcji energii elektrycznej według nośników w Polsce, w 2020 r. na podstawie danych Polskich Sieci Energetycznych [1].

Jednakże złoża węgla brunatnego, czy też węgla kamiennego, tak chętnie wykorzystywane w celach energetycznych wyczerpują się. Dodatkowo, emisja CO₂ wytwarzanego w wyniku spalania ww. paliw wymaga redukcji ze względu na

zjawisko globalnego ocieplenia i związane z nimi niekorzystne zmiany klimatu. Wszystko to zmusza nas do poszukiwania nowych, odnawialnych źródeł energii [1,2,3]. Według dyrektywy 2009/28/WE państwa członkowskie Unii Europejskiej muszą zapewnić określony udział energii ze źródeł odnawialnych (OZE) w końcowym zużyciu energii brutto. Udział ten oblicza się jako wartość końcowego zużycia energii brutto ze źródeł odnawialnych podzieloną przez wartość końcowego zużycia energii brutto ze wszystkich źródeł i wyraża się w procentach. Przykładowo, w Polsce, docelowy udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto na rok 2020 wynosił 15%. W maju 2021 roku udział OZE w produkcji energii w Polsce wyniósł 20,6% [4].

Jednym z odnawialnych źródeł energii, konsekwentnie zwiększających swój udział w produkcji energii jest biomasa. Według Ustawy z dnia 15 lutego 2015 roku o odnawialnych źródłach energii (z późniejszymi zmianami) biomasą nazywa się *“ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, w tym substancje roślinne i zwierzęce, leśnictwa i związanych działów przemysłu, w tym rybołówstwa i akwakultury, przetworzoną biomasę, w szczególności w postaci brykietu, peletu, toryfikatu i biowęgla, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych lub komunalnych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów oraz odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych, zgodnie z przepisami o odpadach w zakresie kwalifikowania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów;”*. Definicja w świetle ustawy obejmuje szeroki zakres substancji roślinnych i zwierzęcych pochodzących z sektora rolniczego, jak i przemysłowego oraz przetworzoną biomasę, w szczególności w postaci brykietu, peletu, toryfikatu i biowęgla [5, 6]. Celem artykułu jest przybliżenie możliwości wykorzystania

biokarbonizatu w przemyśle, jak również ukazanie zalet, wynikających z przemysłowych aplikacji biowęgla.

2. Właściwości biowęgla

Spalanie lub współspalanie biomasy jest najmniej opłacalnym sposobem zamiany energii chemicznej w energię użytkową. Przetworzenie biomasy m. in. w biowęgiel sprawia, że transport, magazynowanie, a przede wszystkim dalsze przetwarzanie, w tym spalanie, staje się ekonomicznie i ekologicznie bardziej opłacalne niż surowej biomasy, która jest małokaloryczna. Energia zmagazynowana w tak przetworzonych paliwach charakteryzuje się większą gęstością [7]. Poddawanie biomasy procesowi karbonizacji pozwala na uzyskanie paliwa o lepszych właściwościach spalania, dzięki usuwaniu substancji lotnych. Warto dodać, że biowęgiel jest paliwem czystym ekologicznie, ponieważ charakteryzuje się niską zawartością popiołu (< 9%), siarki, chloru (< 0,09%) oraz rtęci (<0,01%). Zawiera natomiast o około 20% więcej węgla pierwiastkowego niż węgiel kamienny (szacuje się, że zawartość ta wynosi ponad 70%). Wartość opałowa biowęgla przekracza 24 MJ/kg, a ilość CO₂ emitowana do atmosfery podczas jego spalania jest równa ilości CO₂ pobieranego przez rośliny z powietrza [8]. Można stwierdzić, że jest *quasi* neutralny w odniesieniu do emisji CO₂. Ze względu na bardziej przyjazny środowisku proces spalania biokarbonizatu w porównaniu do spalania węgla kopalnego możliwe jest jego zastosowanie w instalacjach elektrowni węglowych bez konieczności ich modernizowania [9].

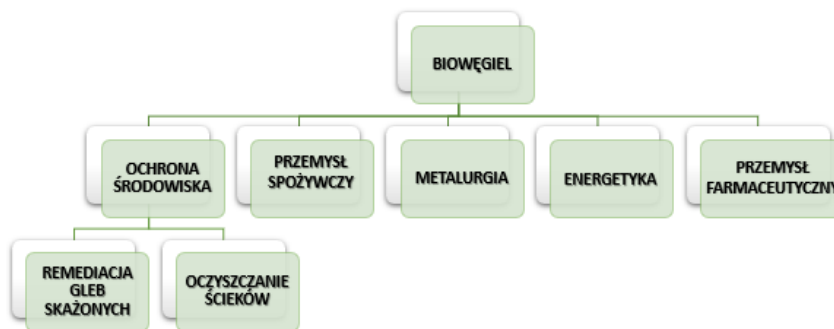
3. Metody otrzymywania biowęgla

Dotychczasowo zastosowanie znajdują trzy główne metody produkcji biowęgla: piroliza, gazyfikacja i piroliza hydrotermalna. Proces wytwarzania biokarbonizatu, w zależności od metody, trwa od kilku sekund do 12 godzin. Biorąc pod uwagę

udział węgla stałego w produkcji pirolizy, karbonizacja hydrotermalna jest najbardziej efektywna. Różnicą pomiędzy metodami wytwarzania jest także odczyn otrzymanego produktu. Biowęgiel produkowany metodą pirolizy hydrotermalnej ma odczyn kwaśny, a w przypadku pozostałych metod produkt ma odczyn zasadowy [10]. pH otrzymywanego biowęgla ma znaczenie m.in. w przypadku zastosowania go jako produktu wspomagającego gleby [10]. Biowęgiel o właściwościach alkalicznych może być szczególnie atrakcyjny w związku z zastosowaniem go jako środka podwyższającego pH gleb kwaśnych. Im większa zasadowość biowęgla, tym większa redukcja kwasowości, dlatego biowęgiel o odczynie zasadowym może być potencjalnie zastosowany jako środek do wapnowania gleb [11]. Znany jest też proces toryfikacji, inaczej łagodnej pirolizy, która zachodzi w temperaturach 200-300°C, bez obecności powietrza, w warunkach ciśnienia atmosferycznego. W przypadku toryfikacji głównym produktem jest stały biokarbonizat o większej, względem substratu, zawartości węgla i mniejszej wilgoci [10]. Istnieje wiele materiałów wyjściowych do produkcji biokarbonizatu, takich jak rośliny energetyczne (np. miskant, wierzba energetyczna), biomasa odpadowa z gospodarki leśnej i rolniczej (np. zrębki, łuski, wytloki). Termochemiczne metody przetwarzania biomasy mogą również być sposobem na unieszkodliwienie osadów ściekowych i organicznej frakcji odpadów komunalnych [10]. Istnieją badania nad wytwarzaniem biokarbonizatu z biomasy alg i roślin zielnych. Wybór metody wytwarzania biowęgla determinuje jego końcowe właściwości oraz przemysłowe zastosowanie. Utworzony biokarbonizat charakteryzuje się określonymi parametrami np. porowatością, ciepłem spalania [12].

4. Przemysłowe zastosowanie biowęgla

Biokarbonizat jest powszechnie wykorzystywany nie tylko w przemyśle energetycznym, ale także metalurgicznym. Jednakże stosuje się go też w procesach remediacji gleby lub też jako adsorbent [13]. Przemysłowe sposoby wykorzystania biowęgla przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Możliwości wykorzystania biowęgla w przemyśle [źródło: opracowanie własne].

Przemysł metalurgiczny jest sektorem, w którym przetworzona biomasa znajdzie zastosowanie ze względu na zmniejszenie zużycia koksu, eliminację wilgoci oraz redukcję emisji związków siarki i CO₂. Innymi zaletami wykorzystania biowęgla w wielkich piecach hutniczych są m.in. wzrost wydajności wielkiego pieca, poprawa przepuszczalności gazów oraz zmniejszenie ilości stosowanej do produkcji rudy żelaza [9]. Co więcej, badania przeprowadzone przez Sładaczek i Głodek-Bucyk sugerują, że biowęgiel wytworzony z osadów ściekowych ma kaloryczność ok. 17 MJ/kg, więc może być stosowany do współspalania w przemyśle cementowym i energetyce [14]. Wykazano również, że podczas spalania biokarbonizatu wytworzonego z osadów ściekowych w procesie

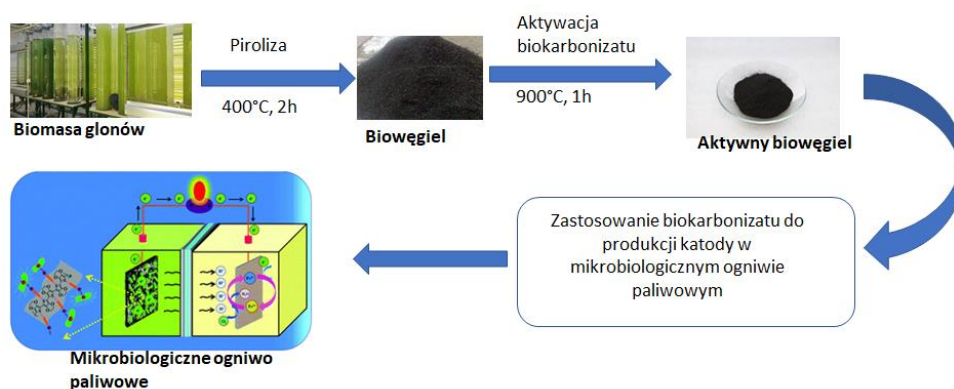
pirolizy generuje się mniejsza ilość dymu i lotnego popiołu w porównaniu do spalania osadów ściekowych nie poddanych temu procesowi. Ponadto osady ściekowe poddane pirolizie odznaczają się niższą zawartością azotu i siarki oraz korzystniejszym stosunkiem wodoru do tlenu i tlenu do węgla, co w konsekwencji przekłada się na korzystniejsze względy środowiskowe wykorzystania, wytworzonego w ten sposób paliwa, w sektorze energetycznym [15].

Z uwagi na to, że biokarbonizat jest bardzo dobrym absorbentem jest on stosowany do remediacji zanieczyszczonej gleby. Co więcej, zastosowanie biowęgla może poprawić jakość takiej gleby. Niektóre źródła podają, że możliwe jest zmniejszenie emisji podtlenku azotu i metanu z gleby, dzięki nawiezieniu jej właśnie biokarbonizatem. Ma to szczególne znaczenie w obrębie wielkich zakładów produkcyjnych. Biokarbonizaty, które są sorbentami skutecznie neutralizują szkodliwy wpływ pozostałości farmaceutyków, antybiotyków ze ścieków, a także metali ciężkich w ściekach zarówno przemysłowych, jak i komunalnych. Biowęgiel jest skuteczny w eliminowaniu ze środowiska takich związków jak: acetaminofen, kofeina, atrazyna, diklofenak, glifosat, naproksen, ibuprofen czy sulfametazyna. Może to być alternatywna metoda unieszkodliwiania toksycznych substancji ze ścieków [10].

Aktywacja biokarbonizatu zwiększa jego możliwości aplikacyjne. Proces aktywacji może być przeprowadzony metodami fizycznymi lub chemicznymi, które powodują m. in. zmianę porowatości biowęgla (pola powierzchni, objętości i struktury porów), ale także właściwości chemicznych jego powierzchni (powierzchniowe grupy funkcyjne, hydrofobowość). W wyniku aktywacji następuje zwiększenie powierzchni właściwej, porowatości, stabilności fizykochemicznej oraz reaktywności powierzchni, co sprawia, że tak przygotowany biowęgiel znajduje szerokie zastosowanie. Aktywny biokarbonizat może zostać wykorzystany w sektorze farmaceutycznym, a także spożywczym jako dodatek lub

też jako nowy produkt [16]. W sektorze farmaceutycznym biowęgiel można zastosować jako nośnik leków, jak również jako antidotum na zatrucia toksycznymi związkami. Poza tym biowęgiel można wykorzystać również jako znacznik w bioobrazowaniu, które ma na celu nieinwazyjne wykrycie uszkodzonych komórek czy toksyn w organizmie [17]. W przemyśle spożywczym wykorzystanie aktywnego biokarbonizatu jako dodatku do żywności opierać się może o zastosowanie go jako barwnika. Z kolei w opakownictwie żywności aktywny biowęgiel wchłania wilgoć, co zmniejsza ryzyko pleśni. Dzięki temu można przedłużyć ważność wielu produktów spożywczych, poprzez dodanie biokarbonizatu do materiału opakowaniowego [18]. Prowadzi się również prace polegające na zastosowaniu biokarbonizatu w zmniejszaniu odpadów, które pochodzą z przemysłu spożywczego. Aktywny biowęgiel można zastosować w przetwarzaniu odpadów cukierniczych, takich jak miazga owocowa, cukry, kwasy organiczne, które potencjalnie mogłyby być ponownie użyte, co minimalizowałoby ilość odpadów z tego sektora przemysłu [10].

Interesującym pomysłem jest zastosowanie biokarbonizatu do produkcji mikrobiologicznych ogniw paliwowych (Rys. 3).



Rys. 3. Schemat wykorzystania biokarbonizatu do produkcji mikrobiologicznych ogniw paliwowych na podstawie, źródło: [21, 22, 23, 24].

Zasada działania tych ogniw paliwowych opiera się na pracy mikroorganizmów, które po utlenieniu substratu do dwutlenku węgla, z jednoczesnym uwolnieniem protonów i elektronów, mogą transportować wspomniane cząstki elementarne na zewnątrz komórki. W wyniku tego procesu energia chemiczna jest przekształcana w energię elektryczną. Wysoka przewodność elektryczna biokarbonizatu może ułatwiać transfer ładunków w anodzie, co ogólnie przynosi się na efektywność działania ogniwa. Jednak najważniejszą kwestią jest koszt produkcji takiego ogniwa, który, jak do tej pory, jest wysoki. Zastosowanie biokarbonizatu, w szczególności pochodzącego z biomasy odpadowej, mogłoby potencjalnie obniżyć cenę mikrobiologicznych ogniw paliwowych [19]. Do tej pory ogniwa paliwowe tego typu stosowane były głównie do utylizacji ścieków przemysłowych, ale mogą być też użyteczne w przypadku odsalania wody morskiej, bioremediacji gleb, czy też produkcji wodoru. Dodatkowo możliwe jest ich wykorzystanie jako biosensorów lub użycie ich w małych przenośnych urządzeniach elektrycznych [20].

Biokarbonizat wykazuje wysoką zdolność interakcji grup funkcyjnych, głównie grup karboksylowych, z enzymami i innymi biomolekułami. Dzięki możliwości interakcji z różnymi grupami funkcyjnymi opracowano technologie nowoczesnych biosensorów i czujników stosowanych np. do wykrywania nukleoprotein hantawirusa. Dzięki temu stosować można czujniki oparte o biokarbonizat do wykrywania jonów metali ciężkich takich jak ołów czy kadm, związków nieorganicznych i organicznych. Ciekawym biosensorem na bazie biowęgla jest czujnik do wykrywania glukozy w ludzkiej ślinie i krwi, który sklasyfikowano jako przyjazną środowisku procedurę analityczną [25].

Biowęgiel, powstający w procesie pirolizy, traktowany jest jako produkt uboczny przeznaczony do utylizacji. Znając jego potencjalne zastosowanie, zamiast go utylizować, można byłoby produkować „zieloną” energię, wzbogacić glebę w

składniki odżywcze i nie tylko. Takie podejście wpisuje się w model zrównoważonej gospodarki odpadami i pozwala działać odpowiedzialnie na rzecz środowiska.

5. Podsumowanie

Sytuacja energetyczna kraju narzuca konieczność poszukiwania nowych źródeł energii odnawialnej. Polska, z wyjątkiem węgla kamiennego i brunatnego, nie ma alternatywnych zasobów surowców energetycznych, dlatego też kraj musi mierzyć się z koniecznością importowania ropy naftowej i jej produktów, a także gazu ziemnego. Biomasa może stać się jednym z ważniejszych źródeł odnawialnej energii w Polsce, czemu sprzyjają uwarunkowania rolnicze i środowiskowe. Biowęgiel stanowi zrównoważony i przyjazny środowisku materiał, który dodatkowo może być wykorzystany jako surowiec odnawialny w różnych sektorach. Ze względu na właściwości fizykochemiczne biokarbonizatu można upatrywać w nim potencjalne paliwo do celów energetycznych. W Polsce istnieją już firmy, które produkują biokarbonizat na skalę przemysłową. Przykładem może być firma TIMEX SA, której celem jest zaopatrywanie sektora energetycznego w karbonizat, pochodzący z osadów ściekowych [26]. Produkcja biowęgla może stanowić rozwiązanie obecnych problemów środowiskowych, zwłaszcza w procesach eliminowania zanieczyszczeń gleby, wody i powietrza. Dzięki temu możliwe stanie się ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Należy spodziewać się, że zapotrzebowanie na biowęgiel będzie rosło w związku z przyjętymi zobowiązaniami dotyczącymi ograniczeń w emisji gazów cieplarnianych, a także z koniecznością zagospodarowania biomasy odpadowej. Biowęgiel jest bardzo obiecującym materiałem, który może znacząco przyczynić się do łagodzenia zmian klimatycznych. Istnieje potrzeba przeprowadzenia ukierunkowanych badań w zakresie przemysłowego wykorzystywania biokarbonizatu [27].

Literatura

- [1] <https://www.rynekelektryczny.pl/produkcja-energii-elektrycznej-w-polsce/> __dostęp 05.11.2021
- [2] Kiang Y.-H.: *Fuel Property Estimation and Combustion Process Characterization: Conventional Fuels, Biomass, Biocarbon, Waste Fuels, Refuse Derived Fuel, and Other Alternative Fuels*, Academic Press, 2018.
- [3] Dębowski M., Pawlak-Kruczek H., Czerep M., Brzdękiewicz A., Słomczyński Z.: *Technologie produkcji biowęgla—zalety i wady*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych **9(26)**, 2016, str. 26-39.
- [4] <https://globenergia.pl/produkcja-energii-elektrycznej-w-maju-21-proc-energii-pochodzilo-z-oze/> dostęp 05.11.2021 r.
- [5] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2015 poz. 478)
- [6] Ustawa z dnia 7 czerwca 2018 r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2018 poz. 1276)
- [7] Lewandowski W. M., Radziemska E., Ryms M., Ostrowski P.: *Nowoczesne metody termochemicznej konwersji biomasy w paliwa gazowe, ciekłe i stałe*, Proceedings of ECOpole **4(2)**, 2010, str. 453-547.
- [8] <https://ekopolityka.pl/biowegiel-na-wspolczesne-problemy-ochrony-srodowiska/> dostęp 05.11.2021
- [9] Bartocci P., Wang L., Skreiberg Ø., Liberti F., Bidini G., Fantozzi F.: *Biocarbon Production and Use as a Fuel*. In *Production of Materials from Sustainable Biomass Resources*, Springer, Singapore, 2019.
- [10] Saletnik B., Zagała G., Bajcar M., Tarapatsky M., Bobula G., Puchalski C.: *Biochar as a multifunctional component of the environment—a review*, Applied Sciences **9(6)**, 2019, str. 1139.
- [11] Brewer CE, Schmidt-Rohr K, Satrio JA, Brown RC (2009) Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. *Environ Prog Sustain Energy* **28(3)**:386–396
- [12] Mokrzycki J.: *Biowęgle wytwarzane metodami termochemicznej konwersji biomasy do zastosowań sorpcyjnych, energetycznych i nawozowych*, Wrocław, 2020.
- [13] Olszewski M., Kempegowda R. S., Skreiberg Ø., Wang L., Løvås T.: *Techno-Economics of Biocarbon Production Processes under Norwegian Conditions*, Energy & Fuels **31(12)**, 2017, str. 14338-14356.
- [14] Śląddeczek F., Głodek-Bucyk E.: *Badania wykorzystania niskotemperaturowej pirolizy do przetwarzania biomasy odpadowej na biowęgiel w instalacji testowej*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych **10(28)**, 2017, str. 50-61.

- [15] Renjie Chen, Qian Sheng, Xiaohu Dai, Bin Dong, Upgrading of sewage sludge by low temperature pyrolysis: Biochar fuel properties and combustion behavior, *Fuel* **300**, 2021, 121007, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121007>
- [16] Tan X. F., Liu S. B., Liu Y. G., Gu Y. L., Zeng G. M., Hu X. J., Jiang L. H.: *Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: Multiple applications in environmental protection and energy storage*, *Bioresource technology* **227**, 2017, str. 359-372.
- [17] N. S., Dalai, A.K., Berruti, F. *et al.* Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. *Waste Biomass Valor* **7**, 201–235 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z>
- [18] Kufka D., Biowęgiel - innowacyjny produkt recyklingu odpadów organicznych, *Zagadnienia aktualnie poruszane przez młodych naukowców* **2(1)**, 340, 2015
- [19] Chakraborty I., Sathe S. M., Dubey B. K., Ghangrekar M. M.: *Waste-derived biochar: applications and future perspective in microbial fuel cells*, *Bioresource Technology* **312**, 2020, str. 123587.
- [20] Markowska K., Grudniak A. M., Wolska K. I.: *Mikrobiologiczne ogniwa paliwowe: podstawy technologii, jej ograniczenia i potencjalne zastosowania*, *Postępy Mikrobiologii* **52(1)**, 2013, str. 29-40.
- [22] <https://www.kierunekspozywczy.pl/artykul,51794,hodowane-na-sciekach-wykorzystanie-sciekow-mleczarskich-w-produkcji-biomasy-mikroglonow-olejowych-na-cele-biopaliwowe.html?fbclid=IwAR0rjIC0QREXOTFG6Yvai7b7wOmPxjFzbcS6OUsqlNzHkTrKwoG3ZCvq6Y>_dostęp 06.11.2021
- [23] https://sozosfera.pl/srodowisko-i-gospodarka/biowegiel-co-to-jest/?fbclid=IwAR1y15LlimevkKZAxDHqSS2GfMVfS7NHtx5waIjnUQ9IwRQcSOLs2iyO_0w_dostęp 05.11.2021
- [24] Manyuchi M. M., Guvava G. N., Ikhu-Omoregbe D. I., Oyekola O.: *Treatment of piggery wastewater using an acti-zyme (Bio-catalyst) and papermill biochar compound co-capturing biogas*, 2016.
- [25] Senthilkumar N., Pannipara M., Al-Sehemi A. G.: *PEDOT/NiFe₂O₄ nanocomposites on biochar as a free-standing anode for high-performance and durable microbial fuel cells*, *New Journal of Chemistry* **43(20)**, 2019, str. 7743-7750.
- [26] Kalinke C., de Oliveira P. R., Bonacin J. A., Janegitz B. C., Mangrich A., Júnior L. H. M., Bergamini M. F.: *State-of-art and perspectives in the use of biochar for electrochemical and electroanalytical applications*, *Green Chemistry* **23**, 2021, str. 5272-5301.

- [27] <https://magazynbiomasa.pl/biowegiel-polsce-technologie-juz-sa-trzeba-budowac-rynek-odbiorcow/> dostęp 05.11.2021
- [28] Oliveira F. R., Patel A. K., Jaisi D. P., Adhikari S., Lu H., Khanal S. K.: *Environmental application of biochar: Current status and perspectives*, *Bioresource technology* **246**, 2017, str. 110-122.