

Processing of hydrated biomass by hydrothermal carbonization

Przetwarzanie uwodnionej biomasy metodą karbonizacji hydrotermalnej



DOI: 10.15199/62.2025.5.6

The hydrothermal carbonization (HTC) method was presented that transforms hydrated biomass into high-qual. biochar pellets, chem. stable and storable. The method involves the physicochem. conversion of C org. compds. contained in hydrated biomass, under anaerobic conditions and with water as the reaction medium. The HCT method is a waste-free, low-energy technol. with low process costs. It allows for increasing the degree of recycling of bio-waste and reducing greenhouse gas emissions. The possibilities of using the HTC method to manage biomass waste in Poland were also presented.

Keywords: hydrothermal carbonization, biomass, biochar

Przedstawiono metodę hydrotermalnej karbonizacji (HTC) przekształcającą uwodnioną biomasę w wysokiej jakości pellety biowęgla, chemicznie stabilne i składowalne. Metoda ta polega na fizykochemicznej konwersji związków organicznych węgla zawartych w uwodnionej biomase, w warunkach beztlenowych i w wodzie jako środowisku reakcji. Metoda HCT jest technologią bezodpadową, mało energochłonną, charakteryzującą się niskimi kosztami procesowymi. Pozwala na zwiększenie stopnia recyklingu bioodpadów i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Przedstawiono także możliwości wykorzystania metody HTC do zagospodarowania odpadów biomasy w Polsce.

Słowa kluczowe: karbonizacja hydrotermalna, biomasa, biowęgiel

Biomasa w szerszym pojęciu to cała istniejąca na Ziemi materia organiczna, do której zalicza się m.in. surowce pochodzenia roślinnego i zwierzęcego ulegające biodegradacji. Światowe zasoby biomasy ocenia się na ~280 bln t ($44 \cdot 10^{10}$ EJ), z czego wykorzystuje się ok. 16%. Wskaźnik ten jest większy w przypadku krajów rozwijających się (ok. 38% ogólnej produkcji energii)¹⁻³. W strukturze energetycznego wykorzystania biomasy w UE dominuje wykorzystywanie bioenergii do produkcji ciepła procesowego dla przemysłu oraz ciepła niskotemperaturowego (92%). W Polsce w przypadku elektrowni zasilanych biomasą moc zainstalowana to 906,7 MW, więc udział biomasy w strukturze mocy odnawialnych źródeł energii (OZE) wynosił jedynie 7% w 2020 r.³. Biomasa wykazuje największy potencjał rozwojowy w średnim i długim horyzoncie cza-

sowym. Największym atutem biomasy jako odnawialnego źródła energii jest jej dostępność, ponieważ różnego rodzaju materia organiczna znajduje się w każdym miejscu globu. Biomasa, w odróżnieniu od paliw kopalnych, jest uważana za paliwo neutralne pod względem emisji CO₂, ponieważ węgiel zawarty w biomase krąży między atmosferą a biosferą w stosunkowo krótkim czasie, nie przyczyniając się do długoterminowego wzrostu stężeń CO₂ w atmosferze. Zastąpienie paliw kopalnych biomasą może przynieść znaczne korzyści dla środowiska. Szacuje się, że wykorzystanie biomasy może zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych GHG (*greenhouse gases*) nawet o 80–90% w porównaniu ze spalaniem węgla lub oleju^{2, 4}.

Karbonizacja hydrotermalna HTC (*hydrothermal carbonization*) jest metodą fizykochemicznej konwersji związków



Prof. dr hab. inż. Zygmunt KOWALSKI (ORCID: 0000-0003-2884-710X) w roku 1969 ukończył studia na Wydziale Matematyki, Fizyki i Chemii Uniwersytetu Jagiellońskiego. W 1978 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych na Wydziale Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, a w 1992 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej. W 2001 r. uzyskał tytuł profesora nauk technicznych na Politechnice Wrocławskiej. Od 2004 r. do 2016 r. był profesorem zwyczajnym Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, w latach 2008–2016 dziekanem Wydziału Inżynierii i Technologii Chemicznej tej uczelni. Obecnie pracuje w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie. Specjalność – technologia związków nieorganicznych i inżynieria środowiska.



Prof. dr hab. inż. Agnieszka MAKARA (ORCID: 0000-0001-7468-0270) w roku 2007 ukończyła studia na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej. W 2012 r. uzyskała stopień doktora na tym samym wydziale, a w 2018 r. stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie technologia chemiczna w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. W 2024 r. otrzymała tytuł profesora. Jest profesorem w Katedrze Technologii Chemicznej i Analityki Środowiskowej na Wydziale Inżynierii i Technologii Chemicznej Politechniki Krakowskiej. Specjalność – technologia chemiczna nieorganiczna, biotechnologia środowiska i inżynieria środowiska.

* Adres do korespondencji:

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, ul. Wybickiego 7A,
31-261 Kraków, tel.: (12) 617-16-33, e-mail: zkow@meeri.pl

organicznych węgla zawartych w uwodnionej biomase, w warunkach beztlenowych, w wodzie jako środowisku reakcji. Metoda karbonizacji hydrotermalnej pozwala na przerób wszystkich rodzajów biomasy. W procesie HTC odzyskiwany jest węgiel i bionawozy z wszelkiego rodzaju odpadów organicznych⁵⁻⁷).

Technologia HTC naśladuje proces powstawania węgla z biomasy, który występuje w naturze i trwa 50 tys. do

50 mln lat. Proces HTC jest przykładem ekologii przemysłowej opartej na analogiach z naturalnymi systemami ekologicznymi, które w naturze działają w odpowiednich sieciach powiązań, tworząc systemy interaktywne. Celem ekologii przemysłowej jest zmniejszanie ilości odpadów wytwarzanych przez duże systemy i całkowita restrukturyzacja tych systemów⁸⁻¹⁰).

Proces karbonizacji hydrotermalnej został po raz pierwszy zbadany przez Bergiusa w 1913 r.¹¹). Idea procesu przemysłowego HTC pozostaje taka sama, jak występująca w przyrodzie, ale parametry procesu HTC (temp. 180–220°C i ciśnienie 20–25 bar) są zintensyfikowane w celu skrócenia czasu reakcji, który może wahać się w zakresie 1–72 h, w zależności od rodzaju stosowanej biomasy. Temperatura, ciśnienie i czas reakcji są istotnymi czynnikami wpływającymi na przebieg procesu, natomiast rodzaj użytej biomasy wpływa na jakość otrzymywanych produktów. Podstawowym produktem karbonizacji hydrotermalnej jest produkt podobny do węgla, zwany hydrowęglem (biowęgłem), natomiast produktami ubocznymi są faza wodna (bogata w składniki nawozowe) i gazowa (niewielkie ilości CO₂)¹²⁻¹⁴).

Zawarta w mokrej biomase woda jest doskonałym rozpuszczalnikiem. Podczas reakcji HTC rozkładane są również toksyczne cząsteczki organiczne i resztkowe mikrozanieczyszczenia. Zawartość węgla wzrasta po karbonizacji, zawartość tlenu i substancji mineralnych jest zmniejszona, niewiele jest produktu gazowego. Reakcja HTC przebiega w środowisku wodnym, stąd surowiec nie wymaga żadnego suszenia. Niepotrzebne są więc energochłonne i kosztowne etapy obróbki wstępnej, stosowane w konwencjonalnych procesach termicznych (takich jak spalanie i piroliza). Metoda HTC umożliwia wykorzystanie surowca o bardzo dużej zawartości wilgoci (> 80%). Wiązania wodorowe wody ulegają osłabieniu po kompresji,

co prowadzi do zmiany stałej dielektrycznej, umożliwiając katalizowanie reakcji przez wodę, która może działać zarówno jako zasada, jak i kwas w temp. 200–280°C, ponieważ stopień jej jonizacji jest zmaksymalizowany. W tych temperaturach stała dielektryczna wody jest zmniejszona, więc działa ona podobnie jak rozpuszczalnik niepolarny. W trakcie karbonizacji hydrotermalnej hemiceluloza i celuloza ulegają hydrolizie do oligomerów i monomerów, podczas gdy lignina w większości pozostaje niezmieniona. Karbonizacja hydrotermalna HTC obejmuje głównie takie procesy, jak dekarboksylacja, odwodnienie i polimeryzacja. Usunięcie grup karboksylowych i hydroksylowych znacznie zmniejsza stosunek O/C i produkt końcowy ma większą gęstość energetyczną¹⁵⁻¹⁸). W metodzie HTC nie stosuje się dodatkowego katalizatora. Również ciśnienie jest raczej umiarkowane, co pozwala utrzymać niski koszt produkcji.

Otrzymane w metodzie HTC hydrowęgle mają dużą zawartość C, gdyż reakcje dehydratacji i dekarboksylacji usuwają wodór i tlen z surowca w postaci odpowiednio wody i ditlenku węgla. Obniżona jest też zawartość azotu i siarki w porównaniu z wejściowym surowcem, gdyż ich związki przechodzą do fazy ciekłej podczas przetwarzania. Mniejsza jest też zawartość popiołu w porównaniu z innymi rodzajami węgla, ponieważ związki nieorganiczne, które tworzą popiół po spaleniu, są ekstrahowane do fazy ciekłej podczas procesu HTC^{6, 15, 18, 19}).

Możliwy jest przerób metodą HTC wszystkich rodzajów biomasy^{8, 20, 21}), w tym osadów ściekowych, odpadów pofermentacyjnych, odpadów zielonych, frakcji organicznej stałych odpadów komunalnych, różnych rodzajów biomasy z produkcji rolno-spożywczej, takich jak obornik, gnojowica, słoma, siano, liście i odcięte gałęzie drzew, trociny, kora, korzenie buraków, zielonki z kukurydzy, wytloki z produkcji soków owocowych i zgniłe owoce.

Karbonizacja hydrotermalna jest metodą bezodpadową, technologia jest mało energochłonna, a koszty procesu niskie. Rozwiązania technologiczne i aparaturowe są niezbyt skomplikowane, a wdrożone instalacje w pełni zautomatyzowane i proste w obsłudze. Na rysunku przedstawiono schemat ideowy przerobu uwodnionej biomasy organicznej metodą HTC^{15, 17}). Pierwszy etap procesu HTC to wprowadzanie biomasy do reaktora. Pompa ciśnieniowa tłokowa dozując zawieszinę biomasa-woda do reaktora przez pod-



Dr Agnieszka NOWACZEK (ORCID: 0000-0002-9920-9511) w roku 2008 ukończyła studia na Wydziale Nauk Humanistycznych Akademii Krakowskiej (kierunek socjologia stosowana), a w 2014 r. na Wydziale Prawa i Administracji tej samej uczelni (kierunek administracja publiczna w obszarze nauk społecznych). W 2022 r. ukończyła studia doktoranckie na Wydziale Zarządzania AGH w Krakowie, a w 2024 r. uzyskała stopień doktora w dyscyplinie nauk o zarządzaniu i jakości na tym samym wydziale. Od 2017 r. jest pracownikiem naukowym w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN w Krakowie. Specjalność – strategie ekoinnowacyjności, gospodarka o obiegu zamkniętym, innowacje w zakresie ochrony środowiska, recyklingu i gospodarki odpadami.



Dr hab. Joanna KULCZYCKA, prof. instytutu (ORCID: 0000-0002-4377-5506), w roku 1988 ukończyła studia na Wydziale Ekonomiki Produkcji w Akademii Ekonomicznej w Krakowie (obecnie Uniwersytet Ekonomiczny). W 1998 r. uzyskała stopień doktora nauk ekonomicznych w dyscyplinie nauki o zarządzaniu na AGH w Krakowie. Pracuje na Wydziale Zarządzania AGH w Krakowie oraz jest kierowniczką Zakładu Gospodarki o Obiegu Zamkniętym w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Jest uczestniczką licznych komisji i rad, w tym UNEP Resource Panel od 2020 r. (współautorka raportu Global Resource Outlook 2024) oraz Państwowej Rady Ochrony Środowiska (2021–2026), organizatorką wielu konferencji i warsztatów w obszarze gospodarki o obiegu zamkniętym i wykorzystania metody oceny cyklu życia do analiz wpływu na środowisko procesów i produktów. Specjalność – GOZ, ekoinnowacje, zarządzanie, gospodarka surowcami mineralnymi i odpadami.

Table 1. Characteristics of biocarbon pellets produced by the hydrothermal carbonization method HTC^{25, 35)}

Tabela 1. Charakterystyka biopelletów węglowych z procesu karbonizacji hydrotermalnej HTC^{25, 35)}

Parametr	Wynik
Wartość opałowa, MJ/kg	> 23
Gęstość nasypowa, kg/m ³	700
Zawartość popiołu, %	4–12
Zawartość wody, %	< 10
C całkowity, %	> 58
C stały, %	25
H, %	5,8–6,4
N, %	0,6–2
S, %	< 0,2
Cl, %	< 0,2
Substancje lotne, %	65
Temperatura topnienia popiołów, °C	> 1200

Table 2. Characteristics of AHL fertilizer solution from hydrothermal carbonization^{25, 35)}

Tabela 2. Charakterystyka roztworu nawozowego AHL z karbonizacji hydrotermalnej^{25, 35)}

Parametr	Wynik
Zawartość wody, %	96,5
Sucha masa w 105°C, %	3,50
Całkowita materia organiczna, %	2,40
Całkowity C organiczny, %	1,39
Ekstrakt humusowy, %	1,49
pH	5,80
C/N	10,6
N całkowity, g/kg	1,307
N amonowy, g/kg	0,277
N azotanowy, g/kg	0,007
P ₂ O ₅ , g/kg	0,043
K ₂ O, g/kg	2,4
CaO, g/kg	1,8
MgO, g/kg	0,827
Na ₂ O, g/kg	1,109
B, mg/kg	3,20
Fe, mg/kg	24,5
Cu, mg/kg	0,070
Mn, mg/kg	2,79
Zn, mg/kg	1,54
Ni, mg/kg	0,26
Pb, mg/kg	0,045
Cd, mg/kg	0,0040
Cr, mg/kg	0,086
Cl, mg/kg	1523

grzewane rurociągi. Proces karbonizacji zawiesiny w reaktorze HTC trwa ok. 5 h, temperatura wewnątrz reaktora to ok. 200°C, a ciśnienie ok. 20 bar. Reaktor ogrzewany jest przeponowo parą technologiczną. W reakcji nie stosuje się żadnego dodatkowego katalizatora, którego rolę odgrywają jedynie powstające w procesie kwasy organiczne. Zawiesina biowęgla przechodzi systemem rurociągów wylotowych, schładzanych przeponowo wodą celem odzysku ciepła. Rozprężona zawiesina jest rozdrabniana i następnie kierowana do systemu separacji w celu usunięcia zanieczyszczeń inertnych. Jeśli brak jest zanieczyszczeń typu piasek, nie ma potrzeby separacji grawitacyjnej w hydroklastyfikatorze, stosowany jest wówczas jedynie spiralny zsyp grawitacyjny. Oddzielenie fazy stałej zawiesiny biowęgla od cieczy (woda procesowa) odbywa się za pomocą prasy filtracyjnej ramowej. Placek filtracyjny ma wilgotność 45–50%. Jest on rozdrabniany i suszony w celu zmniejszenia zawartości wilgoci. Wysuszony biowęgiel poddaje się peletyzacji bez użycia jakiegokolwiek środka wiążącego^{14, 15, 17)}.

Zrównoważony rozwój technologii HTC wykorzystuje innowacje systemowe wprowadzane wraz z uruchomieniem pierwszych zakładów komercyjnych. Hiszpańska firma Ingelia uruchomiła pierwszy zakład przemysłowy w 2010 r. i od tego czasu technologia jest ulepszana, zwłaszcza w zakresie konstrukcji reaktora HTC i systemów sterowania procesem oraz odzysku ciepła^{15, 17, 22)}. Powstały biowęgiel jest uważany za zeroemisyjny w bilansie energetycznym i nie będzie podlegał opłatom emisyjnym ETS. Jeśli zielona energia elektryczna jest wykorzystywana do eksploatacji instalacji HTC, a ciepło technologiczne jest wytwarzane z biomasy lub biowęgla, proces ten będzie zeroemisyjny w zakresie emisji GHG w bilansie energetycznym^{22–24)}. Silne strony technologii HTC Ingelia wynikają z faktu, że proces jest ciągły i modułowy, łatwo skalowalny, a jego wydajność jest wysoka. Stosowane reaktory pionowe (z odwróconym przepływem inertnym) nie zawierają wewnątrz ruchomych części lub wymienników ciepła, co wpływa na niskie koszty inwestycyjne i operacyjne. System kontroli temperatury i ciśnienia zapewnia stabilne warunki wewnątrz obszaru reakcyjnego HTC przez cały czas trwania tego procesu w reaktorze. Odzyskiwanie nadmiaru ciepła z rurociągów wyjściowych reaktora w celu wstępnego podgrzania surowca wejściowego (biomasa i woda procesowa) zmniejsza zużycie energii w procesie. Urządzenia do obróbki końcowej, wzorowane na stosowanych w przemyśle węglowym (płukanie węgla), pozwalają na odseparowanie zanieczyszczeń i zmniejszenie zawartości popiołów w produkcie^{13, 15, 23)}.

Modułowe instalacje HTC Ingelia umożliwiają uzyskanie odpowiedniej zdolności produkcyjnej poprzez budowę odpowiedniej ich liczby. Minimalna wydajność instalacji jest określona przez wydajność jednego reaktora, która wynosi ok. 1,2 t/h (biomasa o wilgotności 80%), czyli 10 600 t/r (czas pracy 8000 h/r). W razie potrzeby można dostosować projekt instalacji HTC do istniejących syste-

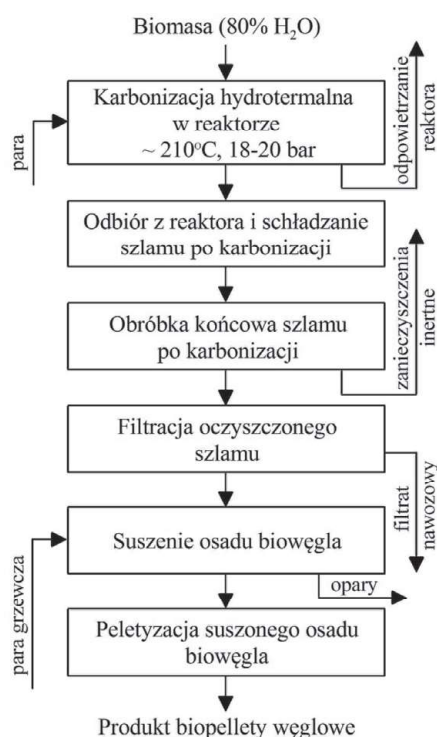


Figure. Flow-sheet of the processing of hydrated biomass using the HTC hydrothermal carbonization method

Rysunek. Schemat ideowy instalacji do przerobu uwodnionej biomasy metodą karbonizacji hydrotermalnej HTC

mów produkcyjnych. Instalacje są w pełni zautomatyzowane i mogą być monitorowane i obsługiwane za pomocą zdalnego systemu^{15, 17}. Ostatni etap procesu HTC obejmuje oddzielanie od zawiesiny poreakcyjnej hydrowęgla zanieczyszczeń, takich jak szkło, piasek, kamienie i metale, metodami separacji grawitacyjnej. Oddzielone zanieczyszczenia mineralne z przetworzonej zawiesiny biomasy mogą zostać wykorzystane jako surowce np. w drogownictwie.

Proces HTC jest zgodny z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym polegającą na recyklingu i wtórnym wykorzystaniu węgla zawartego w bioodpadach, który można wykorzystać jako paliwo stałe, zgodnie z odpowiednimi normami^{25–28}. Pellety biowęgla wytwarzane w procesie HTC z uwodnionej biomasy to stałe biopaliwo, mające większą gęstość energetyczną (> 35 GJ/t s.m.), dużą zawartość węgla (> 58% C) i mniejszą zawartość popiołu (4–12%) niż inne rodzaje węgla^{13, 21, 22}.

W procesie HTC powstają dwa produkty: pellety biowęgla^{29–31} i roztwór zawierający makroskładniki nawozowe (N, P, K, Mg, Ca, S) oraz mikroelementy wyekstrahowane z biomasy³². Substancje biogenne (N, P, K) zawarte we frakcji płynnej mogą być poddane recyklingowi³³.

Roztwór nawozowy AHL pochodzi z wody zawartej w biomacie. Zawiera rozpuszczalne składniki biomasy, które działają jak bionawozy i zmniejszają zapotrzebowanie na nawozy mineralne. Skoncentrowanie składników odżywczych metodami mikrofiltracji i osmozy pozwala na odzyskanie NPK i skierowanie ich na rynek nawozowy. Dodatkowym

Table 3. Effects of processing hydrated biomass waste in Poland using the HTC method (variants of 10, 50 and 100 million t/y of hydrated biomass, respectively)^{25, 35}

Tabela 3. Efekty przetworzenia w Polsce odpadów uwodnionej biomasy metodą HTC (warianty przerobu odpowiednio 10, 50 i 100 mln t/r uwodnionej biomasy)^{25, 35}

Ilość uwodnionej odpadowej biomasy (30% s.m.*), mln t/r	10,0	50,0	100,0
Zdolność produkcyjna biowęgla, mln t/r	3,3	16,5	33
Cena produktu, zł/t wariant I wariant II	1250 2000	1250 2000	1250 2000
Wartość produkcji, mld zł/r wariant I (cena 1250 zł/t biopelletu) wariant II (cena 2000 zł/t biopelletu)	4,125 6,6	20,625 33,0	41,25 66,0
Szacowane koszty operacyjne, mld zł/r	1,5	7,5	15,0
Zysk brutto, mld zł/r wariant I (cena 1250 zł/t) wariant II (cena 2000 zł/t)	3,625 5,1	18,125 25,5	36,25 51,0
Szacunek nakładów inwestycyjnych, mld zł	12,11	60,55	121,1
Zwrot nakładów zyskiem brutto, lata (cena 1250 zł/t) – wariant I (cena 2000 zł/t) – wariant II	3,3 2,4	3,3 2,4	3,3 2,4
Ilość energii ze spalania biowęgla, GJ/r**	75,9	759	7590
Oszczędności na opłacie emisyjnej wynoszącej 60 euro/t CO ₂ , mld zł/r***	3,63	18,15	36,3

*s.m. – sucha masa; **wartość opałowa biopelletów 23 GJ/t; ***dodatkový efekt z tytułu braku opłaty emisyjnej ETS (60 euro/t emitowanego CO₂, tj. 1100 zł/t węgla lub 46 zł/GJ)^{25, 35}

efektem jest zmniejszenie emisji CO₂, gdyż roztwór nawozowy jest substytutem nawozów mineralnych^{32, 33}.

Możliwości wykorzystania metody HTC do zagospodarowania odpadów biomasy w Polsce

Zgodnie z dyrektywą UE¹) pojęcie biomasy obejmuje ulegającą biodegradacji część produktów, odpadów lub pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa, a także ulegającą biodegradacji część odpadów przemysłowych lub komunalnych pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, w tym odpadów z instalacji do przetwarzania odpadów. Wartość kaloryczna biomasy jest dwukrotnie mniejsza niż węgla. W polskich warunkach do głównych źródeł pozyskiwania biomasy należy leśnictwo (drewno kawałkowe i odpadowe w postaci drzew, gałęzi z przycinek, odpady w postaci kory, trocin, karpiny), rolnictwo (uprawy z plantacji energetycznych: wierzba, miskanty, topola, ślazier pensylwański), rośliny z upraw polowych (zboża, buraki, kukurydza) i ich produkty uboczne (słoma, łupiny nasion, łodygi kukurydzy), odpady (obornik z hodowli trzody chlewnej i bydła), rośliny wodne (glony), osady z biologicznego oczyszczania ścieków, odpady przemysłowe (wytłoki z przetwórnii owoców, soków, drożdże odpadowe z gorzelnii, młóto z browarów i odpady z rzeźni) oraz organiczna frakcja odpadów komunalnych, odpady kuchenne, papier, tektura i odpady zielone^{3, 4}). Wartość energetyczna 30 mln t stałej biomasy wynosi ok. 450 PJ (125 TWh),

Table 4. Potential production of AHL liquid fertilizer from the HTC method in Poland (processing variants of 10, 50 and 100 million t/y of waste hydrated biomass, respectively)^{25, 35)}

Tabela 4. Potencjalna produkcja nawozu ciekłego AHL w Polsce otrzymanego metodą HTC (warianty przerobu odpowiednio 10, 50 i 100 mln t/r odpadowej uwodnionej biomasy)^{25, 35)}

Ilość osadów ściekowych (30% s.m.*), mln t/r	10,0	50,0	100,0
Zdolność produkcyjna roztworu AHL, mln t/r	0,64	3,2	6,4
Zdolność produkcyjna w przeliczeniu na (N + K), t/r	2125	10625	21250
Cena produktu, zł/t**	33	33	33
Wartość produkcji, mld zł/r	0,021	0,107	0,213
Liczba nawożonych hektarów, ha***	10625	53125	106250

*s.m. – sucha masa; **przy cenie za N (azot) i K (potas) po 10 zł/kg i zawartościach w AHL: N = 0,13% i K = 0,2%; ***dawka (N + K) = 200 kg/ha

co jest równoważne z ok. 13 GW ciągle dostępnej mocy dyspozycyjnej w całym roku. Zastąpienie węgla tą biomasa spowodowałoby zmniejszenie opłat EU ETS za emisję ok. 42 mln t CO₂ rocznie^{3, 4)}.

W 2021 r. w Polsce wytworzono 1025,8 tys. t s.m. osadów ściekowych, z czego 43% stanowiły osady z oczyszczalni przemysłowych, a 57% osady z oczyszczalni komunalnych. Ilość osadów ściekowych co roku wrasta. Obecnie 11 oczyszczalni ścieków w Polsce dysponuje instalacją do termicznej przeróbki osadów ściekowych (Warszawa, Łódź, Kielce, Kraków, Zielona Góra, Łomża, Bydgoszcz, Gdańsk, Gdynia, Olsztyn, Szczecin). Spalają one ok. 154 tys. t/r s.m. odpadów (ok. 25% masy powstających w Polsce osadów ściekowych)³⁴⁾.

Szacunkowa ilość biomasy, potencjalnego surowca dla metody HTC, może w Polsce wynieść nawet 100 mln t/r. Metoda HTC może pozwolić na całkowite wykorzystanie 10 mln t/r uwodnionej masy osadów ściekowych powstających w ponad 3260 komunalnych oczyszczalniach ścieków w Polsce. Największy udział (ok. 80%) stanowią małe oczyszczalnie ścieków (10–30 tys. mieszkańców), z których każda produkuje do 2500 t/r uwodnionych osadów. Mają one największe problemy z utylizacją osadów ściekowych. Metoda HTC może też pozwolić na zagospodarowanie osadów pofermentacyjnych z 442 polskich biogazowni.

Należy przy tym podkreślić wysoką jakość biopelletów węglowych z procesu karbonizacji hydrotermalnej HTC, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 1^{25, 35)}, oraz zawartość wartościowych składników nawozowych w roztworze nawozowym AHL z karbonizacji hydrotermalnej (tabela 2)^{25, 35)}.

W tabeli 3 przedstawiono warianty przerobu różnych ilości odpadowej biomasy dostępnej w Polsce oraz szacunkowe efekty ekonomiczne z tego tytułu. Nakłady inwestycyjne związane z budową instalacji są relatywnie małe. Szacowany zwrot nakładów brutto wynosi (bez oszczędności na opłacie emisyjnej ditlenku węgla) 2,4–3,3 lat (przy granicznych 5 latach dla tego typu instalacji). Można oce-

niać, że realne jest obecnie w Polsce przetworzenie metodą HTC ok. 50 mln t/r biomasy i wytworzenie w ten sposób ok. 16,5 mln t/r biopelletów węglowych^{25, 35)}.

W tabeli 4 przedstawiono ilość wytworzonego roztworu nawozowego z karbonizacji hydrotermalnej HTC dla trzech wariantów mocy przerobowych. Ilość roztworu nawozowego AHL, którego wartości nawozowe są w sumie przeciętne³⁰⁾, pozwoli na nawiezenie maksymalnie ok. 106 000 ha pól uprawnych, co jest wielkością relatywnie niewielką^{25, 35)}.

Technologia HTC jest zgodna z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym (CE), pozwalającą na recykling i ponowne wykorzystanie węgla zawartego w biomase jako stałego biopaliwa i produktu ubocznego w postaci roztworu zawierającego bioskładniki nawozowe. Tak otrzymany biowęgiel może mieć znaczącą wartość rynkową. Proces HTC może być traktowany jako technologia przetwarzania uwodnionej biomasy rozwijająca strategiczne działania CE w obszarze gospodarki odpadami. Udana wdrożenie HTC do odzyskiwania produktów o wartości dodanej z uwodnionej biomasy rozwinęło możliwość przetwarzania odpadów o wyższym stopniu uwodnienia, przy jednoczesnym osiągnięciu zysków środowiskowych i społeczno-ekonomicznych zgodnych z koncepcją CE^{36, 37)}.

Podsumowanie

Technologia hydrotermalnej karbonizacji (HTC) skutecznie przekształca uwodnioną biomasa w biowęgiel, wysokiej jakości biopellety węglowe, które mogą być stosowane jako surowiec energetyczny. Biowęgiel jest stabilnym produktem chemicznym, łatwym do przechowywania. Proces HTC ma wiele zalet, takich jak zwiększona wydajność recyklingu bioodpadów, umożliwienie substytucji paliw kopalnych biopaliwami otrzymywanymi z biomasy i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Jest również bardzo skuteczny ze względu na przekształcanie niemal całego węgla biomasy w biowęgiel. Proces karbonizacji hydrotermalnej jest egzotermiczny, co wpływa na małe zużycie energii. Biowęgiel przyczynia się do zmniejszania emisji CO₂ i poprawy jakości powietrza. Sprawia to, że technologia karbonizacji hydrotermalnej jest atrakcyjnym rozwiązaniem dla zrównoważonego rozwoju gospodarki odpadami i produkcji bioenergii. HTC można postrzegać jako technologię nowej generacji przetwarzania uwodnionej biomasy, realizującą cele strategiczne gospodarki obiegu zamkniętego w obszarze gospodarki odpadami.

Otrzymano: 24-04-2025

Zrecenzowano: 07-05-2025

Zaakceptowano: 09-05-2025

Opublikowano: 19-05-2025

LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, Dz.U. L 328/82.
- [2] Ustawa z dnia 27 listopada 2024 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz.U. 2024, poz. 1361.

- [3] <https://enerad.pl/biomasa-w-polsce-wykorzystanie-i-rola/>, dostęp 12.12.2024 r.
- [4] <https://www.bosbank.pl/EKO/tresci-ekologiczne/aktualne-kierunkiza-gospodarowania-osadow-siekowych-w-polsce>, dostęp 12.11.2024 r.
- [5] F. Bergius, *Die Anwendung Hoher Drucke bei Chemischen Vorgängen und Eine Nachbildung des Entstehungsprozesses der Steinkohle*, Publisher Knapp, Halle, Germany, 1913.
- [6] P. Burguete, A. Corma, M. Hitzl, R. Modrego, E. Ponce, M. Renz, *Green. Chem.* 2016, **18**, nr 4, 1051.
- [7] D. Cebi, M.S. Celiktaş, H. Sarptas, *Circ. Econ. Sustain.* 2022, **2**, 1345.
- [8] E. Danso-Boateng, O.W. Achaw, *AIMS Energy* 2022, **10**, nr 4, 585.
- [9] O.S. Djandja, L.X. Yin, Z.C. Wang, P.G. Duan, *Process Saf. Environ. Prot.* 2021, **151**, 101.
- [10] <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0e190efb-daec-4116-9ff7-ea097f649a77/etp2008.pdf>, dostęp 8.11.2024 r.
- [11] <http://www.fao.org/faostat/en/#home>, dostęp 25.01.2024 r.
- [12] N. Gao, K. Kamran, C. Quan, P.T. Williams, *Prog. Energy. Combust.* 2020, **79**, 100843.
- [13] J. González-Arias, M.E. Sánchez, J. Cara-Jiménez, F.M. Baena-Moreno, Z. Zhang, *Environ. Chem. Lett.* 2022, **20**, 211.
- [14] M.L. Hernández, M.B.A. Latorre, M. Hitzl, [w:] *Proceedings of the International VDI Conference 2017 Sewage Sludge Treatment*, Copenhagen, Denmark, May 17–18, 2017.
- [15] M. Hitzl, A. Corma, F. Pomares, M. Renz, *Catal. Today* 2015, **257**, 154.
- [16] C. Huang, B.A. Mohamed, L.Y. Li, *Chem. Eng. J.* 2023, **457**, 141284.
- [17] <https://www.ingelia.com/en>, dostęp 10.11.2024 r.
- [18] A. Kruse, A. Funke, M.M. Titirici, *Curr. Opin. Chem. Biol.* 2013, **17**, nr 3, 515.
- [19] A. Marinovic, F.D. Pileidis, M.M. Titirici, [w:] *Porous carbon materials from sustainable precursors* (red. R.J. White), Royal Society of Chemistry, London, UK, 2015, 129.
- [20] S.A. Nicolae, H. Au, P. Modugno, H. Luo, A.E. Szego, M. Qiao, L. Li, W. Yin, H.J. Heeres, N. Berge, M.M. Titirici, *Green Chem.* 2020, **22**, nr 15, 4747.
- [21] M. Owsianiak, M. Ryberg, M. Renz, M. Hitzl, M.Z. Hauschild, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2016, **4**, nr 12, 6783.
- [22] M. Renz, A. Corma, M. Hitzl, [w:] *Proceedings 21st European Biomass Conference and Exhibition*, Copenhagen, Denmark, June 3–7, 2013.
- [23] Z. Kowalski, A. Makara, J. Kulczycka, A. Generowicz, P. Kwaśnicki, J. Ciuta, A. Gronba-Chyła, *Energies* 2024, **17**, nr 6, 1383.
- [24] R. Sharma, K. Jasrotia, N. Singh, P. Ghosh, S. Srivastava, N.R. Sharma, J. Singh, R. Kanwar, A. Kumar, *Chem. Afr.* 2020, **3**, 1.
- [25] Z. Kowalski, A. Makara, *Energies* 2024, **17**, nr 12, 2956.
- [26] Z. Kowalski, J. Kulczycka, A. Makara, R. Verhé, G. De Clercq, *Energies* 2022, **15**, nr 22, 8625.
- [27] Z. Kowalski, J. Kulczycka, R. Verhé, L. Desender, G. De Clercq, A. Makara, N. Generowicz, P. Harazin, *Front. Energy Res.* 2022, **10**, 919415.
- [28] PN-EN ISO 17225-8:2023-10, *Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 8. Fuel classes from thermally processed and compressed biomass for non-industrial and industrial use*.
- [29] R. Gallant, A.A. Farooque, S. He, K. Kang, Y. Hu, *Sustainability* 2022, **14**, nr 9, 12530.
- [30] J. Petrović, M. Ercegović, M. Simić, M. Koprivica, J. Dimitrijević, A. Jovanović, J. Janković Pantić, *Processes* 2024, **12**, nr 1, 207.
- [31] H.B. Sharma, A.K. Sarmah, B. Dubey, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, **123**, 109761.
- [32] S. Celletti, M. Lanz, A. Bergamo, V. Benedetti, D. Basso, M. Baratieri, S. Cesco, T. Mimmo, *Front. Plant. Sci.* 2021, **12**, 687434.
- [33] V. Mau, J. Neumann, B. Wehrli, A. Gross, *Environ. Sci. Technol.* 2019, **53**, nr 17, 10426.
- [34] G. Przydatek, A.K. Wota, *J. Mater. Cycles Waste. Manag.* 2020, **22**, 80.
- [35] Z. Kowalski, J. Kulczycka, A. Makara, A. Nowaczek, *Zastosowanie technologii karbonizacji hydrotermalnej HTC do zrównoważonego rozwoju produkcji peletów biowęglowych z makrej biomasy, zwłaszcza z osadów ściekowych*, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 2022 (praca niepublikowana).
- [36] Z. Kowalski, J. Kulczycka, M. Banach, A. Makara, *Sustainability* 2023, **15**, nr 18, 13495.
- [37] Z. Kowalski, M. Banach, A. Makara, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2021, **28**, 8205.

