
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 28
(styczeń–marzec)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok X

Warszawa–Opole 2017

FRANCISZEK SŁADECZEK*
EWA GŁODEK-BUCYK**

Badania wykorzystania niskotemperaturowej pirolizy do przetwarzania biomasy odpadowej na biowęgiel w instalacji testowej

Słowa kluczowe: niskotemperaturowa piroliza, biomasa odpadowa, biowęgiel.

W artykule opisano instalację testową do niskotemperaturowej pirolizy biomasy w Oleśnie, bazującą na niemieckiej technologii WSK Anlage GmbH. Wykonano na niej testy wytwarzania biowęgla z biomasy odpadowej, m.in. z obornika kurzego, słomy żytniej oraz komunalnych osadów ściekowych. W wyniku pirolizy uzyskano biowęgiel, olej pirolityczny oraz niewielkie ilości biogazu. Analizy fizykochemiczne uzyskanego biowęgla, wykonane zgodnie z zaleceniami EBC (European Biochar Certificate), wykazały ich przydatność energetyczną w przypadku osadów ściekowych i słomy oraz możliwość zastosowania jako polepszacza gleby lub do rekultywacji terenów leśnych w przypadku obornika kurzego i słomy. Przeprowadzono także ocenę ekonomiczną funkcjonowania instalacji wytwarzania biowęgla z obornika kurzego o wydajności biowęgla 420 ton/rok. Jak wynika z oceny, budowa przemysłowej instalacji niskotemperaturowej pirolizy biomasy odpadowej ma uzasadnienie finansowe tylko w przypadku uzyskania dotacji do danej inwestycji.

1. Wprowadzenie

Biowęgiel jest drobnoziarnistą i porowatą substancją, z wyglądu przypominającą węgiel drzewny, którą otrzymuje się w wyniku termicznej obróbki biomasy bez udziału tlenu w procesie zwanym pirolizą. Materiałem wsadowym do produkcji biowęgla może być specjalnie w tym celu uprawiana biomasa, jak również biomasa odpadowa.

Biowęgiel może być wykorzystany masowo jako polepszacz gleby lub nawóz naturalny, ale ma też zastosowania przynoszące większe korzyści – do maga-

* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, f.sladeczek@icimb.pl

** Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, e.glodek@icimb.pl

zynowania nietrwałych substancji spożywczych, jako adsorber w odzieży funkcjonalnej, do izolacji w przemyśle budowlanym oraz magazynowania energii w akumulatorach, jako filtr w oczyszczalni ścieków, zakiszacz pasz lub suplement do pasz, do oczyszczania wody, ścieków i gazów czy jako biopaliwo [1]. Szwajcarski instytut Ithaka zidentyfikował do tej pory aż 55 zastosowań biowęgla [2].

W zależności od warunków prowadzenia procesu pirolizy, to jest temperatury, szybkości nagrzewania, stopnia rozdrobnienia biomasy, zastosowanych katalizatorów itp., otrzymuje się biowęgiel o różnych właściwościach [3–4]. Obszerny przegląd materiałów wsadowych, technologii otrzymywania biowęgla (piroliza, gazyfikacja, toryfikacja) oraz porównanie podstawowych parametrów istniejących zakładów i sposobów jego produkcji wykonano w ramach projektu E2BEBIS [5]. Na początku tego roku otwarto w Polsce największy w Europie zakład produkcji biowęgla oparty na technologii FLUID uwęglania biomasy [6].

Biowęgiel jest bez wątpienia jednym z najciekawszych obecnie obszarów badań, dotyczy zarówno technologii wytwarzania, jak i jego wykorzystania w wielu dziedzinach gospodarki i nauki. Jego rozpowszechnienie przyczyni się do zrównoważonego zagospodarowania odpadów oraz podniesienia żyzności gleb, a także będzie stanowić potencjalną metodę sekwestracji dwutlenku węgla.

2. Rodzaje biomasy odpadowej jako wsad do wytwarzania biowęgla

Substraty do produkcji biowęgla tworzą różne grupy materiałów, które obejmują rośliny energetyczne, odpady z leśnictwa, biomasę rolniczą, komunalne osady ściekowe, frakcje organiczne odpadów komunalnych stałych lub pozostałości z przetwórstwa rolno-spożywczego. Dużą część tych materiałów stanowi biomasza odpadowa, która ze względów ekonomicznych i środowiskowych nadaje się najbardziej do wytwarzania biowęgla.

W szczególności należy brać pod uwagę biomasę odpadową z rolnictwa (słoma zbożowa, rzepakowa i kukurydziana), przemysłu spożywczego (odpady z cukrowni, mleczarni, browarów i gorzelni oraz produkcji żywności), hodowli drobiu, bydła i trzody chlewnej (obornik, ściółka, odpady z uboju, pierze), leśnictwa (odpady drzewne, zrębka zielona), komunalne osady ściekowe, odpady komunalne stałe (frakcje do odzysku energetycznego).

W tabelach 1 oraz 2 przedstawiono charakterystykę fizykochemiczną niektórych rodzajów biomasy odpadowej, która była wykorzystana przez nas jako materiał wsadowy do wytwarzania biowęgla.

Tabela 1

Parametry fizykochemiczne biomasy roślinnej [7] i osadów ściekowych

Parametr	Jednostka	Słoma ogółem	Słoma żytnia	Suszone osady ściekowe*
Wilgotność	%	15,00	15,00	10,00
Popiół	% s.m.	5,70	4,80	35,00
Węgiel	% s.m.	45,10	46,60	34,00
Tlen	% s.m.	42,50	41,90	13,50
Wodór	% s.m.	5,90	6,00	5,00
Azot	% s.m.	0,50	0,60	3,50
Siarka	% s.m.	0,07	0,08	1,36
Chlor	% s.m.	0,25	0,40	0,15
Części lotne	% s.m.	76,20	76,40	49,00
Wartość opałowa	MJ/kg	17,20	17,50	10,80

* Analiza własna.

Tabela 2

Charakterystyka chemiczna obornika z hodowli bydła, trzody i drobiu [9]

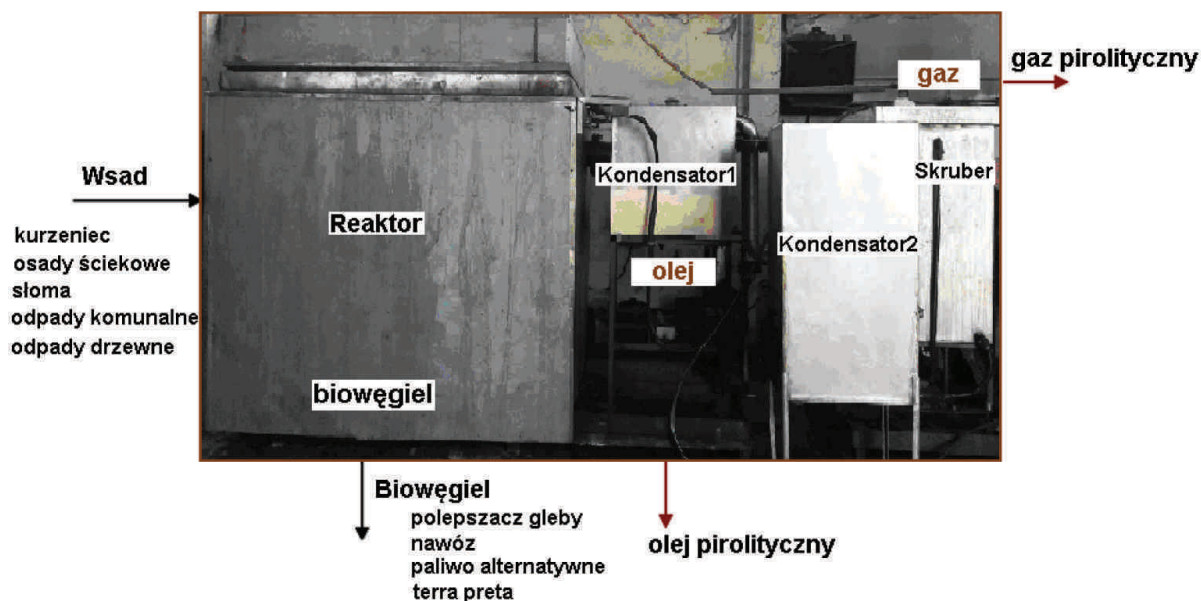
Składnik [kg/Mg]	Rodzaj zwierząt		
	bydło	trzoda	kury
N	4,7	5,1	1,2–4,1
P ₂ O ₅	2,8	4,4	1,2–2,6
K ₂ O	6,5	6,8	0,8–2,3
CaO	4,3	4,4	2,4–6,8
Mg	1,5	1,8	2,0–3,0

Jak widać, biomasa pochodzenia roślinnego jaką jest słoma (tab. 1) różni się znacznie od osadów ściekowych, przede wszystkim pod względem kaloryczności, a także zawartości popiołu oraz tlenu i azotu. Odpady z hodowli (tab. 2), tj. obornik bydła i trzody ma wyższą zawartość składników nawozowych, takich jak azot, fosfor i potas od obornika kurzego.

3. Badania własne pirolizy biomasy odpadowej na instalacji testowej

3.1. Opis instalacji testowej

Na instalacji zlokalizowanej w Oleśnie, bazującej na niemieckiej technologii WSK Anlage GmbH, przeprowadzono testy pirolizy różnych odpadów biomasy. W wyniku termicznej obróbki tych odpadów, w temperaturze ok. 500°C, powstają dwa zasadnicze produkty – biowęgiel oraz bioolej. Schemat technologiczny instalacji pilotowej pirolizy biomasy przedstawia rycina 1.



Ź r ó d ł o: Opracowanie własne – ryc. 1–8.

Ryc. 1. Schemat technologiczny instalacji pilotowej pirolizy biomasy WSK Olesno

Instalacja składa się z reaktora o objętości ok. 7 m³ (wsad do 1 tony biomasy) z elektrycznym grzaniem podłogowym. Układ regulacji pozwala na kontrolę temperatury materiału zarówno w reaktorze, jak i gazów odlotowych. Temperatura procesu była utrzymywana poprzez zadaną wartość na grzałkach. Jej wielkość skorelowano z temperaturą gazów odlotowych. W kondensatorze następuje wychłodzenie tych gazów, w wyniku czego wykrapla się woda oraz wychwycone zostają frakcje olejowe. Pozostałe po przepływie przez kondensatory gazy pirolityczne oczyszczane są w skruberze wodnym.

W tej instalacji przeprowadzono pirolizę biomasy odpadowej, takiej jak obornik kurzy, słoma, osady ściekowe, stałe odpady komunalne czy leśne odpady drzewne.

3.2. Wyniki prób pirolizy różnych rodzajów biomasy odpadowej

Na rycinach 2–4 i w tabelach 3–5 przedstawiono rezultaty testowych prób pirolizy kilku rodzajów biomasy odpadowej. Wyniki te dotyczą trzech materiałów wsadowych: obornika kurzego, słomy żytniej oraz komunalnych osadów ściekowych. Dla każdej z testowanej biomasy przedstawiono podstawowe dane procesu oraz charakterystykę fizykochemiczną produktu, czyli biowęgla. Ilości poszczególnych produktów określano na podstawie ich ważenia, ilość gazu była wyliczana jako różnica bilansowa między wsadem a produktem.



Wsad:
obornik kurzy – 580 kg
wapno palone – 18 kg
czynnik neutralizujący – 60 l



Produkt:
bioolej – 51 l
biowęgiel – 197 kg
woda – 319 l
gaz – 79 kg
temperatura pirolizy – 500°C
temperatura gazów odlotowych – 270°C

Ryc. 2. Widok obornika kurzego przed (po lewej) i po pirolizie (po prawej)



Wsad:
słoma żytnia – 155 kg
czynnik neutralizujący – 12 l



Produkt:
bioolej – 24,5 l
biowęgiel – 49 kg
woda – 41 l
gaz – 55 kg
temperatura pirolizy – 400°C
temperatura gazów odlotowych – 250°C

Ryc. 3. Widok słomy żytniej przed (po lewej) i po pirolizie (po prawej)



Wsad:
osady ściekowe – 593 kg
katalizator – 12 kg



Produkt:
bioolej – 70 l
biowęgiel – 330 kg
gaz – 60 kg
woda – 150 l
temperatura pirolizy – 500°C
temperatura gazów odlotowych – 270°C

Ryc. 4. Widok komunalnych osadów ściekowych przed (po lewej) i po pirolizie (po prawej)

Analiza fizykochemiczna otrzymanego biowęgla została wykonana w laboratorium Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu w oparciu o wytyczne organizacji EBC (European Biochar Certificate) [8]. Obejmuje ona własności energetyczne (wartość opałowa, C, H, N, S, TOC), jak i nawozowe (N, P, K, pH, metale). Własności energetyczne biowęgla odnoszą się do stanu analitycznego.

Tabela 3

Charakterystyka biowęgla otrzymanego z obornika kurzego

Parametr	Wynik oznaczenia	Jednostka
Wilgotność	0,7	%
Ciepło spalania	15681	kJ/kg
Wartość opałowa	14985	kJ/kg
Węgiel	44,43	%
Wodór	3,38	%
Azot	3,6	%
Siarka	1,61	%
TOC	43,6	%
Chlor jako Cl ⁻	1,37	%
Azot amonowy N-NH ₄	60,5	mg/kg s.m.
Fosfor	290,5	mg/kg s.m.
Potas	30,339	g/kg s.m.
Kadm	0,579	mg/kg s.m.
Ołów	1,95	mg/kg s.m.
Nikiel	7,10	mg/kg s.m.
Chrom	1,75	mg/kg s.m.
Rtęć	2,507	mg/kg s.m.
pH	10,1 w temp. 20°C	-

Źródło: Badania własne – tab. 3–8.

Tabela 4

Charakterystyka biowęgla otrzymanego ze słomy żytniej

Parametr	Wynik oznaczenia	Jednostka
Wilgotność	3,3	%
Ciepło spalania	27505	kJ/kg
Wartość opałowa	25738	kJ/kg
Węgiel	73,2	%
Wodór	3,45	%
Azot	1,25	%
Siarka	0,10	%
TOC	> 50	%
Chlor jako Cl ⁻	0,84	%
Azot amonowy N-NH ₄	35,4	mg/kg s.m.
Fosfor (jako P-PO ₄)	243,4	mg/kg s.m.
Potas	6,350	g/kg s.m.
Kadm	1,29	mg/kg s.m.
Ołów	80,4	mg/kg s.m.
Nikiel	57,6	mg/kg s.m.
Chrom	101,0	mg/kg s.m.
Rtęć	< 0,005	mg/kg s.m.
pH	9,73 temp. 21°C	-

Tabela 5

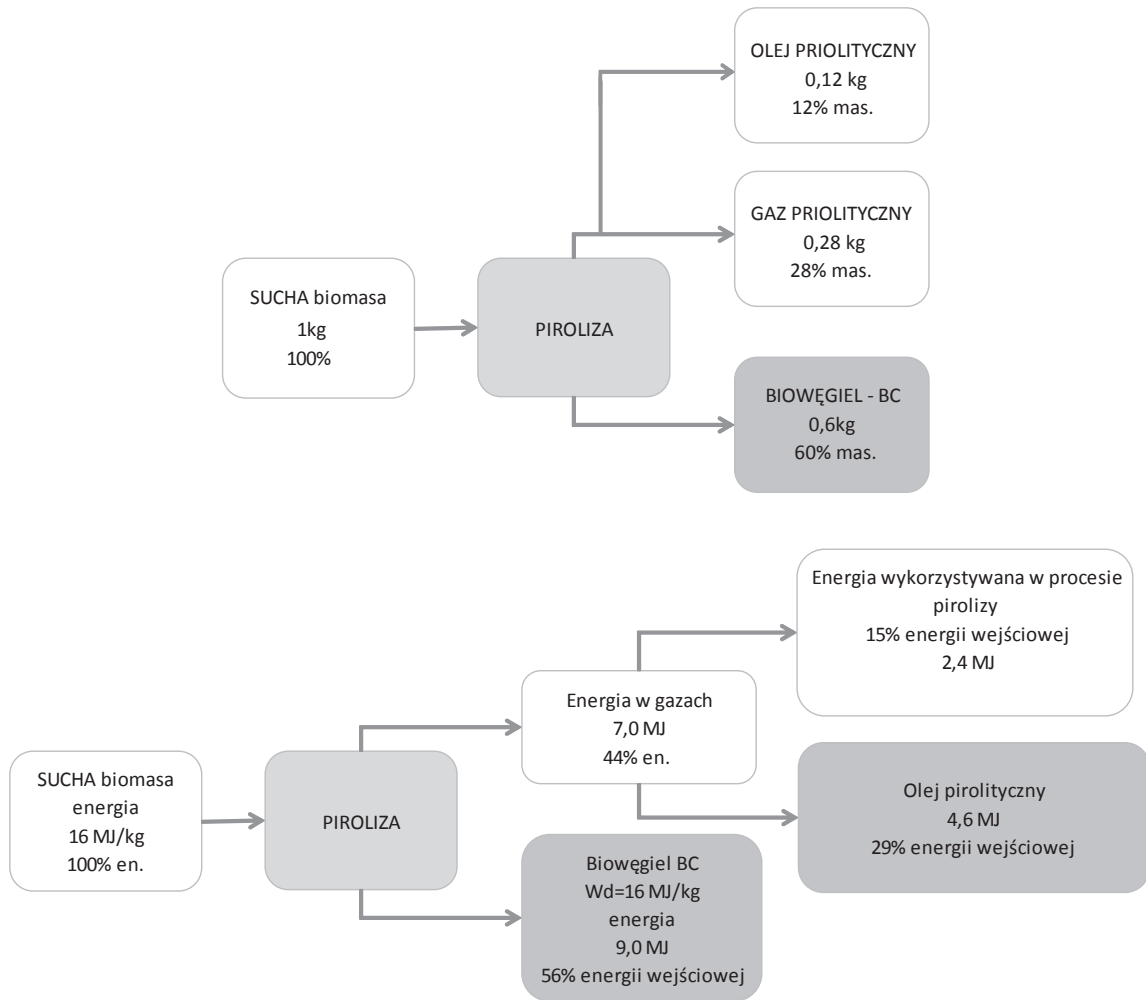
Charakterystyka biowęgla otrzymanego z komunalnych osadów ściekowych

Parametr	Wynik oznaczenia	Jednostka
Wilgotność	0,77	%
Ciepło spalania	17823	kJ/kg
Wartość opałowa	16826	kJ/kg
Węgiel	42,2	%
Wodór	4,47	%
Azot	0,399	%
Siarka	3,80	%
TOC	39,1	%
Chlor jako Cl ⁻	0,158	%
Fosfor całkowity	5,25	%
Potas	1,56	mg/kg s.m.
Kadm	2,31	mg/kg s.m.
Ołów	46,2	mg/kg s.m.
Nikiel	70,8	mg/kg s.m.
Chrom	88,5	mg/kg s.m.
Rtęć	0,0049	mg/kg s.m.
pH	6,3	-

Analiza biowęgla uzyskanego na instalacji pilotowej wskazuje na jego przydatność energetyczną w przypadku osadów ściekowych i słomy oraz jako poprawiacz gleby lub materiał do rekultywacji terenów leśnych w odniesieniu do kurzeńca i słomy. Biowęgiel uzyskany z osadów ściekowych o kaloryczności ok. 17 MJ/kg może być dobrym paliwem do współspalania w przemyśle cementowym i energetyce, lepszym jakościowo od suszonych osadów.

4. Ocena ekonomiczna budowy instalacji pilotowej wytwarzania biowęgla

Ocenę ekonomiczną funkcjonowania instalacji pirolizy biomasy odpadowej dla wydajności wsadu 700 t/rok s.m. wykonano na bazie danych własnych dla wytwarzania biowęgla z obornika kurzego [10]. Dane technologiczne procesu przyjęto na podstawie bilansu masy i energii przedstawionego na rycinie 5.



Ryc. 5. Bilans masowy i energetyczny pirolizy obornika kurzego

Schemat blokowy instalacji, składającej się z pięciu reaktorów pracujących szeregowo w sposób quasi-ciągły, pokazuje rycina 6. Dla wsadu w postaci obornika kurzego roczna produkcja wyniesie 420 t biowęglu oraz 84 t biooleju.



Ryc. 6. Schemat blokowy instalacji pirolizy biomasy odpadowej dla wydajności wsadu 700 t/rok s.m.

Koszty inwestycyjne zostały określone na podstawie informacji uzyskanych od operatora instalacji testowej, dostawców biomasy, producentów energii elektrycznej i ciepła oraz dostawców urządzeń.

W analizie efektywności ekonomicznej przyjęto następujące dane bazowe:

- własne wykorzystanie energii cieplnej (model prosumencki),
- stopa dyskontowa na poziomie 8%,
- czas pracy instalacji 5800 h/rok,
- koszty inwestycyjne 400 tys. euro.

Analiza ekonomiczna została wykonana w euro. Podstawowe dane produkcyjne i kosztowe do tej analizy przedstawiono w tabeli 6; uwzględniono także koszty eksploatacyjne, ubezpieczenia inwestycji oraz płace personelu.

T a b e l a 6

Podstawowe dane produkcyjne i kosztowe instalacji pirolizy obornika kurzego

Zużycie biomasy suchej [t/rok]	Cena biomasy [euro/t]	Koszt biomasy [euro/rok]	Cena ciepła [euro/kWh]	Cena energii elektrycznej [euro kWh]	Cena biowęgla [euro/t]
700	10	8 860	0,02	0,05	300
Moc elektryczna [kW]	Moc cieplna [kW]	Produkcja energii [kWh/rok]	Produkcja ciepła [kWh/rok]	Max. produkcja biowęgla [t/rok]	
43	103	249 400	598 560	420	

Wyliczono wskaźniki ekonomiczne, takie jak NPV (wartość bieżąca netto), IRR (wewnętrzna stopa wzrostu) oraz PP (zdyskontowany czas zwrotu) dla dwóch opcji – bez dotacji i z dotacją 30%.

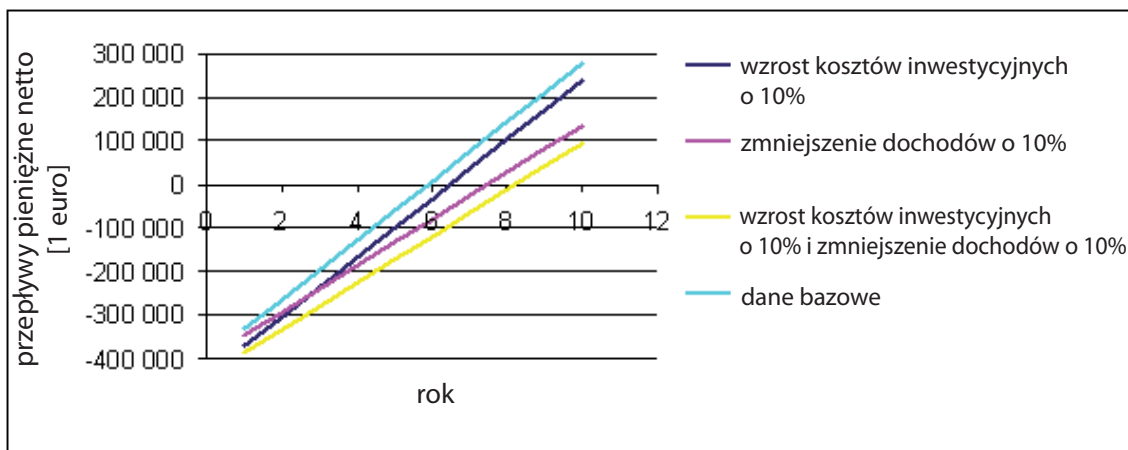
Dla przyjętych danych bazowych czas zwrotu inwestycji bez dotacji wynosi ok. 6 lat, a w przypadku najbardziej niekorzystnych zmian ok. 8 lat. Natomiast czas zwrotu inwestycji z dotacją 30% wynosi 3,5 roku, a w przypadku niekorzystnych maksymalnie ok. 5 lat.

Szczegółowe wyniki obliczeń dla inwestycji bez dotacji przedstawiono w tabeli 7 oraz na rycinie 7, a dla inwestycji z dotacją 30% w tabeli 8 oraz na rycinie 8.

T a b e l a 7

Wskaźniki ekonomiczne instalacji pirolizy obornika kurzego – bez dotacji

	NPV [euro]	IRR [%]	PP [lata]
Dane bazowe	278 658	14,29	5,9
Wzrost inwestycji o 10%	238 658	11,25	6,5
Zmniejszenie dochodów o 10%	134 893	7,13	7,5
Wzrost inwestycji o 10% i zmniejszenie dochodów o 10%	94 893	4,63	8,2

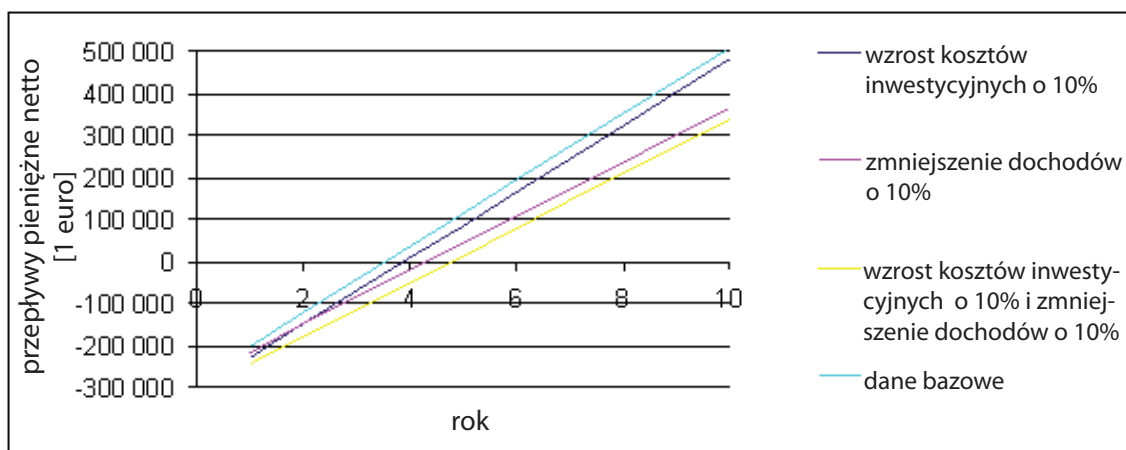


Ryc. 7. Wykres przepływów finansowych dla określenia wskaźników ekonomicznych inwestycji (bez dotacji)

T a b e l a 8

Wskaźniki ekonomiczne instalacji pirolizy obornika kurzego – dotacja 30%

	NPV [euro]	IRR [%]	PP [lata]
Dane bazowe	509 058	36,92	3,5
Wzrost inwestycji o 10%	481 058	31,52	3,9
Zmniejszenie dochodów o 10%	365 293	26,28	4,3
Wzrost inwestycji o 10% i zmniejszenie dochodów o 10%	337 293	22,11	4,8



Ryc. 8. Wykres przepływów finansowych dla określenia wskaźników ekonomicznych inwestycji (z dotacją 30%)

Jak wynika z przedstawionych danych ekonomicznych, budowa przemysłowej instalacji niskotemperaturowej pirolizy biomasy odpadowej (w analizowanym przypadku obornika kurzego) ma uzasadnienie przy częściowym wsparciu finansowym. Podobnie jak w przypadku wytwarzania energii odnawialnej, produkcja biowęgla bez dotacji jest mało opłacalna.

5. Podsumowanie

1. Wykonano testy wytwarzania biowęgla z biomasy odpadowej, m.in. z obornika kurzego, słomy żytniej oraz komunalnych osadów ściekowych na instalacji pilotowej pirolizy biomasy. W wyniku testów otrzymano próbki biowęgla w ilości od 50 do 330 kg.
2. Analizy fizykochemiczne biowęgla uzyskanego na instalacji pilotowej, zgodnie z wytycznymi organizacji EBC (European Biochar Certificate), wskazują na jego przydatność energetyczną w przypadku osadów ściekowych i słomy oraz jako polepszacz gleby lub materiał do rekultywacji terenów leśnych w przypadku kurzeńca i słomy. Biowęgiel uzyskany z osadów ściekowych o kaloryczności ok. 17 MJ/kg może być dobrym paliwem do współspalania w przemyśle cementowym lub w energetyce.
3. Ocena ekonomiczna instalacji przemysłowej biowęgla z obornika kurzego, oparta na technologii WSK Anlage GmbH, o rocznej wydajności biowęgla 420 ton, wykazuje korzystne wskaźniki IRR, NPV i czasu zwrotu inwestycji dla opcji z odzyskiem ciepła i z 30% dotacją. Produkcja biowęgla bez dotacji jest mało opłacalna.
4. Pozytywne wyniki testów skłoniły autorów do wykonania i uruchomienia doświadczalnej instalacji pirolizy biomasy. Reaktor o pojemności 150 l pozwoli na badania procesu pirolizy różnych rodzajów biomasy, odpadów i ich mieszanin przy zmiennych reżimach technologicznych w zakresie 200–550°C*.

Literatura

- [1] Rozwój polityki dotyczącej biowęgla – materiały krajowe Polska, projekt E2BEBIS, nr 4CE53P3 (2014), www.icimb.pl/opole/images/stories/Aktualnosc/e2bebis/CD_PL_final.pdf (12.11.2014).
- [2] Schmidt H.-P., Biochar use, market and legislation in Europe, Ithaka institute for organic carbon cycling, Switzerland, www.ithaka-journal.net (15.05.2015).
- [3] Dhyan V., Bhaskar T., *A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass*, „Renewable Energy” 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.035.
- [4] Kan T., Strezov V.E., Evans T.J., *Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2016, Vol. 57, s. 1126–1140.
- [5] Comparative study on existing biochar plants and pyrolysis technology, projekt E2BEBIS nr 4CE53P3, opracowanie BJ Energy Słowacja 2014, <http://www.e2bebis.eu> (14.11.2014).
- [6] Gładki J., *Biowęgiel szansą dla zrównoważonego rozwoju: na podstawie prac i badań własnych FLUID*, wyd. 2 popr. i uzupełn., Oficyna Poligraficzna Apla, Sędziszów–Kielce 2017.

* Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.

- [7] G ł o d e k E., *Spalanie i współspalanie biomasy. Przewodnik*, Opole 2010, http://www.oze.opole.pl/Poradniki_OZE,str,470.html (22.11.2016).
- [8] European Biochar Certificate – Guidelines for a sustainable production of Biochar, Arbaz Switzerland, Version 6.2E, 2016, www.european-biochar.org/en/download%20the%20certificate (22.11.2016).
- [9] Materiały Instytutu Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach, http://iung.pl/dpr/nawozy_naturalne_rodzaje (22.11.2016).
- [10] Biochar plant feasibility study, PP8, projekt E2BEBIS nr 4CE53P3, opracowanie ICiMB O/Opole 2014, materiały niepublikowane w posiadaniu autorów.

FRANCISZEK SŁADECZEK

EWA GŁODEK-BUCYK

RESEARCH OF USING LOW-TEMPERATURE PYROLYSIS FOR PROCESSING OF WASTE BIOMASS TO BIOCHAR

Keywords: low temperature pyrolysis, waste biomass, biochar.

The article describes a test installation for the low-temperature pyrolysis of biomass in Olesno, based on German technology WSK Anlage GmbH. ICiMB Division Opole performed the tests of producing biochar from waste biomass, such as chicken manure, straw, rye and municipal sewage sludge. As a result of pyrolysis biochar, pyrolysis oil and small amounts of biogas were obtained. Chemical and physical analysis of obtained biochar in accordance with the recommendations of the ECB (European Biochar Certificate), have shown their energetic usefulness in the case of sewage sludge and straw as well as soil improvers or material for reclamation of forest land in the case of chicken manure and straw. Also an economic assessment of the operation of installations producing biochar from chicken manure with a capacity of 420 tons/year was carried out. This assessment shows that the erection of industrial installations for low temperature pyrolysis of waste biomass makes financial sense only with case of subsidies for the investment.