

# PIROLIZA WYBRANYCH SUROWCÓW ORAZ MOŻLIWOŚCI APLIKACYJNE WYTWORZONEGO BIOWĘGLA

## PYROLYSIS OF SELECTED RAW MATERIALS AND APPLICATION POSSIBILITIES OF PRODUCED BIOCARBON

Dominika Kufka – „Poltegor-Institut” Instytut Górnicztwa Odkrywkowego, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław  
Michał Bucha, Wrocław

*W artykule przedstawiono wyniki badań pirolitycznych, które prowadzono z wykorzystaniem modułowego reaktora do termicznej konwersji biomasy. Głównym celem prac była próba podjęcia produkcji biowęgla z surowców biomasowych takich jak słoma rzepaczana, trawa, kiszonka z kukurydzy, pellet sosnowo-świerkowy. Przedstawiono wyniki analiz podstawowych parametrów fizyko-chemicznych wymienionych substratów (zawartość suchej masy, zawartość suchej masy organicznej, popielność). Wykazano, że w założonych warunkach eksperymentalnych całkowitej konwersji do biowęgla ulegał jedynie pellet sosnowo-świerkowy, a pozostałe surowce były konwertowane częściowo. Ponadto w artykule zaproponowano przykładowe kierunki wykorzystania wyprodukowanego biowęgla.*

**Słowa kluczowe:** biomasa, piroliza, biowęgiel

*The article presents the results of pyrolysis, which were carried out by using a modular reactor for the thermal conversion of biomass. The main objective of the research was an attempt to take the production of biochar from biomass raw materials such as straw, grass, corn silage and pine-spruce pellet. The paper presents the analysis results of basic physicochemical parameters (dry matter content, organic dry matter content, ash content) of specified substrates. It has been demonstrated, that in the proposed experimental conditions, complete conversion into biochar underwent only a pine - spruce pellet, other raw materials has been converted partially. In addition, the article proposes example directions for use of produced biochar.*

**Keywords:** biomass, pyrolysis, biocarbon

### Wstęp

W obliczu zużywających się zasobów paliw kopalnych oraz postępującego zanieczyszczenia środowiska, wykorzystanie biomasy do celów energetycznych staje się niezwykle ważnym zagadnieniem. Biomasa zaraz po węglu, ropie naftowej i gazie ziemnym, jest czwartym największym źródłem energii na świecie pokrywającym około 14% światowego zapotrzebowania na energię pierwotną [1]. Biomasa jest alternatywnym źródłem energii, które może mieć wpływ na zmniejszanie narastających problemów związanych z emisją gazów cieplarnianych. Ponadto, stale wzrastające zapotrzebowanie na energię, również wywiera wpływ na rozwój alternatywnych technologii wytwarzania energii, które opierają się o źródła odnawialne. Biomasa może być przetwarzana na wiele różnych sposobów [2]. Jednym z nich jest termiczna konwersja biomasy – piroliza, która stała się głównym przedmiotem niniejszego artykułu.

### Materiały i metody

Piroliza polega na termochemicznym przekształceniu materii organicznej zawartej w biomacie w energię. Na jej

przebieg wpływa jednak bardzo wiele czynników, które rozróżniają proces konwersji, a przez to pozwalają sterować jakością otrzymanych produktów końcowych [3].

Proces pirolizy jest prowadzony przy ograniczonym dostępie czynników utleniających i w ściśle określonych warunkach temperaturowych [2]. Ponadto kluczowe znaczenie dla ilości i jakości otrzymywanych w procesie produktów ma tempo nagrzewania biomasy. W podstawowym podziale metody różni się pirolizę wolną, szybką oraz błyskawiczną (tab.1). W każdym z wymienionych typów pirolizy uzyskujemy produkty gazowe, płynne i stałe w różnych proporcjach.

Realizację zadania badawczego rozpoczęto od wykonania analiz laboratoryjnych wybranych do badań surowców, które poddano analizie zawartości suchej masy oraz zawartości suchej masy organicznej. Analizy wykonywano metodą wagową. Osad umieszczono w ceramicznych tygielkach, zważono i wysuszono w temperaturze 105°C. Na podstawie różnicy mas wyznaczono uwodnienie substratu wyrażone w % zawartości wody [5]. Następnie osad poddano spalaniu w piecu muflowym w temperaturze 550°C, a pozostałość po prażeniu ponownie zważono. Procentową zawartość materii organicznej wyznaczono na podstawie różnicy mas [5].

Tab.1. Charakterystyka typów pirolizy oraz produktów ubocznych (zmieniono) [4]  
 Tab.1. Characteristics of pyrolysis types and by-products (changed) [4]

Typ pirolizy	Warunki	Produkty		
		Płynne	Stałe	Gazowe
Szybka	500°C >1000°C/s	75%	12%	13%
Umiarkowana	400-500°C 1-1000°C/s ~290°C	50%	25%	25%
Wolna - toryfikacja	do 1°C/s czas zatrzymania w końcowej temperaturze ~ 30 min.	0-5%	77%	23%
Wolna – uwęglanie	400-500°C do 1°C/s długi czas zatrzymania w końcowej temperaturze godz.-dni	30%	33%	35%

Przetwarzanie wybranych surowców prowadzono w modułowym reaktorze do pirolitycznej konwersji materii organicznej [3]. Opierało się ono na powolnej, termicznej konwersji biomasy w zadanej temperaturze 400°C (piroliza wolna – uwęglanie, tab.1) do produktów gazowych (gaz syntezowy), płynnych (bio-olej), stałych (biowęgiel). Proces termiczny prowadzono bez dostępu mediów utleniających z ciągłą kontrolą nastawu temperatury procesu. Po osiągnięciu zadanej temperatury, wyłączano moduł grzewczy reaktora, a następnie reakcja przebiegała samoczynnie. Pomiar temperatury w komorze reakcyjnej odbywał się za pomocą termopary typu K, wprowadzonej bezpośrednio do dolnej komory modułowego reaktora. Podczas procesu temperaturę rejestrowano w sposób ciągły w jednosekundowych odstępach czasu. Ciśnienie w reaktorze kontrolowano za pomocą przetwornika ciśnienia. Ponadto, instalacja przystosowana jest do badań metodą okresową, z możliwością zastosowania cyklicznego lub ciągłego dozowania mediów utleniających, bądź też do prowadzenia procesu w warunkach obniżonego ciśnienia. W wykonywanych badaniach pilotażowych proces inicjowano jednak w warunkach ciśnienia atmosferycznego bez dostępu dodatkowych czynników utleniających.

Do analiz wybrano następujące substraty pochodzenia rolniczego oraz leśnego:

- słomę rzepaczaną,
- trawę,
- kiszonkę kukurydzy,
- pellet sosnowo-świerkowy.

Substraty były w stanie powietrznie suchym, następnie poddano je wyżej opisanym analizom laboratoryjnym. Wyniki analiz zamieszczono w tabeli 2.

Tab.2. Wybrane parametry fizykochemiczne analizowanych substratów  
 Tab.2. Selected physico-chemical parameters of the analyzed substrates

Substrat	Sucha masa (SM) [%]	Sucha masa organiczna (SMO) [%]	Zawartość popiołu [%]
Słoma rzepaczana	4,2	91,4	8,6
Trawa	6,8	88,8	11,2
Kiszonka kukurydzy	12,5	95,7	4,3
Pellet sosnowo-świerkowy	95	99,6	0,4

## Wyniki i dyskusja

Pirolizę surowców prowadzono w modułowym reaktorze nagrzewanym do 400°C. Po osiągnięciu wskazanej temperatury, proces przebiegał samoczynnie. Każdy z procesów był powtórzony jednokrotnie. Wsady do reaktora każdorazowo homogenizowano, a następnie ze względu na różnice gęstości wykorzystywanych biosurowców oraz ograniczoną pojemność reaktora odważono taką ilość surowca, aby wypełnić komorę reaktora. Uśrednioną masę początkową biosurowców przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Uśredniona masa początkowa substratów  
 Tab. 3. Averaged initial mass of substrates

Nazwa substratu	Słoma rzepaczana	Trawa	Kiszonka kukurydzy	Pellet sosnowo-świerkowy
Masa początkowa substratu n*=2 [kg]	1,56	1,79	2,57	6,09

\*n – liczba prób

Po procesie każdy z nowo powstałych produktów ważono (tab. 4) w celu określenia uzysku i efektywności konwersji w stosunku do masy początkowej surowców.

Najwyższą efektywność konwersji uzyskano w przypadku pelletu sosnowo-świerkowego (rys.1). W przypadku pozostałych surowców obserwowano niepełną konwersję, co mogło być skutkiem gorszej cyrkulacji ciepła oraz wyższej zawartości wilgoci w masie substratu.

Tab. 4. Uśredniona masa końcowa produktów  
Tab. 4. Averaged final mass of products

Nazwa substratu	Słoma rzepaczana	Trawa	Kiszonka kukurydzy	Pellet sosnowo-świerkowy
Masa końcowa substratu n*=2 [kg]	0,58	0,67	0,81	1,52

\*n – liczba prób



Rys. 1. Komora reakcyjna – efekt pełnej konwersji pelletu sosnowo-świerkowego  
Fig. 1. Reaction chamber – effect of the spruce-pine pellet's total conversion

Tab. 5. Pozostałość po procesie pirolizy – uzysk produktu  
Tab. 5. The residue from the pyrolysis process - yield of product

Nazwa substratu	Słoma rzepaczana	Trawa	Kiszonka kukurydzy	Pellet sosnowo-świerkowy
Uzysk n*=4 [%]	37,2	37,4	31,5	25

\*n – liczba prób

Po procesie konwersji, najmniej produktu stałego, biowęglu pozostawało w przypadku pelletu (tab. 5). Może to być związane z przemieszczeniem węgla z masy surowca w kierunku produkowanego gazu syntezowego poprzez uwalnianie związków lotnych (olejki eteryczne), które zawierają drzewa iglaste.

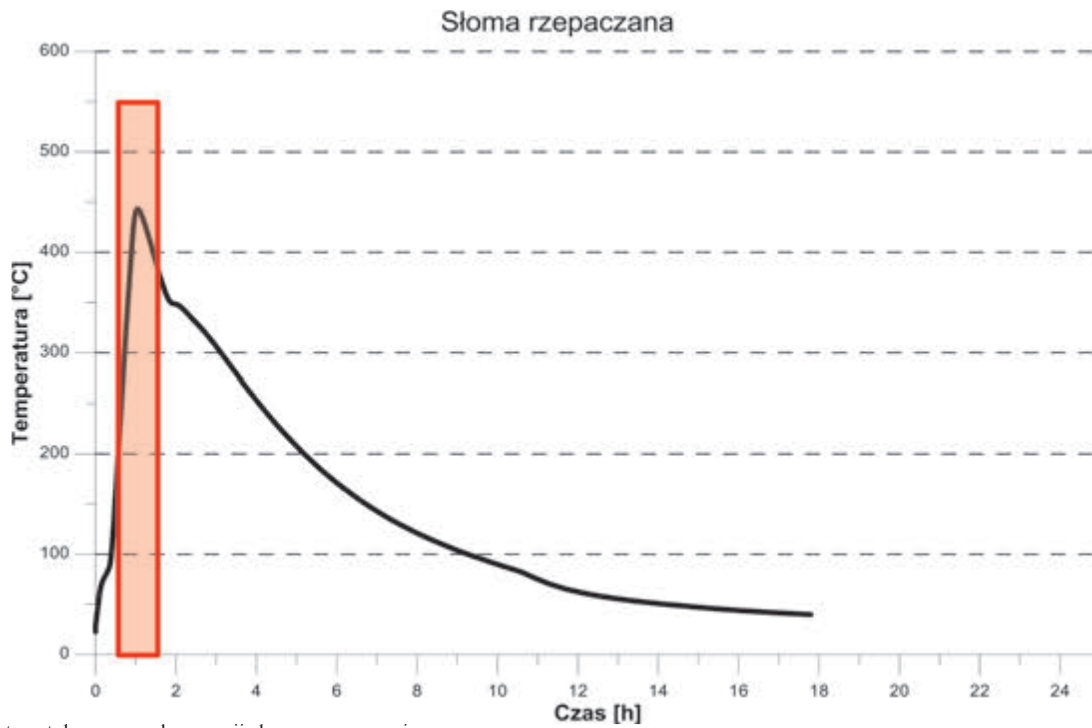
Każdy z przeprowadzonych procesów można podzielić na 3 etapy: nagrzewanie, piroliza, wygaszanie. Poniżej przedstawiono graficzną charakterystykę wybranych procesów. Na wykresach (rys. 2, 3, 4, 5), czerwonym kolorem zaznaczono etap drugi, którym była piroliza. Zasadniczo piroliza, w przypadku procesowanych surowców trwała od 0,5 h do 1,5 h w zależności od poziomu reaktywności i wilgotności surowca. Najkrótszy etap pirolizy zaobserwowano w przypadku słomy rzepaczanej, natomiast najdłuższy dla trawy.

Porównując temperatury prowadzonych procesów, zaobserwowano, że podczas pirolizy trawy uzyskano niższą temperaturę maksymalną (425°C), niż w przypadku pirolizy

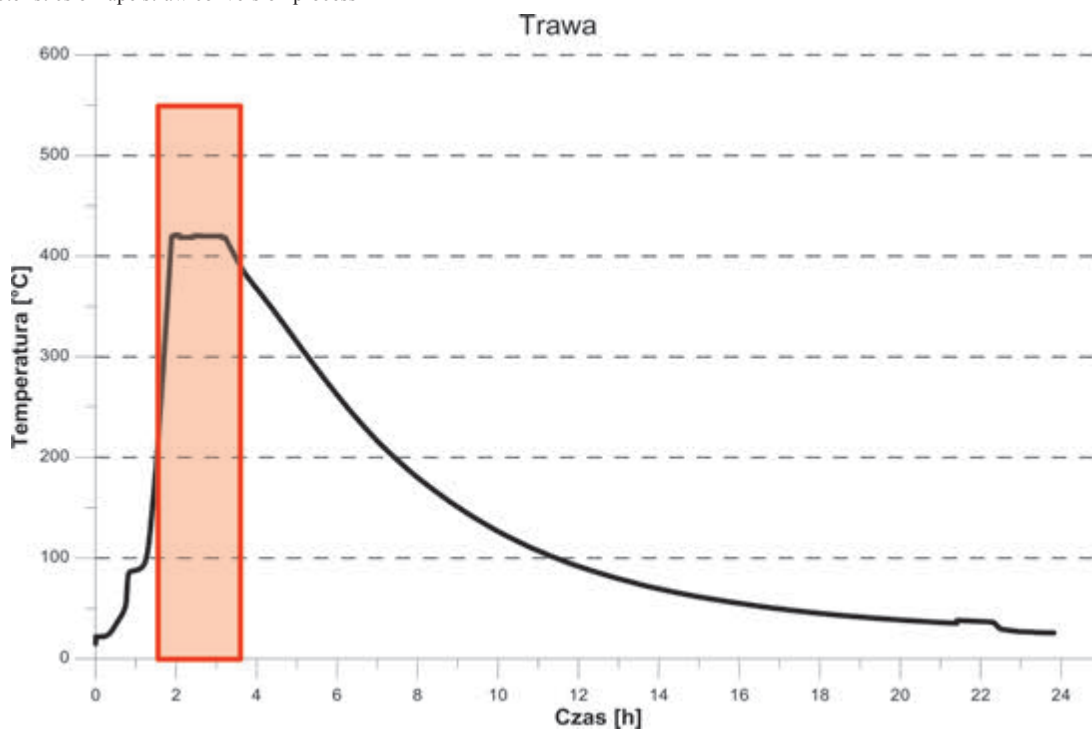
pelletu sosnowo-świerkowego (525°C). Najwyższa otrzymana dla pelletu temperatura, prawdopodobnie wiąże się ze składem tego surowca. Drzewa iglaste, z których skomponowany jest pellet zawierają duże ilości łatwopalnych związków, które uwalniały się z surowca podczas jego podgrzewania. W przypadku trawy, piroliza przebiegała w inny sposób niż w pozostałych surowcach. Proces nie był tak gwałtowny i utrzymywał się na stałym poziomie przez dłuższy czas (w porównaniu do innych procesowanych surowców), co wiązało się ze stabilnym wydzielaniem energii cieplnej.

Poddając analizie porównawczej badane parametry (tj. zawartość suchej masy, zawartość suchej masy organicznej, zawartość popiołu, uzysk produktu, czas pirolizy oraz generowane ciepło) można stwierdzić, że na szczególną uwagę zasługuje pellet sosnowo-świerkowy. Charakteryzuje się on najwyższymi zawartościami suchej masy i suchej masy organicznej oraz najniższą zawartością popiołu. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia instalacji przemysłowych przetwarzających ten surowiec ponieważ ogranicza powstawanie odpadu, jakim jest popiół. W przypadku uzysku biowęglu, najmniejsze ilości produktu uzyskiwano w wyniku pirolizy pelletu. Prawdopodobnie wiąże się to z przesunięciem bilansu otrzymywanych produktów poprocesowych w kierunku gazu syntezowego lub biooleju, co jest ważnym wskaźnikiem w przypadku ukierunkowania produkcji na paliwa płynne lub gazowe. Ponadto, piroliza pelletu charakteryzowała się uwalnianiem najwyższej temperatury w porównaniu do innych surowców, co jest ważne w przypadku instalacji, gdzie odzyskiwane jest ciepło procesowe.

Przeprowadzone badania wskazują, że wszystkie analizowane surowce można poddawać procesom pirolitycznej konwersji do biowęglu. Ponadto, pomimo zachowania dla wszystkich analizowanych surowców tych samych warunków i typu pirolizy (piroliza wolna – uwęglania), zaobserwowano zmienność w przypadku proporcji wyprodukowanego biowęglu. Pozwala to na potwierdzenie tezy, że w zależności od rodzaju surowca [6] oraz zastosowania odpowiedniego



Rys. 2. Charakterystyka procesu konwersji słomy rzepaczanej  
 Fig. 2. Characteristics of rape straw conversion process

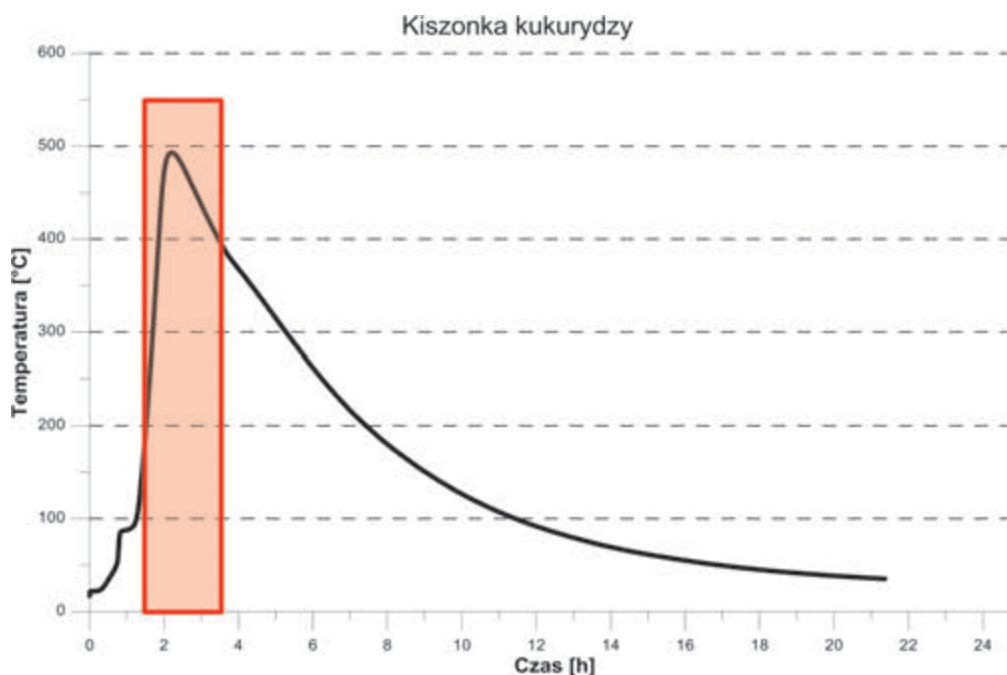


Rys. 3. Charakterystyka procesu konwersji trawy  
 Fig. 3. Characteristics of grass conversion process

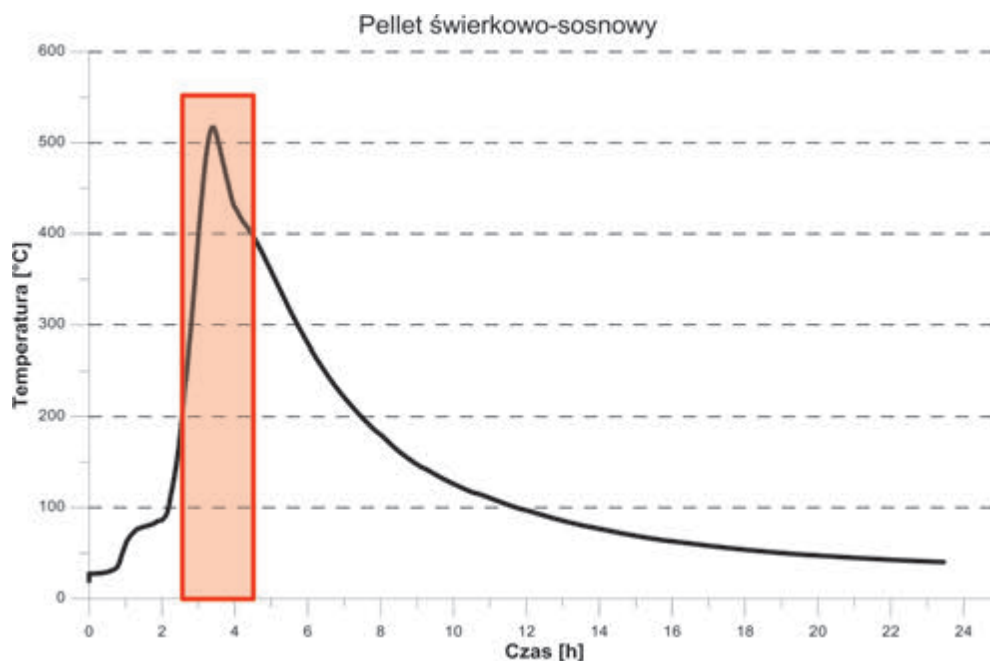
typu pirolizy możliwe jest ukierunkowanie produkcji na otrzymywanie większej ilości produktów stałych, płynnych lub gazowych [7]. Co więcej, konwersja termiczna zróżnicowanych surowców w takich samych warunkach, pozwoliła na określenie ich przydatności i ukierunkowanie charakteru konwersji w procesie pirolizy.

Biowęgiel ze względu na swoje właściwości może znaleźć zastosowanie w wielu dziedzinach życia człowieka. Właściwości biowęgla oraz możliwości jego wykorzystania zostały ściśle scharakteryzowane przez badaczy szwajcarskiego Instytutu Ithaka [8]. Zdefiniowali biowęgiel jako doskonały dodatek do remediacji gleby, wpływający na poprawę jej

jakości oraz żyzności, który ze względu na posiadane właściwości sorpcyjne, po odpowiednim przygotowaniu, może być traktowany jako swoisty magazyn składników odżywczych. Może być też dodawany do kompostowania lub do fermentacji, przez co poprawia jakość produktów, powstających w wymienionych procesach biologicznych. Biowęgiel znalazł również swoje miejsce przy hodowli zwierząt jako dodatek do pasz, kiszzonek, odpadów pochodzenia zwierzęcego, do obróbki gnojowicy, bądź jako pochłaniacz odorów. Ponadto, może być wykorzystany w przemyśle włókienniczym przy produkcji odzieży termoaktywnej do pochłaniania wilgoci i zapachów, jako naturalny



Rys. 4. Charakterystyka procesu konwersji kiszonki kukurydzy  
 Fig. 4. Characteristics of corn silage conversion process



Rys. 5. Charakterystyka procesu konwersji pelletu świerkowo-sosnowego  
 Fig. 5. Characteristics of pine-spruce pellet conversion process

konserwant żywności, czy w przemyśle kosmetycznym do produkcji kremów i mydeł. Co więcej, toryfikat doskonale nadaje się do produkcji tynków budowlanych, izolacji oraz jako pochłaniacz wilgoci. Najczęściej jednak ze względu na jego wysoką wartość opałową oraz zbliżone do węgla właściwości strukturalne, biowęgiel opisuje się jako paliwo alternatywne, które może być współspalane w elektrowniach i elektrociepłowniach [9].

## Literatura

- [1] Saxena R.C., Adhikari D.K., Goyal H.B., *Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 167–178, 2009
- [2] Yang S.I., Wu M.S., Wu C.Y., *Application of biomass fast pyrolysis part I: Pyrolysis characteristics and products*, Energy 66, 162-171, 2014
- [3] Kufka D., Potewała K., *Adaptacja modułowego reaktora ciśnieniowego do testów pirolitycznej konwersji biomasy*, Górnictwo Odkrywkowe, Poltegor-Instytut, Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Nr 1/2015, 2015
- [4] De Wild PJ, Reith H, Heeres, HJ, *Biomass pyrolysis for chemicals*, Biofuels. 2 (2), 185 – 208, 2011

- [5] PN-75/C-04616.01. Woda i ścieki. Badania specjalne osadów. Oznaczanie zawartości wody, suchej masy, substancji organicznych i substancji mineralnych w osadach ściekowych. PKNMiJ, Warszawa
- [6] Stefanidis et al., *A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 105, 143–150, 2014
- [7] Yaman S., *Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks*, Energy Conversion and Management 45, 651–671, 2004
- [8] Schmidt H.P., *55 Uses of Biochar. Ithaca Journal 1*: 286–289, 2012, <http://www.ithaca-journal.net/druckversionen/e082012-55-uses-of-bc.pdf>.
- [9] Kufka D., *Biowęgiel - innowacyjny produkt recyklingu odpadów organicznych*, Zagadnienia aktualnie poruszane przez młodych naukowców 2 (1), 340, 2015

## IX MIĘDZYNARODOWY KONGRES GÓRNICTWA

### WĘGLA BRUNATNEGO BEŁCHATÓW

### „WĘGIEL BRUNATNY GWARANTEM BEZPIECZEŃSTWA ENERGETYCZNEGO”



Honorowy Patronat Kongresu  
Wicepremier Rzeczypospolitej Polskiej  
Minister Rozwoju

**MATEUSZ MORAWIECKI**



MINISTERSTWO  
ROZWOJU

### KOMUNIKAT NR 2

#### Organizatorzy:

**PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A.**  
**PGE GiEK S.A. Oddział Kopalnia Węgla Brunatnego Bełchatów**  
**SITG Oddział Bełchatów**



11 – 13.04.2016  
Bełchatów