

Możliwości wykorzystania mikroskopii optycznej w analizach próbek typu biochar na wybranych przykładach

Application of optical microscopy in biochar characterization on selected examples

Konrad Ziemianin

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Artykuł przedstawia wyniki przykładowych eksperymentów związanych z mikroskopową analizą próbek typu biochar/biowęgiel. Biochar jest produktem procesów termicznej dekompozycji (np. pirolizy) biomasy, za którą uważane są różnorodne naturalne materiały, mające swoje źródło w roślinach, zwierzętach i mikroorganizmach, takie jak fragmenty drzew, krzewów, traw, jak też glony, czy różnego rodzaju odpady przemysłowe – trociny, odpady związane z przetwórstwem żywności czy hodowlą zwierząt. Badania mikroskopowe biocharu, będące przedmiotem niniejszej publikacji, bazują na dwóch kluczowych informacjach, tj. składzie próbki i wynikach pomiaru refleksyjności. Uzyskane dane pozwalają na określenie, czy materiał jest jednorodny, oraz umożliwiają szacowanie jego stopnia uwęglenia. W ramach niniejszej pracy przebadano próbki biocharu powstałego z pirolizy w temperaturach od 500°C do 650°C, którego prekursorem był zróżnicowany materiał roślinny – konopie, słoma, trociny, łupiny orzecha i łuski słonecznika. Przeprowadzone badania wykazały zależność stopnia termicznego przeobrażenia analizowanych biocharów od takich parametrów, jak: czas i temperatura pirolizy, rodzaj zastosowanej biomasy, jak również stopień jej rozdrobnienia. Zdecydowana większość przebadanych próbek charakteryzowała się znacznym zróżnicowaniem obserwowanych fragmentów – od praktycznie nieprzeobrażonych (refleksyjność <0,2%), po fragmenty o znacznym stopniu uwęglenia i refleksyjności na poziomie 3–4%. Taki wybitnie niehomogeniczny skład biocharu ma wpływ na jego właściwości, a tym samym na możliwości jego wykorzystania w celach przemysłowych, rolniczych lub w różnorodnych aplikacjach środowiskowych. Zastosowanie tego typu badań jako elementu procesu produkcji biocharu może znacznie ułatwić jego optymalizację (zwłaszcza pod kątem doboru właściwej temperatury i czasu), tak by uzyskać najkorzystniejszy efekt ekonomiczny. Metody mikroskopowe mogą również służyć do oceny i kontroli jakości wyprodukowanego biocharu, co może decydować o kierunku jego wykorzystania.

Słowa kluczowe: biochar, biomasa, mikroskopia optyczna, refleksyjność, piroliza.

ABSTRACT: The article presents the results of exemplary experiments related to the microscopic analysis of biochar/biocoal samples. Biochar is a product of thermal decomposition processes (e.g. pyrolysis) of biomass, which includes various natural materials originating from plants, animals, and microorganisms, such as fragments of trees, shrubs, grasses, as well as algae or various types of industrial waste – sawdust, food processing waste, or animal breeding residues. Microscopic examination of biochar, which is the subject of this publication, is based on two key pieces of information – sample composition and reflectance measurement results. The data obtained allow determination of whether the material is homogeneous and estimation of its degree of carbonization. In this study, biochar samples produced from pyrolysis at temperatures ranging from 500 to 650°C were examined, using various plant precursors – hemp, straw, sawdust, nut shells, and sunflower husks. The conducted research demonstrated a dependence of the degree of thermal transformation of the analyzed biochars on parameters such as: the duration and temperature of pyrolysis, the type of biomass used, and its fragmentation level. The majority of the samples exhibited significant variability among observed fragments – ranging from practically untransformed (reflectance below <0.2%) to fragments with a high degree of thermal transformation and reflectance of 3–4%. This notably heterogeneous composition affects biochar properties and, consequently, its potential industrial and agricultural use or various environmental applications. Implementing such research into the biochar production process can significantly facilitate its optimization (especially in selecting appropriate temperature and time parameters) to achieve optimal economic outcomes. Microscopic methods can also serve for quality assessment of produced biochar, influencing decisions regarding its applications.

Key words: biochar, biomass, optical microscopy, reflectance, pyrolysis.

Wstęp

Biomasa uznawana jest za odnawialne źródło energii, a jej przetwarzanie i utylizacja są sposobem na redukcję emisji CO₂ do atmosfery, co z kolei ma wpływ na zmniejszenie efektu cieplarnianego (Shariff i in., 2014). Za biomasę uważane są różnorodne naturalne materiały, mające swoje źródło w roślinach, zwierzętach i mikroorganizmach, takie jak fragmenty drzew, krzewów, traw, jak też glony, czy różnego rodzaju odpady przemysłowe – trociny, odpady związane z przetwórstwem żywności czy hodowlą zwierząt (Yaman, 2004; Demirbas, 2009). Biochar jest produktem procesów termicznej dekompozycji (np. pirolizy). Pierwotnie produkowany był jako dodatek do gleby, w której m.in. przyczynia się do zwiększenia jej żyzności, wiąże N₂O, zwiększa chłonność i retencję wody (Lehmann i Joseph, 2009). Użyteczność uzyskanego biocharu zależy od jego cech fizycznych i chemicznych, a te mają bezpośredni związek zarówno z jego prekursorem (typem biomasy), jak też z temperaturą pirolizy (np. Kern i in., 2012; Ronsse i in., 2013; Zhang i in., 2017), która w większości prowadzonych badań mieści się w zakresie od 300°C do 900°C (Petersen i in., 2023). Wraz ze wzrostem temperatury pirolizy dochodzi do wzrostu stopnia uwęglania, który w przypadku najwyższych temperatur może osiągnąć około 75–80% wag., a nawet więcej (Chowdhury i in., 2016).

Jedną z metod analizy próbek typu biochar/biowęgiel jest mikroskopia optyczna, a konkretnie – obserwacje w świetle odbitym w imersji. W ramach analizy najczęściej charakteryzuje się morfologię obserwowanych fragmentów, jak również wykonuje się pomiary ich refleksyjności (np. Reza i in., 2014; Pohlmann i in., 2017; Mastalerz i in., 2023; Petersen i in., 2023). Na tle innych metod rutynowo stosowanych w badaniach próbek biocharów potencjał mikroskopii optycznej wydaje się jeszcze nie w pełni wykorzystywany (Mastalerz i in., 2023). Obecnie trwają prace nad systemem klasyfikacji próbek typu biochar, który na podstawie trzech cech morfologicznych charakteryzowałby obserwowane fragmenty. Cechy te to: stosunek długości do szerokości, grubość ścian komórkowych i porowatość. Kombinacja wymienionych cech dzieli obserwowane fragmenty na 9 różnych typów morfologicznych (Lester i in., 2018).

Celem niniejszego artykułu jest pokazanie przykładów zastosowania mikroskopii optycznej jako metody do charakterystyki produktów stałych pirolizy – biocharu. Badania mikroskopowe, opisujące skład i stopień uwęglania fragmentów materii organicznej, wydają się nieodzowne w procesie planowania warunków pirolizy, zwłaszcza w doborze właściwego czasu jej trwania, jak i zastosowanej temperatury. Parametry te decydują o cechach powstałego w trakcie tego procesu biocharu i muszą być tak dobrane, aby finalny produkt dało się wykorzystać do zamierzonych z góry celów.

Z ekonomicznego punktu widzenia najbardziej pożądane jest uzyskanie biocharu o zadowalających cechach przy jak najkrótszym czasie pirolizy i w jak najniższej temperaturze.

Metodyka

Obserwacje składu próbek i pomiary refleksyjności wykonywano na polerowanych zgładach przygotowanych zgodnie z procedurą ISO 7404-2 (2009) w świetle odbitym. Przeprowadzono je, stosując mikroskop Carl Zeiss Axioplan Imager.M2 do światła odbitego UV (wyposażony w lampę rtęciową HBO emitującą światło ultrafioletowe powodujące fluorescencję macerałów podczas ich naświetlania) oraz białego. Badania zgładów były wykonywane przy całkowitym powiększeniu 500× i zastosowaniu optyki immersyjnej (olejek immersyjny Immersol M, $n_e = 1,518$). Analizę ilościową przeprowadzono, zliczając od około 400 do 1000 punktów. W pomiarach refleksyjności (około 150 dla każdej z próbek) wykorzystywano ten sam mikroskop (Zeiss Axioplan) i stosowano obiektyw immersyjny o powiększeniu 50× oraz system fotometryczny MSP 200. Przed przystąpieniem do wykonania pomiarów mikroskop skalibrowano, używając do tego celu standardów o zdefiniowanej refleksyjności (granat $R_o = 1,71\%$, cyrkonia $R_o = 3,06\%$). W trakcie badań unikano pomiarów na fragmentach, których wielkość bądź jakość wypolerowanej powierzchni nie gwarantowały uzyskania wiarygodnego wyniku.

Badania podzielono na dwa etapy. W etapie pierwszym przebadano skład próbek, wyszczególniając 3 kategorie składników różniące się refleksyjnością. Wzrost refleksyjności poszczególnych fragmentów wynika ze wzrostu stopnia uwęglania, będącego konsekwencją procesu pirolizy. Wyróżniono tu fragmenty zmienione w bardzo niewielkim stopniu ($R_o < 0,2\%$), fragmenty o „średnim” stopniu przeobrażenia (R_o od 0,2% do około 1,8–2,0%) oraz te, które charakteryzowały się najwyższym poziomem uwęglania ($R_o > 2,0\%$). Udziały poszczególnych fragmentów wyliczono na podstawie analizy planimetrycznej, w trakcie której poszczególne fragmenty były przypisywane do wyróżnionych kategorii na podstawie wizualnej oceny i wstępnych pomiarów refleksyjności. W drugim etapie wykonano pomiary refleksyjności, które posłużyły do wyliczenia średniego R_o oraz wyznaczenia najwyższego uzyskanego wyniku (przy czym nie był to klasyczny pomiar R_{max} uzyskiwany w trakcie rotacji stolika).

Materiał badawczy

Dysponowano próbkami biocharu/biowęgla powstałego z pirolizy w temperaturach od 500°C do 650°C, którego

prekursorem był zróżnicowany materiał roślinny – konopie, słoma, trociny, łupiny orzecha i łuski słonecznika. Większość próbek utworzona była z mieszaniny fragmentów o zróżnicowanej wielkości – od <1 mm do około 15 mm. Wyjątek stanowiły próbki przeznaczone do badań zależności efektywności procesu pirolizy w odniesieniu do granulacji materiału źródłowego – tutaj próbki o „drobnej” frakcji utworzone były z fragmentów o maksymalnej wielkości sięgającej 0,5 mm. Zebrany materiał pochodził z eksperymentu nastawionego na produkcję biooleju z biomasy i był stałym produktem pirolizy traktowanym jako odpad.

Wyniki

Poniżej przedstawiono wyniki przykładowych eksperymentów związanych z mikroskopową analizą próbek typu biochar/biowęgiel. Badania te zawsze bazują na dwóch kluczowych informacjach, tj. składzie próbki i wynikach pomiaru refleksyjności. Dane pozwalają na określenie, czy materiał jest jednorodny, oraz umożliwiają szacowanie jego stopnia uwęglenia. Ma to znaczenie w produkcji biocharu/biowęgla na

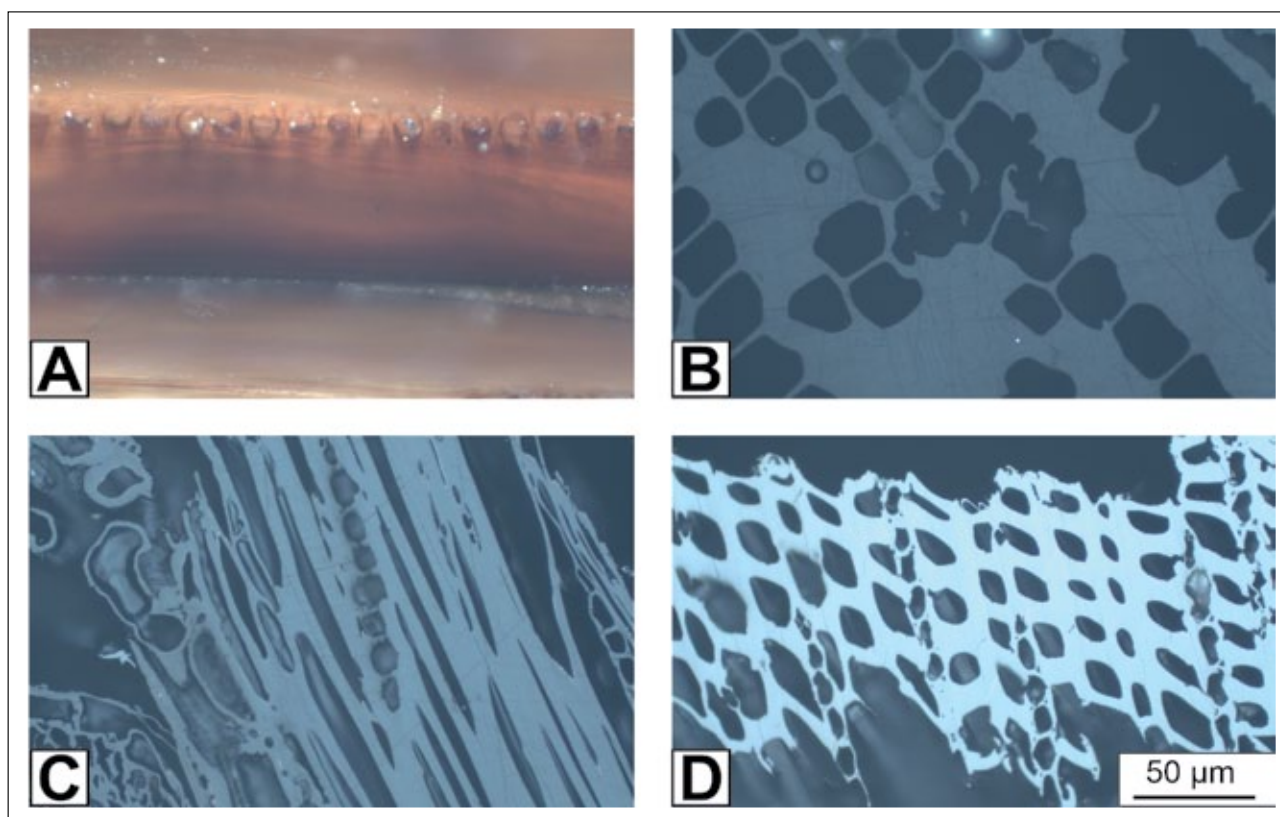
skalę przemysłową, w której uzyskanie jednorodnego produktu o określonym stopniu termicznego przeobrażenia jest kluczowe. Tymczasem przebadane próbki, niezależnie od typu biomasy, charakteryzowały się najczęściej niezwykle zróżnicowanym składem, co dobrze obrazują przykładowe fotografie (rysunki 1 i 2) czy histogramy pomiarów refleksyjności (rysunek 3).

Zmiana składu i stopnia uwęglenia fragmentów materii organicznej w zależności od typu zastosowanej biomasy i temperatury pirolizy

W tabeli 1 przedstawiono wyniki analizy składu i pomiarów refleksyjności próbek biocharu pochodzącego z pirolizy różnego typu biomasy (konopie, słoma, trociny, łupiny orzecha, łuski słonecznika).

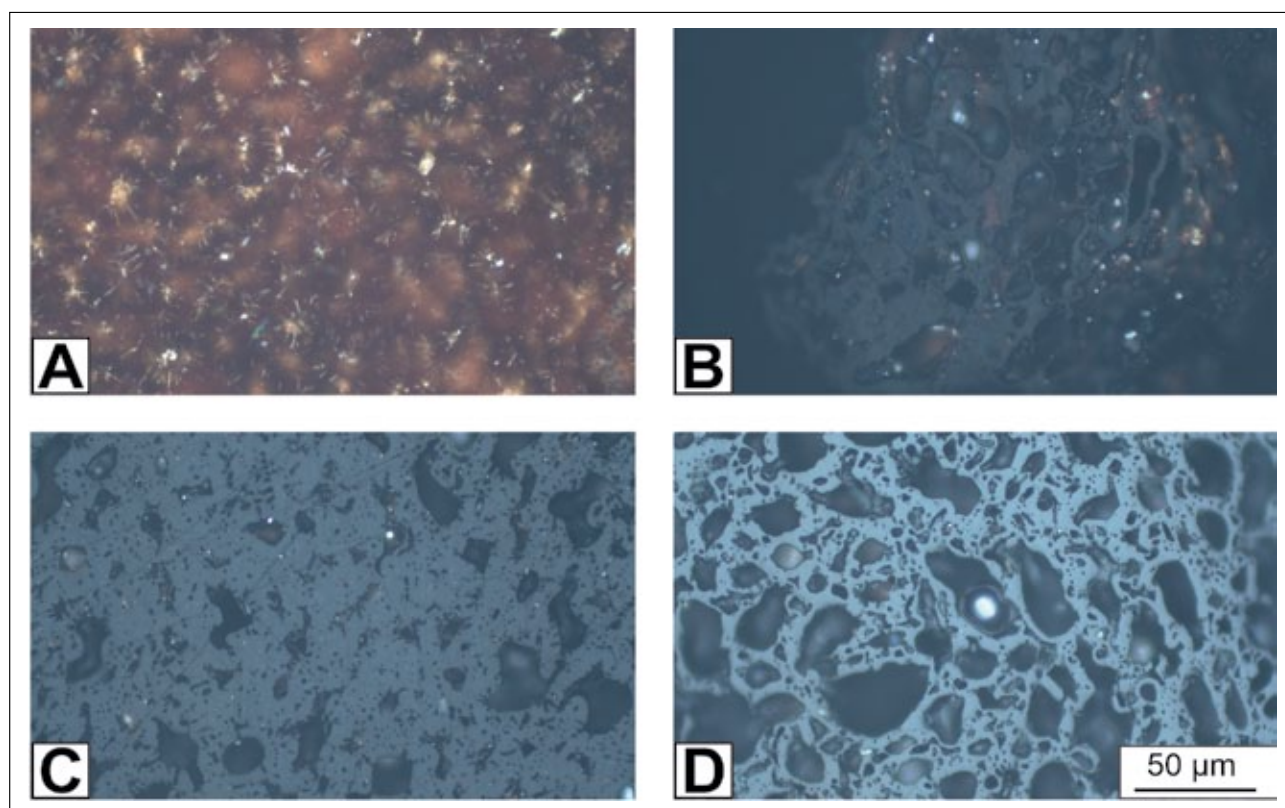
Niestety, nie dla każdego typu biomasy dysponowano kompletem wyników, niemniej pewne trendy wciąż są możliwe do zaobserwowania.

Na podstawie uzyskanych danych można wnioskować, że w temperaturze pirolizy 500°C znaczna część materiału nie zostanie przeobrażona lub osiągnie jedynie fazę początkowych przeobrażeń (tabela 2). W zależności od rodzaju biomasy udział tych fragmentów może wynosić od około 21% (orzech)



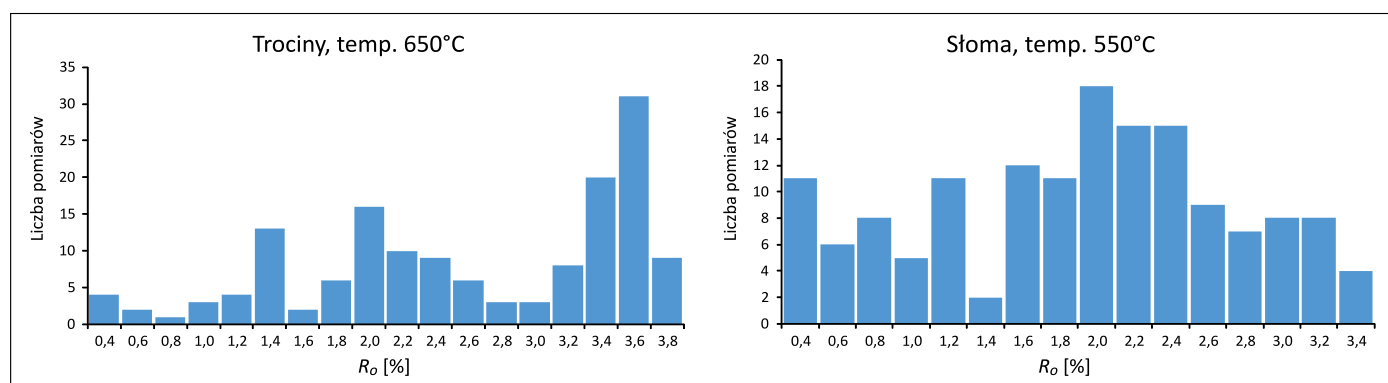
Rysunek 1. Przykład zmienności stopnia uwęglenia obserwowanych fragmentów w obrębie próbki biocharu powstałego w wyniku pirolizy trocin w temperaturze 600°C: A) fragment nieprzeobrażony lub w inicjalnej fazie przeobrażeń; B) $R_o = 0,57\%$; C) $R_o = 1,39\%$; D) $R_o = 3,39\%$

Figure 1. An example of the variability in the degree of carbonization among observed fragments within a biochar sample produced from sawdust pyrolysis at 600°C: A) untransformed fragment that or in the initial transformation phase; B) $R_o = 0.57\%$; C) $R_o = 1.39\%$; D) $R_o = 3.39\%$



Rysunek 2. Przykład zmienności stopnia uwęglenia obserwowanych fragmentów w obrębie próbki biocharu powstałego w wyniku pirolizy łupin orzecha w temperaturze 500°C: A) fragment w początkowej fazie przeobrażeń; B) $R_o = 0,26\%$; C) $R_o = 0,64\%$; D) $R_o = 1,76\%$

Figure 2. An example of the variability in the degree of carbonization among observed fragments within a biochar sample produced from nut shell pyrolysis at 500°C: A) fragment in the initial transformation phase; B) $R_o = 0.26\%$; C) $R_o = 0.64\%$; D) $R_o = 1.76\%$



Rysunek 3. Wyniki pomiarów refleksyjności dla przykładowych próbek powstałych z pirolizy trocin (temperatura pirolizy 650°C) i słomy (temperatura pirolizy 550°C). W obu przypadkach zwraca uwagę bardzo szeroki zakres uzyskanych wyników

Figure 3. Reflectance measurement results for samples obtained from sawdust pyrolysis (650°C) and straw pyrolysis (550°C). In both cases, the very wide range of results obtained is noteworthy

do około 30% (trociny). W tej samej temperaturze udział składników charakteryzujących się najwyższym stopniem przeobrażenia może wynieść od zaledwie około 2% (orzech) do 43% (konopie). Dalszy wzrost temperatury powoduje wzrost stopnia przeobrażenia fragmentów dotąd niezmienionych i tym samym wzrost udziału fragmentów grupy III (najwyżej przeobrażonych). W temperaturze 600°C najwięcej niskoprzeobrażonych fragmentów mają próbki konopi (około 23%) oraz

trociny (około 44%). Znacząco mniejszy udział (około 3,5%) mają takie fragmenty w próbce słomy, natomiast zarówno próbki orzecha, jak i słonecznika nie mają już na tym etapie fragmentów o tak niskim (grupa I) stopniu przeobrażenia. Jednocześnie udział fragmentów najwyżej przeobrażonych (grupa III) mieści się w przedziale od około 26–28% (trociny, orzech), przez około 46–48% (konopie, słoma), do około 71% (słonecznik). Dalszy wzrost temperatury (650°C) powoduje, że

Tabela 1. Wyniki analizy składu i refleksyjności dla próbek biocharu/biowęgla**Table 1.** Results of composition analysis and reflectance measurements for biochar/biocoal samples

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	Skład biocharu			Analiza refleksyjności R_o [%]			
		grupa I ($R_o < 0,2\%$)	grupa II (R_o od 0,2% do 1,8–2,0%)	grupa III ($R_o > 1,8–2,0\%$)	R_o	max	odchylenie standardowe	liczba pomiarów
Konopie	500	27,56	29,13	43,31	1,80	3,11	0,79	135
	550	26,39	26,98	46,63	1,86	3,08	0,84	122
	600	23,28	30,97	45,75	2,33	3,59	1,09	145
	650	16,29	29,90	53,81	1,81	4,05	1,24	125
Słoma	500	23,17	50,33	26,50	1,43	2,62	0,60	150
	550	9,04	54,65	36,30	1,81	3,31	0,83	150
	600	3,42	49,06	47,52	2,10	4,06	0,99	150
	650	0,00	50,70	49,30	2,41	3,71	0,94	150
Trociny	500	30,34	49,85	19,81	1,00	2,28	0,66	150
	550	25,66	39,31	35,03	1,69	2,82	0,82	150
	600	43,91	29,62	26,47	2,32	3,71	1,10	150
	650	0,00	49,13	50,87	2,51	3,74	0,96	150
Orzech	500	20,79	76,84	2,36	1,06	2,22	0,55	150
	600	0,00	72,27	27,73	2,02	3,24	0,55	150
	650	0,00	72,18	27,82	2,01	3,98	0,77	150
Słonecznik	600	0,00	28,77	71,23	3,15	4,16	0,89	150
	650	0,00	24,70	75,30	3,47	4,90	1,19	150

R_o – średnia refleksyjność; max. – najwyższy uzyskany wynik pomiaru refleksyjności

Tabela 2. Udział procentowy składników grupy I i III w zależności od surowca i temperatury pirolizy**Table 2.** Content of groups I and III depending on raw material and pyrolysis temperature

Skład próbek	Materiał źródłowy	Temperatura pirolizy [°C]			
		500	550	600	650
Grupa I ($R_o < 0,2\%$)	konopie	27,56	26,39	23,28	16,29
	słoma	23,17	9,04	3,42	0,00
	trociny	30,34	25,66	43,91	0,00
	orzech	20,79	×	0,00	0,00
	słonecznik	×	×	0,00	0,00
Grupa III ($R_o > 1,8–2,0\%$)	konopie	43,31	46,63	45,75	53,81
	słoma	26,50	36,30	47,52	49,30
	trociny	19,81	35,03	26,47	50,87
	orzech	2,36	×	27,73	27,82
	słonecznik	×	×	71,23	75,30

× – brak próbki

fragmenty niskoprzeobrażone obserwuje się jedynie w przypadku konopi, gdzie stanowią ok. 16%. Jednocześnie udział fragmentów grupy III osiąga wartość maksymalną (około 28% dla orzecha, około 51–54% dla trocin, słomy i konopi oraz około 75% dla słonecznika).

Wraz ze wzrostem temperatury coraz więcej fragmentów wykazuje zwiększony stopień uwęglania, co manifestuje się wzrostem średniej wartości R_o (tabela 3). Trend ten widoczny jest we wszystkich próbkach poza konopiami, w przypadku których przy większości temperatur średnie R_o wynosi około 1,8%. Być może jest to związane z faktem, że udział fragmentów o najwyższym stopniu uwęglania (grupa III) już przy temperaturze 500°C jest bardzo duży (około 43%), a wraz z jej wzrostem nie zmienia się on w tak dużym stopniu (finalnie około 54% przy temperaturze 650°C) jak w przypadku innych typów biomasy. Wspomniany przykład konopi jest jednocześnie materiałem, dla którego średnia refleksyjność R_o po pirolizie w temperaturze 650°C jest najniższa i wynosi 1,81%. Nieco wyższą wartość uzyskano dla orzecha (2,01%), słomy (2,41%) i trocin (2,51%), a zdecydowanie najwyższą zaobserwowano w przypadku słonecznika (3,47%).

Warto przyrzeć się również najwyższemu uzyskanemu wynikowi pomiaru refleksyjności (tabela 4), którego wartość rośnie wraz ze wzrostem temperatury od około 2–2,5% (orzech, trociny, słoma) lub około 3% (konopie) do około 3,7–4% (trociny, orzech, słoma i konopie), a nawet około 5% (słonecznik). Informacja taka daje wyobrażenie, jaki maksymalny poziom uwęglania można osiągnąć w danej temperaturze pirolizy przy zastosowaniu określonego typu surowca.

Tabela 3. Średnia wartość R_o w odniesieniu do typu materiału i temperatury pirolizy

Table 3. Mean R_o values depending on raw material and pyrolysis temperature

Materiał źródłowy	Temperatura pirolizy [°C]			
	500	550	600	650
Konopie (R_o)	1,80	1,86	2,33	1,81
Słoma (R_o)	1,43	1,81	2,10	2,41
Trociny (R_o)	1,00	1,69	2,32	2,51
Orzech (R_o)	1,06	×	2,02	2,01
Słonecznik (R_o)	×	×	3,15	3,47
× – brak próbki				

Tabela 4. Najwyższa uzyskana wartość pomiaru refleksyjności w odniesieniu do temperatury pirolizy i rodzaju surowca

Table 4. The highest obtained reflectance value obtained depending on raw material type and pyrolysis temperature

Typ surowca	Temperatura pirolizy [°C]			
	500	550	600	650
Konopie (R_o)	3,11	3,08	3,59	4,05
Słoma (R_o)	2,62	3,31	4,06	3,93
Trociny (R_o)	2,28	2,82	3,71	3,74
Orzech (R_o)	2,22	×	3,24	3,98
Słonecznik (R_o)	×	×	4,16	4,90
× – brak próbki				

Zmiana składu i stopienia uwęglenia fragmentów materii organicznej w zależności od czasu pirolizy

Przeprowadzono pirolizę 4 próbek trocin, trwającą kolejno 30, 90, 180 i 360 minut, a następnie zbadano skład uzyskanego biocharu i wykonano pomiary refleksyjności. Wyniki przedstawiono w tabeli 5. Skład przebadanych próbek wydaje się zbliżony i niezależny od czasu pirolizy. Obserwuje się jedynie nieco podwyższony udział fragmentów nieprzeobrażonych lub przeobrażonych w niewielkim stopniu w próbce poddanej pirolizie w najkrótszym czasie. Brak widocznych zmian w składzie w stosunku do czasu analizy jest niewątpliwie efektem

szerokiego zakresu zmienności refleksyjności przyjętego dla grupy II. Aby uchwycić dynamikę tych pozornie niewidocznych zmian, konieczne są pomiary refleksyjności, które pozwalają uwidoczniać pewne trendy. Średnia refleksyjność wydaje się mianowicie wzrastać wraz z czasem pirolizy, choć próbka poddana pirolizie przez 180 minut osiąga wartość niższą niż spodziewana. Być może jest to problem wynikający z niewystarczającej reprezentatywności obserwowanej powierzchni preparatu w stosunku do objętości próbki. Bardzo dobrze widoczny jest za to wzrost maksymalnego uzyskanego wyniku pomiaru refleksyjności, który zmienia się od 3,27% do 4,21%.

Wpływ wielkości fragmentów biomasy na parametry biocharu

Na przykładzie próbek uzyskanych z pirolizy fragmentów słomy i trocin zbadano, czy granulacja użytej biomasy ma wpływ na stopień jej termicznego przeobrażenia. W tym celu pirolizie poddano próbki różniące się wielkością tworzących je fragmentów – jedną po wstępnym rozdrobnieniu, a drugą po rozdrobnieniu do frakcji 0,5 mm. Wyniki przedstawiono w tabeli 6. Jednoznacznie wskazują one na zdecydowanie wyższy stopień transformacji termicznej fragmentów bardziej rozdrobnionych. Świadczy o tym zarówno skład próbek, jak też pomiary refleksyjności. Oznacza to, że biochar o preferowanych właściwościach można potencjalnie uzyskać w trakcie pirolizy w niższej temperaturze, o ile biomasa zostanie odpowiednio rozdrobniona.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że parametry biocharu uzyskanego w wyniku pirolizy biomasy zależą od takich czynników jak: temperatura, czas, granulacja czy typ materiału źródłowego. Jest to szereg zmiennych, których wpływ wymaga dalszych, bardziej szczegółowych badań, najlepiej w połączeniu z innymi geochemicznymi metodami analitycznymi.

Zaprezentowane przykładowe eksperymenty wskazują, że mikroskopia optyczna może z powodzeniem służyć do scharak-

Tabela 5. Charakterystyka biocharu powstałego z trocin w trakcie pirolizy o zmiennym czasie t

Table 5. Characteristics of biochar produced from sawdust in relation to varying pyrolysis time t

Czas pirolizy [min]	Skład biowęgla [%]			Analiza refleksyjności R_o [%]			
	grupa I (R_o do 0,2%)	grupa II (R_o 0,2 – około 1,8%)	grupa III (R_o > 1,8%)	R_o	max	odchylenie standardowe	liczba pomiarów
30	5,94	19,41	74,65	2,16	3,27	0,81	150
90	1,15	24,24	74,62	2,34	3,43	1,00	150
180	1,99	20,68	77,34	2,03	3,71	1,18	150
360	1,50	28,33	70,17	2,50	4,21	1,20	150
R_o – średnia refleksyjność; max – najwyższy uzyskany wynik pomiaru refleksyjności							

Tabela 6. Wyniki analizy mikroskopowej próbek biocharu uzyskanego w wyniku pirolizy materiału wyjściowego o różnym stopniu rozdrobnienia

Table 6. Microscopic analysis results of biochar samples obtained from pyrolysis of raw materials with varying particle sizes

Typ biomasy	Fracja	Temperatura pirolizy [°C]	Skład próbek			Analiza refleksyjności R_o			
			grupa I ($R_o < 0,2\%$)	grupa II (R_o od 0,2% do 1,8–2,0%)	grupa III ($R_o > 1,8–2,0\%$)	R_o	max	odchylenie standardowe	liczba pomiarów
Słoma	gruba (kilka mm)	600	3,42	49,06	47,52	2,10	4,06	0,99	150
	drobna (0,5 mm)	600	0,75	33,58	65,67	2,65	3,93	1,05	150
Trociny	gruba (kilka mm)	550	7,68	42,91	49,41	1,57	3,00	0,18	150
	drobna (0,5 mm)	550	2,77	18,48	78,75	2,25	3,34	0,25	150

teryzowania próbek typu biochar/biowęgiel. Charakterystyka ta jest niewątpliwie bardzo pomocna w analizie jednorodności uzyskanego materiału, a także w określeniu stopnia zaawansowania przemian termicznych. Aplikacja tego typu badań jako elementu procesu produkcji biocharu może znacznie ułatwić jego optymalizację (zwłaszcza w zakresie doboru właściwej temperatury i czasu), tak by uzyskać najkorzystniejszy efekt ekonomiczny. Metody mikroskopowe mogą również służyć do oceny jakości tego typu produktów, co może decydować o kierunku ich wykorzystania.

Podziękowania

Autor chciałby podziękować pracownikom Zakładu Dodatków i Nowych Technologii Chemicznych Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego za przeprowadzenie procesu pirolizy i udostępnienie próbek biocharu do badań.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Opracowanie technologii pirolizy biomasy odpadowej ukierunkowanej na pozyskanie produktów ciekłych*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0042/SG/2024, nr archiwalny: DK-4100-0045/2024.

Literatura

- Chowdhury Z.Z., Karim M.Z., Ashraf M.A., Khalid K., 2016. Influence of carbonization temperature on physicochemical properties of biochar derived from slow pyrolysis of durian wood (*Durio zibethinus*) sawdust. *BioResources*, 11(2): 3356–3372. DOI: 10.15376/biores.11.2.3356-3372.
- Demirbas A., 2009. Fuels from biomass. Chapter 2. [W:] Demirbas A. (eds.), *Biohydrogen for future engine fuel demands*. Springer, London, 43–57. DOI: 10.1007/978-1-84882-511-6.
- Kern S., Halwachs M., Kampichler G., Pfeifer C., Pröll T., Hofbauer H., 2012. Rotary kiln pyrolysis of straw and fermentation residues in a 3 MW pilot plant – Influence of pyrolysis temperature on pyrolysis product performance. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 97: 1–10. DOI: 10.1016/j.jaap.2012.05.006.
- Lehmann J., Joseph S., 2009. Biochar for environmental management: An introduction. [W:] Lehmann J., Joseph S. (eds.), *Biochar for environmental management-science and technology*. Earthscan, London, 1–9.

- Lester E., Avila C., Pang C.H., Williams O., Perkins J., Gaddipatti S., Tucker G., Barraza J.M., Trujillo-Uribe M.P., Wu T., 2018. A proposed biomass char classification system. *Fuel*, 232: 845–854. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.05.153.
- Mastalerz M., Drobniak A., Briggs D., Bradburn J., 2023. Variations in microscopic properties of biomass char: Implications for biochar characterization. *International Journal of Coal Geology*, 271: 104235. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104235.
- Petersen H.I., Lassen L., Rudra A., Nguyen L.X., Do P.T.M., Sanei H., 2023. Carbon stability and morphotype composition of biochars from feedstocks in the Mekong Delta, Vietnam. *International Journal of Coal Geology*, 271: 104233. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104233.
- Pohlmann J.G., Osório E., Vilela A.C.F., Diez M.A., Borrego A.G., 2017. Pulverized combustion under conventional (O_2/N_2) and oxy-fuel (O_2/CO_2) conditions of biomasses treated at different temperatures. *Fuel Processing Technology*, 155: 174–182. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.05.025.
- Reza T.M., Borrego A.G., Wirth B., 2014. Optical texture of hydrochar from maize silage and maize silage digestate. *International Journal of Coal Geology*, 134–135: 74–79. DOI: 10.1016/j.coal.2014.09.015.
- Ronsse F., van Hecke S., Dickinson D., Prins W., 2013. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy*, 5: 105–115. DOI: 10.1111/gcbb.12018.
- Shariff A., Abdullah N., Aziz S., 2014. Slow Pyrolysis of Oil Palm Empty Fruit Bunches for Biochar Production and Characterisation. *Journal of Physical Science*, 25(2): 97–112.
- Yaman S., 2004. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 45(5): 651–671. DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00177-8.
- Zhang H., Chen C., Gray E.M., Boyd S.E., 2017. Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. *Biomass Bioenergy*, 105: 136–146. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.06.024.



Dr Konrad ZIEMIANIN

Adiunkt w Zakładzie Geologii i Geochemii
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: konrad.ziemianin@inig.pl