NAFTA-GAZ

Nafta-Gaz 2026, tom 82, nr 5, s. 478–490, DOI: 10.18668/NG.2026.05.04

Mikroskopia optyczna w analizie biocharu: refleksyjność, skład oraz aspekty metodyczne

Optical microscopy for biochar analysis: insights into reflectance, composition and methodological considerations

Konrad Ziemianin

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Biochar jest bogatym w węgiel materiałem, powstającym w procesie pirolizy biomasy, który zyskuje coraz większe znaczenie w zastosowaniach środowiskowych i przemysłowych. Pomimo rosnącego zainteresowania biocharem potencjał mikroskopii optycznej w jego charakterystyce pozostaje wciąż niewystarczająco wykorzystany. Celem niniejszej pracy jest ocena przydatności mikroskopii w świetle odbitym do analizy biocharu, ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów refleksyjności oraz analizy składu. Próbki biocharu uzyskano poprzez pirolizę biomasy (słoma, trociny) w zakresie temperatur od 500°C do 650°C i poddano szczegółowym badaniom mikroskopowym. Analizowano zmienność refleksyjności (R_o), reprezentatywność subpróbek, a także wpływ frakcji ziarnowej oraz liczby pomiarów na wiarygodność wyników. Wyniki wskazują na systematyczny wzrost średniej refleksyjności wraz ze wzrostem temperatury pirolizy, co odzwierciedla postępujący stopień uwęglenia materiału. Jednocześnie wszystkie próbki charakteryzują się wysoką heterogenicznością, przejawiającą się szerokim zakresem wartości R_o. Wykazano, że pojedyncza subpróbka, otrzymana w wyniku kruszenia i kwartowania, jest wystarczająca do uzyskania reprezentatywnych wyników zarówno w zakresie refleksyjności, jak i składu. Istotnym wynikiem pracy jest określenie minimalnej liczby pomiarów refleksyjności niezbędnej do uzyskania stabilnych wyników, wynoszącej co najmniej 350 pomiarów. Ponadto wykazano istotny wpływ frakcji ziarnowej na wyniki analiz. Połączenie analizy morfologicznej z klasyfikacją opartą na refleksyjności (podział na frakcje reaktywne i nieraktywne) umożliwia bardziej kompleksową charakterystykę biocharu. Otrzymane wyniki wskazują na duży potencjał mikroskopii optycznej jako metody wspierającej ocenę właściwości biocharu oraz standaryzację procedur analitycznych.

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

ABSTRACT: Biochar is a carbon-rich material produced through the pyrolysis of biomass, which is gaining increasing importance in environmental and industrial applications. Despite the growing interest in this material, the potential of optical microscopy for its characterization remains underutilized. The aim of this study is to evaluate the applicability of reflected light microscopy for the analysis of biochar, with particular emphasis on reflectance measurements and compositional analysis. Biochar samples were obtained in process of biomass (straw, sawdust) pyrolysis at temperatures ranging from 500°C to 650°C and subjected to detailed microscopic examination. The variability of reflectance (R_o), the representativeness of subsamples, and the influence of grain size fraction and the number of measurements on the reliability of results were analyzed. The results indicate a systematic increase in average reflectance with increasing pyrolysis temperature, reflecting the progressive carbonization of the material. At the same time, all samples exhibit high heterogeneity, manifested by a wide range of R_o values. It was demonstrated that a single subsample, obtained through crushing and quartering, is sufficient to obtain representative results in terms of both reflectance and composition. An important outcome of the study is the determination of the minimum number of reflectance measurements required to achieve consistent results, which is at least 350 measurements. Furthermore, a significant influence of grain size fraction on analytical results was observed. The combination of morphological analysis with reflectance-based classification (division into reactive and non-reactive fractions) enables a more comprehensive characterization of biochar. The obtained results indicate a high potential of optical microscopy as a method supporting the assessment of biochar properties and the standardization of analytical procedures.

Keywords: biochar, optical microscopy, reflectance, pyrolysis, heterogenity.

Autor do korespondencji: K. Ziemianin, e-mail: *konrad.ziemianin@inig.pl*

Artykuł nadesłano do Redakcji: 04.02.2026 r. Zatwierdzono do druku: 13.08.2026 r.

Wstęp

Artykuł poświęcony jest mikroskopowej analizie biocharu (biowęgla), którego popularność, ze względu na szerokie spektrum zastosowań i jednocześnie istotną rolę w polityce klimatycznej oraz dążeniu do zeroemisyjności, stale rośnie. Skalę tego zjawiska odzwierciedlają dane wskazujące na wzrost rocznej światowej produkcji z ok. 96 tys. ton w 2021 roku do 352 tys. ton w 2023 roku (International Biochar Initiative, 2024). Według szacunków wartość rynku biocharu w 2024 roku wyniosła ok. 763 mln USD, a w 2025 roku już 859 mln USD. Prognozy wskazują, że w 2032 roku wartość ta może wzrosnąć do blisko 2100 mln USD (Fortune Business Insights, 2024). Tak wyraźny trend wzrostowy wskazuje, że biochar staje się materiałem wymagającym szczegółowych i wieloaspektowych badań laboratoryjnych.

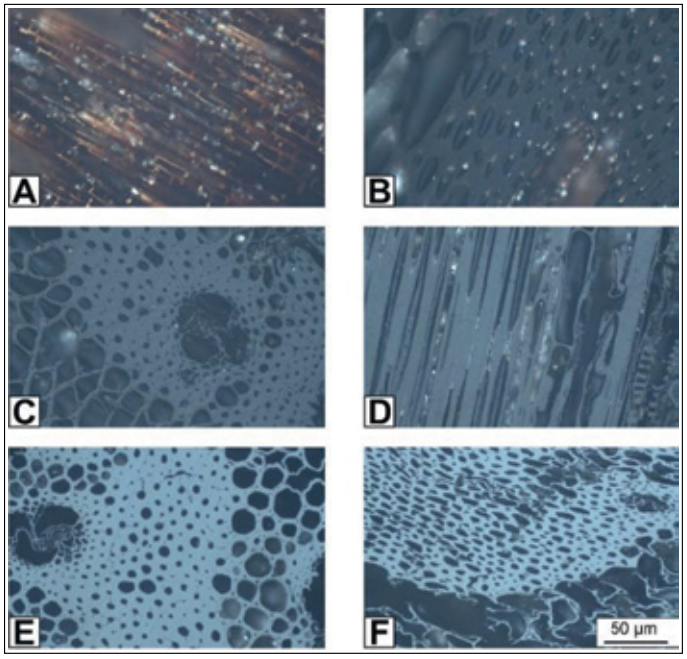
Biochar pod kątem analiz mikroskopowych jest materiałem wyraźnie odbiegającym od materii organicznej węgli i łupków. Jego cechą charakterystyczną jest heterogeniczność, przejawiająca się w bardzo szerokim zakresie zmienności stopnia przeobrażenia obserwowanych fragmentów (wartości refleksyjności R_o od ok. 0,1–0,2% do 2–3% lub wyższe w obrębie analizowanej próbki – rysunek 1). Stanowi to istotne wyzwanie dla charakterystyki mikroskopowej tego typu materiału.

Celem pracy była ocena przydatności mikroskopii optycznej w świetle odbitym do charakterystyki biocharu, ze szczególnym uwzględnieniem analizy refleksyjności oraz składu morfologicznego. Dodatkowo podjęto próbę określenia wpływu liczby pomiarów, frakcji ziarnowej oraz sposobu przygotowania próbek na wiarygodność uzyskiwanych wyników. Aktualność podjętej tematyki i ważność przedstawionych w niniejszym artykule wyników widoczna jest w najnowszych publikacjach (Drobniak i in., 2025; Sanei i in., 2026).

Biochar – zarys zagadnienia

Biochar (biowęgiel) jest bogatym w pierwiastek węgiel produktem otrzymywanym w wyniku pirolizy, która polega na termicznym rozkładzie biomasy w środowisku o ograniczonym dostępie tlenu. Jest to materiał o wysokiej stabilności chemicznej i dużej powierzchni właściwej, dzięki czemu znajduje zastosowanie w obszarach związanych ze środowiskiem, wskazanych poniżej.

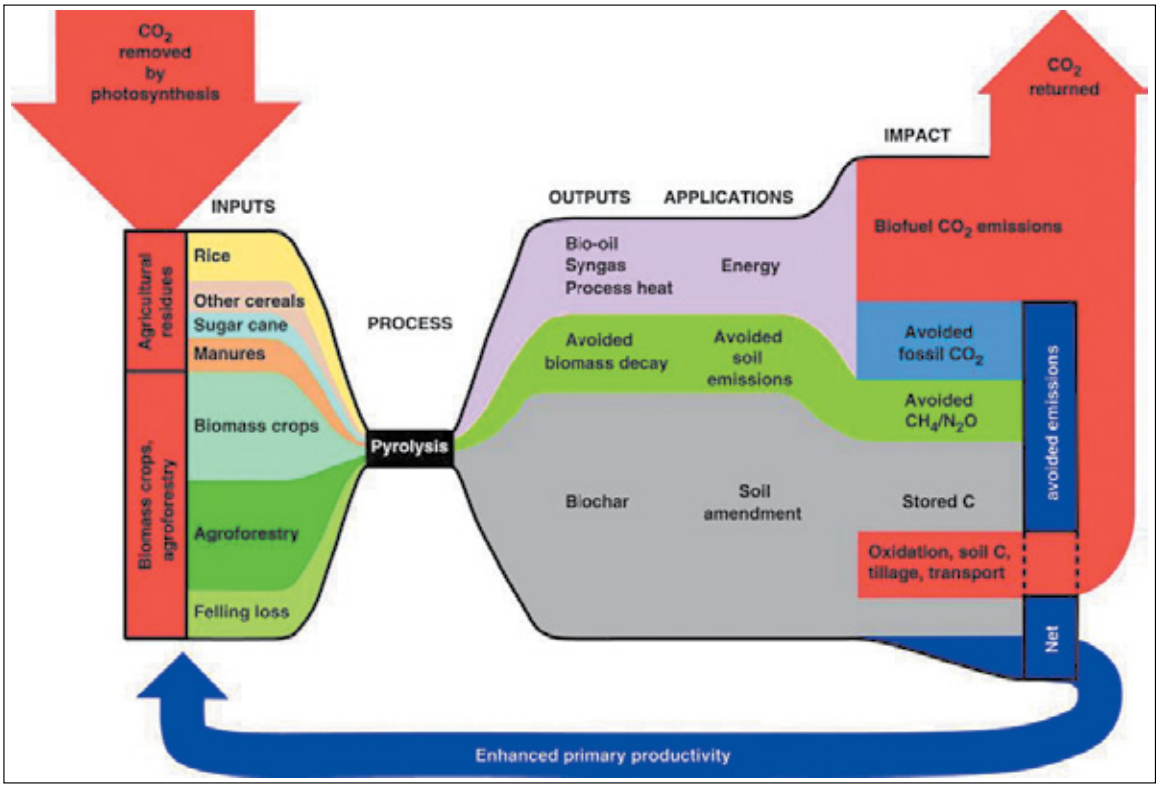
1. Poprawa jakości gleby i produktywności roślin (Jeffery i in., 2011; Ye i in., 2020; Hosseini Bai i in., 2022), np. poprzez stymulację wzrostu korzeni (Xiong i in., 2017) czy intensyfikację procesu fotosyntezy (He i in., 2020). Jego aplikacja do gleby, zwłaszcza wraz z nawozem, przyczynia się do zwiększenia masy mikrobialnej (Liu i in., 2016; Zhang i in., 2018; Pokharel i in., 2020), a także podwyższenia jej pH oraz zwiększenia dostępności takich kluczowych pierwiastków jak azot, fosfor, potas, molibden czy bor (Liu i in. 2018). Aplikacja biocharu do gleby zwiększa retencję wody w glebie, czyniąc ją bardziej dostępną dla roślin (Conte i Schmidt, 2017; Edeh i in., 2020). Wiele badań (Prost i in., 2012; Kammann i in., 2015; Godlewska i in., 2017; Hagemann i in., 2017a, 2017b; Sanchez-Monedero i in., 2018) wskazuje również, że biochar wpływa na polepszenie procesu kompostowania i własności uzyskiwanego kompostu.



Rysunek 1. Przykład zmienności stopnia przeobrażenia fragmentów biocharu powstałego ze słomy (temp. pirolizy 500°C). A: Fragment w początkowej fazie przeobrażeń; B: R_o = 0,28%; C: R_o = 0,69%; D: R_o = 0,93%; E: R_o = 1,81%; F: R_o = 2,26%. Zdjęcia mikroskopowe w świetle odbitym i immersji

Figure 1. Example of variability in the degree of carbonization of biochar fragments derived from straw (pyrolysis temperature 500°C). A: fragment at an early stage of transformation. B: R_o = 0,28%; C: R_o = 0,69%; D: R_o = 0,93%; E: R_o = 1,81%; F: R_o = 2,26%. Photomicrographs in reflected light, oil immersion

2. Sekwestracja węgla – aplikacja biocharu jako metody sekwestracji węgla była dyskutowana od początków XXI w. (Lehmann i in., 2006; Laird, 2008; Woolf i in., 2010). Zakłada się, że wprowadzony do gleby biochar, dzięki swojej dużej odporności, może przetrwać w niej kilka stuleci (Zimmerman i Gao, 2013; Lehmann i in., 2015; Sanei i in., 2026). Symulacje (Wang i in., 2016) sugerują czas rozpadu szacowany nawet na ponad 500 lat. Wprowadzenie biocharu do gleby przyczynia się do redukcji emisji tak istotnych gazów cieplarnianych jak CH_4, CO_2 czy NO_2 (Lehmann i in., 2006; Lehmann i Joseph, 2015, He i in.,



Rysunek 2. Wpływ aplikacji biocharu na emisję gazów cieplarnianych (Woolf i in., 2010)
Figure 2. Effect of biochar application on greenhouse gas emissions (Woolf et al., 2010)

2017). W przypadku NO_2 jest to ograniczenie emisji aż o średnio 54% (Cayuela i in., 2014). Mechanizm uniknięcia emisji tych gazów z gleby do atmosfery został przedstawiony na rysunku 2.

3. Remediacja zanieczyszczonych gleb – biochar wprowadzony do skażonych gleb w znacznym stopniu wiąże takie pierwiastki jak chrom, ołów, kadm, miedź, cynk, nikiel i mangan (Peng i in. 2018). Według Gholizadeha i Hu (2021) biochar może usunąć aż 80% metali ciężkich z gleby. Usuwa także pestycydy (Su i in., 2016; Zhang i in., 2016).
4. Oczyszczanie wód i ścieków – biochar zaaplikowany do zanieczyszczonych wód i ścieków, dzięki swoim właściwościom adsorpcyjnym, doskonale nadaje się do wiązania metali ciężkich, takich jak Cu, Zn, Hg, Cd, Pb, Sn, Mn, As, Cr, Co, Ni, Ag, czy Al (Wang i in., 2020; Qiu i in., 2021). Może również być zastosowany do usuwania leków (Chauhan i in., 2023; Sen i in., 2023).

Biochar znajduje zastosowanie również w przemyśle i energetyce, gdzie służy m.in. jako nośnik katalizatorów (Cao i in., 2017; Xiong i in., 2017), adsorbent gazów (Dissanayake i in., 2020; Sadegh i in., 2024) oraz jako dodatek do materiałów kompozytowych i budowlanych (Das i in., 2021; Giorcelli i in., 2019; Aboughaly i in., 2023). Wykorzystuje się go również jako paliwo stałe – substytut węgla kamiennego (Kluska i Ramotowski, 2024; Setyawan i in., 2024; Wang i in., 2025), materiał anodowy w superkondensatorach i bateriach (Prabakar i in., 2024; Seroka i in., 2024) czy jako katalizator w produkcji biogazu i biopaliw (Lee i in., 2017; Kumar i in., 2023).

Mikroskopia optyczna w badaniu biocharu

Jedną z metod analizy próbek typu biochar jest mikroskopia optyczna, a szczególnie obserwacje w świetle odbitym w imersji. W ramach analizy najczęściej charakteryzuje się morfologię obserwowanych fragmentów, jak również wykonuje się pomiary ich refleksyjności (np. Toufiq Reza i in., 2014; Pohlmann i in., 2017; Mastalerz i in., 2023; Petersen 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). Jak dotąd nie ma jednolitego systemu klasyfikacji mikroskopowej biocharu. Jedną z propozycji jest klasyfikacja na podstawie trzech cech morfologicznych, które charakteryzowałyby obserwowane fragmenty. Cechy te to: stosunek długości do szerokości, grubość ścian komórkowych i porowatość. Kombinacja wymienionych cech dzieli obserwowane fragmenty na różne typy morfologiczne (Lester i in., 2018). W 2024 roku opublikowany został atlas obrazów mikroskopowych biocharów, dokumentujący ich różnorodność morfologiczną (Drobniak i in., 2024).

Pomimo możliwości pozyskania kluczowych z punktu widzenia charakterystyki i zastosowania biocharu danych, takich jak opis morfologii, porowatości czy zmienność stopnia termicznego przeobrażenia, badania z wykorzystaniem

wyników analizy mikroskopowej są jeszcze stosunkowo nieliczne. W ostatnim czasie dużą wagę przywiązuje się do możliwości zastosowania mikroskopii optycznej w szacowaniu stabilności biocharu (Petersen i in., 2023; Chiaramonti i in., 2024; Rudra i in., 2024; Sanei in., 2024; Mastalerz i in., 2025; Lis i in., 2026; Sanei i in., 2026). W badaniach tych wykorzystuje się pomiary refleksyjności – zwykle jest to 500 pomiarów na próbkę (Petersen i in., 2023; Chiaramonti i in., 2024; Rudra i in., 2024), chociaż 200 pomiarów było również rekomendowaną liczbą (Mastalerz i in., 2023, 2025). Kluczową wartością jest tu Ro na poziomie 2,0%, co uznaje się za próg biocharu nieaktywnego (Sanei i in., 2024; Mastalerz i in., 2025).

Materiał badawczy i metodyka

Niniejszą pracę zrealizowano, wykorzystując próbki biocharu uzyskanego w wyniku pirolizy słomy pszenżyta oraz trocin drzew iglastych. Piroliza została przeprowadzona w czterech temperaturach: 500°C, 550°C, 600°C oraz 650°C, w reaktorze EL21010Sylant-INIG firmy PID ENG&TECH o pojemności roboczej 2 litry i zakresie pracy do 700°C i 1,8 MPa. Szybkość grzania została ustalona na 30°C/min, czas utrzymywania temperatury docelowej – 30 min, przepływ gazu obojętnego – 100 ml/min Uzyskana ilość biocharu w trakcie pirolizy była niewielka – objętość próbek nie przekroczyła 100 cm^3.

Próbki biocharu pochodzącego ze słomy (dla wszystkich temperatur) zostały ręcznie rozkruszone w moździerzu, przy czym celem tego działania nie było uzyskanie jak najdrobniejszej frakcji, a jedynie zredukowanie rozmiarów fragmentów do ok. 1–2 mm. Rozkruszone próbki przesiano następnie przez sita o rozmiarach oczek: 1 × 1 mm, 0,63 × 0,63 mm i 0,1 × 0,1 mm. Taki dobór sit różni się od tradycyjnego podejścia, wykorzystywanego w preparatyce np. węgli. W przypadku węgli pokruszone fragmenty mają podobne wymiary we wszystkich kierunkach, więc chcąc uzyskać frakcję 1–2 mm, używa się sita o wymiarach oczka 1 × 1 mm. W przypadku biocharu fragmenty wchodzące w jego skład charakteryzują się dość znacznym wydłużeniem w porównaniu ze stosunkowo niewielką średnicą, co wymusza zastosowanie sit o mniejszych oczkach dla zatrzymania grubszej frakcji. Po przesianiu przez sita zebrano materiał do badań: w przypadku próbki pirolizowanej w temperaturze 500°C był to materiał zgromadzony na sicie 0,63 mm, w przypadku pozostałych pobrano materiał zgromadzony na sicie 0,1 mm. Takie działanie miało na celu sprawdzenie możliwości badawczych dla różnych frakcji biocharu. Następnie każdą próbkę podzielono metodą kwartowania i pobrano 4 subpróbki (każda o objętości 5 cm^3). Ważne było tu uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy wyniki badań przeprowadzonych na subpróbkach pobranych z większej objętości próbki oryginalnej są porównywalne, co ma znaczenie dla doboru ich liczby i szacowania zmienności uzyskanych wyników. Łączna liczba próbek biocharu pochodzącego z pirolizy słomy wyniosła 16.

Próbki biocharu pochodzącego z trocin nie zostały rozkruszone w moździerzu, a jedynie przesiane przy użyciu tego samego zestawu sit. Następnie pobrano materiał zgromadzony na każdym z sit oraz materiał, który był tak drobny, że przeszedł przez sito o najdrobniejszym oczku – dla każdej próbki uzyskano 4 subpróbki, różniące się wielkością fragmentów. Docelowo starano się uzyskać 5 cm^3 każdej z 16 próbek, jednak zaobserwowano wyraźny spadek objętości próbek wraz z malejącym rozmiarem fragmentów. Szczególnie było to widoczne dla próbek o frakcji najdrobniejszej, w przypadku których uzyskano jedynie <0,5 cm^3 materiału. Celem takiego opróbowania było zbadanie, czy skład i stopień przeobrażenia próbek mają związek z wielkością fragmentów poddanych pirolizie. Istnienie takich związków zasygnalizowali Drobniak i in. (2025), którzy wykazali zmienność uzyskiwanych wyników pomiarów refleksyjności w zależności od frakcji badanego biocharu.

Łącznie dysponowano 32 próbkami, z których przygotowano polerowane zgłady, odpowiednie do analiz mikroskopowych w świetle odbitym. Analizy mikroskopowe skupiły się na dwóch aspektach. Były to pomiary refleksyjności, wykonane w celu prześledzenia jakościowych zmian w stopniu uwęglenia próbek, oraz charakterystyka ich składu. Badania przeprowadzono przy użyciu mikroskopu optycznego Zeiss Axio Imager M2 w świetle odbitym i imersji, przy zastosowaniu powiększenia 500×. Mikroskop skalibrowano, wykorzystując następujące wzorce: szafir (R_o = 0,593%), granat itrowo-glinowy (YAG, R_o = 0,900%) oraz granat gadolinowo-galowy (GGG, R_o = 1,710%).

Z uwagi na heterogeniczność próbek starano się wykonać zawsze maksymalną możliwą liczbę pomiarów refleksyjności, jednak niewiększą niż 600. Pułap ten określono ze względu na chęć prześledzenia wpływu liczby pomiarów na wyniki analizy. Mastalerz i in. (2025) rekomendują 200 pomiarów na próbce, na podstawie obserwowanych różnic średniej refleksyjności pomiędzy 100, 200, 300, 400 i 500 pomiarami.

Drugim aspektem badań była analiza składu, wykonana metodą planimetru punktowego. Skupiono się tu na cechach morfologicznych i stopniu przeobrażenia, gdyż mają one wpływ na parametry uzyskanego biocharu, co w konsekwencji może przesądzać o jego późniejszym zastosowaniu. Wyróżniono fragmenty nisko przeobrażone (o refleksyjności do ok. 0,2%) oraz fragmenty o wyższym stopniu przeobrażenia, wśród których dodatkowo wyróżniono fragmenty porowate oraz nieporowate (lub o niskiej porowatości). Taki podział ma potencjał do późniejszej rozbudowy o typy porowatości we fragmentach porowatych, które mogą mieć różne właściwości

(Mastalerz i in., 2023). Podobnie jak w przypadku analizy refleksyjności starano się określić maksymalną liczbę punktów, niejednokrotnie znacznie przekraczającą 350–500.

Analiza składu została także przeprowadzona na podstawie wyników analizy refleksyjności. Ten sposób nie charakteryzuje cech morfologicznych, ale pozwala wydzielić frakcje: reaktywną (R_o do 1,5%), przejściową (R_o od 1,5% do 2%) i niereaktywną (R_o > 2,0%), co jest istotne pod kątem szacowania stabilności biocharu.

Wyniki i dyskusja

Analiza refleksyjności

Wyniki analizy refleksyjności przeprowadzonej dla próbek biocharu ze słomy wskazują na postępujący wzrost stopnia przeobrażenia wraz ze wzrostem temperatury pirolizy, co manifestuje się zmianami w średniej refleksyjności (R_o). Uzyskane wyniki zaprezentowano w tabeli 1. Przedział zmienności R_o dla poszczególnych temperatur pirolizy jest następujący: 1,39–1,56% dla 500°C, 1,85–1,90% dla 550°C, 2,05–2,12% dla 600°C oraz 2,15–2,34% dla 650°C. Trend wzrostowy widoczny jest również w maksymalnych uzyskanych wynikach pomiarów refleksyjności, które rosną od ok. 2,7% (500°C), przez ok. 3,8% (550°C) i 3,9% (600°C) do ok. 4,4% (650°C). Zarówno wartości średniej refleksyjności, jak i wartości maksymalnej sugerują największy dynamizm zmian w trakcie zmiany temperatury pirolizy z 500°C na 550°C. Jednocześnie we wszystkich próbkach obecne są fragmenty o bardzo niskim stopniu termicznego przeobrażenia (R_o ok. 0,1–0,2%), co oznacza, że zakres uzyskanych wyników pomiarów staje się coraz szerszy wraz ze wzrostem temperatury.

Głównym aspektem badań jest porównanie wyników uzyskanych pomiędzy poszczególnymi subpróbkami, gdyż umożliwia to oszacowanie, czy konieczne jest pobranie kilku subpróbek z większej oryginalnej objętości, czy też – przy zastosowaniu metody kwartowania – wystarczy jedna próbka, by uzyskać wysokiej jakości reprezentatywne wyniki. W przypadku pomiarów refleksyjności, ze względu na to, że wszystkie przebadane fragmenty pochodzą z jednej, większej próbki, otrzymane wyniki dla 4 subpróbek można połączyć, by na największej możliwej liczbie pomiarów określić jak najdokładniejszą średnią wartość R_o. W tabeli 2 przedstawiono porównanie wartości średniego R_o dla całej próbki i poszczególnych subpróbek. Największe różnice w uzyskanych wartościach kształtują się na poziomie 0,11 p.p., choć dla większości subpróbek różnica nie przekracza 0,06 p.p. (tabela 3). Mając na uwadze bardzo dużą heterogeniczność próbek takie wyniki mogą być w pełni zaakceptowane. Oznacza to zatem, że w przypadku dysponowania oryginalną próbką biocharu o objętości ok. 100 cm^3 wystarczy w celu prawidłowego określenia średniej refleksyjności pobrać (zmniejszając stopniowo objętość próbki oryginalnej metodą kwartowania) jedną subpróbkę.

Warto jeszcze zwrócić uwagę na liczbę wykonanych pomiarów. Dla subpróbek pochodzących z próbki po pirolizie w temperaturze 500°C jest ona prawie o połowę niższa (choć generalnie wciąż bardzo wysoka) niż w przypadku pozostałych. Wynika to z różnic we frakcji – materiał do kwartowania

Tabela 1. Wyniki analizy refleksyjności (R_o) dla próbek biocharu ze słomy
Table 1. Results of reflectance analysis (R_o) for straw-derived biochar samples

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	Nr subpróbki	Min. [%]	Maks. [%]	Średnia R_o [%]	Odch. std.	Liczba pomiarów
Słoma	500	1	0,17	2,65	**1,49**	0,67	283
		2	0,15	2,74	**1,39**	0,70	320
		3	0,12	2,79	**1,56**	0,68	370
		4	0,15	2,72	**1,54**	0,69	332
	550	1	0,18	3,86	**1,89**	1,00	596
		2	0,18	3,81	**1,90**	0,95	600
		3	0,17	3,85	**1,86**	0,99	542
		4	0,14	3,71	**1,85**	0,99	600
	600	1	0,33	3,99	**2,12**	1,04	600
		2	0,19	4,10	**2,07**	1,03	600
		3	0,20	3,85	**2,07**	1,03	600
		4	0,14	3,88	**2,05**	1,01	600
	650	1	0,39	4,33	**2,34**	1,04	600
		2	0,34	4,41	**2,19**	1,03	600
		3	0,28	4,37	**2,15**	0,92	600
			0,29	4,53	**2,24**	1,13	600

Tabela 2. Średnia refleksyjność (R_o) dla całej próbki i poszczególnych subpróbek w odniesieniu do temperatury pirolizy
Table 2. Mean reflectance (R_o) for bulk samples and individual subsamples as a function of pyrolysis temperature

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	R_o całej próbki	R_o subpróbki 1	R_o subpróbki 2	R_o subpróbki 3	R_o subpróbki 4
Słoma	500	1,50	1,49	1,39	1,56	1,54
	550	1,87	1,89	1,90	1,86	1,85
	600	2,08	2,12	2,07	2,07	2,05
	650	2,23	2,34	2,19	2,15	2,24

Tabela 3. Różnice pomiędzy średnią refleksyjnością (R_o) dla całej próbki a poszczególnymi subpróbkami
Table 3. Differences between mean reflectance (R_o) for bulk samples and individual subsamples

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	Nr subpróbki			
		1	2	3	4
Słoma	500	−0,01	−0,11	0,06	0,04
	550	0,02	0,02	−0,02	−0,02
	600	0,04	−0,01	−0,01	−0,03
	650	0,11	−0,04	−0,08	0,01

próbki po pirolizie w temperaturze 500°C pochodził z sita o rozmiarach oczka 0,63 × 0,63 mm, podczas gdy pozostałe próbki pobrano z materiału osadzonego na sicie o oczku 0,1 × 0,1 mm. Drobniejsza frakcja nie tylko nie utrudniła pomiarów (oraz obserwacji morfologii fragmentów), ale w znacznym stopniu zwiększyła ich liczbę.

W przypadku biocharu z trocin bezpośrednie porównanie wyników analizy refleksyjności z wynikami uzyskanymi dla słomy jest utrudnione, ponieważ poszczególne subpróbki reprezentują tu poszczególne frakcje oryginalnego materiału, a nie jego całość. Problem ten można rozwiązać, łącząc uzyskane wyniki ze wszystkich frakcji i ponownie wyliczając średnią wartość R_o. Jest to możliwe, ponieważ potencjalnie każdy z przebadanych fragmentów mógłby zostać zmierzony, jeżeli próbka nie zostałaby rozdzielona na poszczególne frakcje i wszystkie one byłyby dostępne do obserwacji.

Po połączeniu wyników z wszystkich frakcji, podobnie jak to było w przypadku próbek biocharu ze słomy, widoczny jest wyraźny trend wzrostu średniej refleksyjności, co odzwierciedla wzrost ich stopnia uwęglenia (tabela 4). Wartości te rosną od 1,43 (temperatura 500°C), przez 1,90 oraz 2,15 (temperatury odpowiednio 550°C oraz 600°C), aż do 2,55% dla biocharu uzyskanego podczas pirolizy w temperaturze 650°C. Wraz ze wzrostem temperatury rozszerza się zakres zmienności refleksyjności obserwowanych fragmentów. Dla wszystkich próbek, niezależnie od temperatury, najniższe rejestrowane wartości mieszczą się w przedziale ok. 0,1–0,2%, podczas gdy wartości najwyższe sięgają do ok. 4,2% (650°C), a nawet ok. 5,1% (pojedynczy pomiar, wartość wyraźnie odstająca).

Analiza refleksyjności poszczególnych frakcji ujawnia pewną zmienność (zwłaszcza w przypadku próbek biocharu powstałego w temperaturze 550°C i 600°C), polegającą na zaniżonych wartościach średniej refleksyjności w przypadku subpróbek o najgrubszej frakcji (1,61% w stosunku do 1,89–1,96% dla temperatury 550°C oraz 1,77% w stosunku do 2,15–2,24% dla temperatury 600°C). Może to wynikać z relatywnie niskiej liczby pomiarów, która mieściła się w zakresie 100–200, podczas gdy w przypadku innych frakcji wynosiła co najmniej 300 (a nierzadko 600).

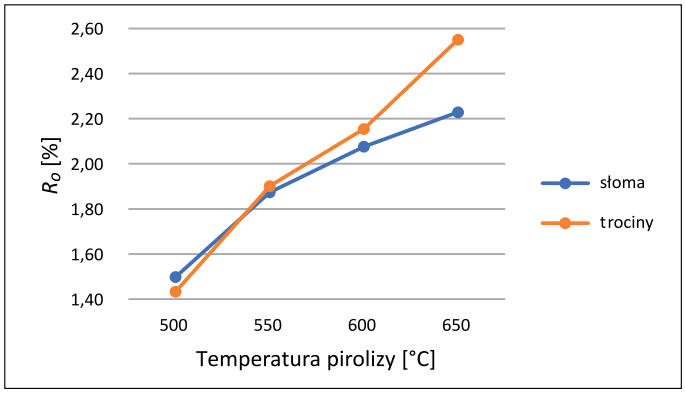
Porównując wyniki uzyskane na próbkach biocharu pochodzącego z pirolizy słomy oraz z pirolizy trocin dostrzega się te same trendy wzrostu stopnia uwęglenia wraz ze wzrostem temperatury pirolizy (tabela 4, rysunek 3). W przypadku trocin jednak stopień przeobrażenia wzrasta nieco dynamiczniej i pomimo generalnie zbliżonych wartości średniego R_o dla temperatur 500°C (1,5% i 1,43%), 550°C (1,87% i 1,90%) oraz 600°C (2,08% i 2,15%) już dla temperatury 650°C różnice te stają się bardzo wyraźne (słoma – R_o = 2,23%, trociny – R_o = 2,55%). Ze względu na brak próbek z wyższych temperatur pirolizy – nie można prześledzić dalszych zmian w różnicach średnich refleksyjności, ale analizując trend zmienności wydaje się prawdopodobne, że różnice te mogą się pogłębiać. Podobny trend zmiany wartości średniej refleksyjności dla próbek biocharu z drewna i słomy (w zakresie temperatury pirolizy 500–600°C) został uchwycony przez Drobniak i in. (2025). Warto zaznaczyć jednak, że w przypadku ich badań uzyskane wartości były wyraźnie wyższe niż prezentowane w niniejszym opracowaniu, co może mieć związek z warunkami pirolizy lub charakterem biologicznym próbek.

Przeanalizowano też, jaki wpływ na wynik analizy refleksyjności ma zmniejszanie liczby pomiarów. W tym celu wyselekcjonowano 14 próbek (dla których wykonano

Tabela 4. Wyniki analizy refleksyjności (R_o) dla próbek biocharu z trocin

Table 4. Results of reflectance analysis (R_o) for sawdust-derived biochar samples

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	Nr subpróbki	Min. [%]	Maks. [%]	Średnia R_o [%]	Odch. std.	Liczba pomiarów
Trociny	500	1	0,12	2,50	**1,37**	0,71	212
		2	0,17	3,80	**1,46**	0,68	346
		3	0,15	3,83	**1,48**	0,69	600
		4	0,11	3,39	**1,38**	0,66	407
	550	1	0,14	3,12	**1,61**	1,04	150
		2	0,21	3,23	**1,95**	0,88	304
		3	0,11	3,34	**1,89**	0,86	470
		4	0,17	4,39	**1,96**	0,86	600
	600	1	0,19	4,12	**1,77**	1,18	108
		2	0,14	4,14	**2,15**	1,11	376
		3	0,20	4,00	**2,24**	1,08	484
		4	0,14	4,15	**2,16**	1,09	544
	650	1	0,19	4,26	**2,40**	1,05	165
		2	0,34	4,24	**2,44**	1,01	369
		3	0,38	4,22	**2,61**	1,02	600
		4	0,23	5,13	**2,60**	1,07	600



Rysunek 3. Porównanie średniej refleksyjności biocharu ze słomy oraz z trocin (całe próbki) w odniesieniu do temperatury pirolizy

Figure 3. Comparison of the mean reflectance of straw-derived and sawdust-derived biochar (bulk samples) as a function of pyrolysis temperature

pomiary refleksyjności w maksymalnej przyjętej liczbie, tj. 600), uwzględniając zarówno próbki biocharu ze słomy, jak i trocin (tabele 5 i 6).

Za bazowy wynik uznano średnią refleksyjność wyliczoną na podstawie 600 pomiarów. Liczbę tę zmniejszano systematycznie o 50 i ponownie wyliczano średnią refleksyjność, a następnie uzyskany wynik porównywano z wynikiem bazowym. Założono, że akceptowalna różnica pomiędzy dwoma porównywanymi wynikami nie powinna być większa niż 0,099 p.p. ani mniejsza niż −0,099 p.p., zaznaczając, że wartości te mogą ulec zmianie w zależności od konkretnych potrzeb badawczych. Przeprowadzone analizy jednoznacznie wskazują, że różnice w zakresie liczby pomiarów pomiędzy 350 a 550 zawsze mieściły się w wyznaczonym kryterium akceptacji (tabela 7). Dalsze obniżenie liczby pomiarów spowodowało uzyskanie wyników niemieszczących się w założonym zakresie w przedziale od 7% (300 pomiarów) do 50% przypadków (50 pomiarów). Zatem przy przyjętych kryteriach akceptacji liczba pomiarów na poziomie co najmniej 350 dawała najlepsze rezultaty.

Analiza składu

Analiza składu oparta była na kategoriach opisanych w rozdziale *Materiał badawczy i metodyka*. Wyniki dla próbek biocharu słomy (tabela 7) jednoznacznie wskazują na spadek udziału frakcji nisko przeobrażonej ze średnio 23,53% obj. dla temperatury 500°C do średnio 0,56% obj. dla 650°C. Spadkowi udziału tej frakcji towarzyszy jednoczesny wzrost udziału frakcji porowatych, wyżej przeobrażonych fragmentów ze średnio 75,60% obj. (500°C) do średnio 98,78% obj. (650°C). Największe zmiany odnotowuje się wraz z przejściem z 500°C na 550°C. Jednocześnie fragmenty nieporowate lub o niskiej porowatości, niezależnie od temperatury pirolizy, nie przekraczają 1% obj.

Analiza różnic w składzie pomiędzy poszczególnymi subpróbkami pozwala na stwierdzenie, że obserwowana zmienność jest minimalna. Maksymalne różnice sięgają jedynie 1,19 p.p. w przypadku fragmentów porowatych i 0,64 p.p. w przypadku fragmentów o niskim stopniu przeobrażenia (temp. 500°C). Co więcej, różnice te wyraźnie zacierają się

Tabela 5. Wartości refleksyjności (R_o) w odniesieniu do liczby pomiarów dla wybranych subpróbek
Table 5. Reflectance (R_o) values as a function of the number of measurements for selected subsamples

Typ biomasy		Słoma										Trociny			
Temp. pirolizy [°C]		550	550	600	600	600	600	650	650	650	650	500	550	650	650
Nr subpróbki		2	4	1	2	3	4	1	2	3	4	3	4	3	4
Liczba pomiarów	**600**	**1,90**	**1,85**	**2,12**	**2,07**	**2,07**	**2,05**	**2,34**	**2,19**	**2,15**	**2,24**	**1,48**	**1,96**	**2,61**	**2,60**
	550	1,89	1,86	2,11	2,05	2,07	2,05	2,34	2,19	2,12	2,23	1,47	1,96	2,62	2,61
	500	1,89	1,87	2,10	2,03	2,05	2,07	2,35	2,19	2,11	2,22	1,46	1,95	2,63	2,59
	450	1,90	1,90	2,11	2,00	2,06	2,05	2,34	2,20	2,13	2,22	1,46	1,93	2,63	2,56
	400	1,89	1,90	2,09	1,98	2,07	2,07	2,36	2,22	2,15	2,21	1,47	1,94	2,63	2,57
	350	1,85	1,90	2,11	2,02	2,08	2,08	2,40	2,26	2,14	2,22	1,49	1,89	2,64	2,55
	300	1,88	1,91	2,08	2,00	2,11	2,10	2,39	2,25	2,11	2,20	1,48	1,87	2,70	2,49
	250	1,88	1,90	2,12	2,06	2,04	2,10	2,41	2,21	2,09	2,18	1,49	1,85	2,71	2,50
	200	1,86	1,86	2,12	2,06	2,02	2,16	2,40	2,16	2,07	2,16	1,50	1,82	2,70	2,50
	150	1,81	1,89	2,15	2,04	2,03	2,13	2,40	2,17	2,13	2,21	1,43	1,74	2,72	2,43
	100	1,76	1,87	2,06	2,10	2,03	2,16	2,43	2,23	2,16	2,25	1,38	1,65	2,69	2,48
	50	1,73	2,01	2,13	2,08	1,90	2,09	2,49	2,17	2,18	2,32	1,30	1,70	2,70	2,43

Tabela 6. Różnice w wartości R_o w odniesieniu do liczby pomiarów dla wybranych subpróbek
Table 6. Differences in reflectance (R_o) values as a function of the number of measurements for selected subsamples

Typ biomasy		Słoma										Trociny			
Temp. pirolizy [°C]		550	550	600	600	600	600	650	650	650	650	500	550	650	650
Nr subpróbki		2	4	1	2	3	4	1	2	3	4	3	4	3	4
Liczba pomiarów	**600**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
	550	−0,01	0,01	−0,01	−0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	−0,03	−0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
	500	0,00	0,02	−0,02	−0,04	−0,02	0,02	0,01	−0,01	−0,03	−0,02	−0,02	−0,01	0,02	−0,01
	450	0,01	0,05	−0,01	−0,07	−0,01	0,01	0,00	0,01	−0,02	−0,02	−0,01	−0,03	0,02	−0,04
	400	−0,01	0,05	−0,03	−0,09	0,00	0,03	0,02	0,03	0,00	−0,02	−0,01	−0,02	0,01	−0,03
	350	−0,05	0,04	−0,01	−0,05	0,01	0,03	0,06	0,07	−0,01	−0,02	0,01	−0,06	0,03	−0,05
	300	−0,02	0,06	−0,04	−0,07	0,04	0,05	0,05	0,06	−0,03	−0,03	0,01	−0,09	0,09	−0,11
	250	−0,01	0,05	0,00	−0,02	−0,03	0,05	0,08	0,02	−0,06	−0,06	0,01	−0,11	0,10	−0,10
	200	−0,04	0,00	0,00	−0,01	−0,05	0,12	0,06	−0,03	−0,08	−0,08	0,02	−0,14	0,09	−0,10
	150	−0,09	0,03	0,03	−0,03	−0,04	0,09	0,06	−0,03	−0,02	−0,02	−0,05	−0,21	0,11	−0,17
	100	−0,14	0,02	−0,06	0,03	−0,04	0,11	0,09	0,04	0,02	0,02	−0,10	−0,30	0,07	−0,11
	50	−0,17	0,16	0,01	0,01	−0,17	0,05	0,15	−0,02	0,04	0,08	−0,18	−0,26	0,09	−0,17

Na zielono zaznaczono próbki spełniające założone kryterium akceptowalności.
Samples meeting the assumed acceptability criterion are highlighted in green.

wraz ze wzrostem temperatury i w temperaturze 650°C największą zmienność obserwuje się na poziomie 0,74 p.p. oraz 0,38 p.p. (odpowiednio dla fragmentów porowatych i nisko przeobrażonych). Tak niewielkie różnice wskazują na dobrą reprezentatywność i pozwalają na stwierdzenie, że dla niewielkich objętości próbek wystarczy pobrać 1 subpróbkę (przy zachowaniu należytej procedury jej poboru, uwzględniającej etap kruszenia i kwartowania).

Wnioski innej natury można wysnuć na podstawie wyników analizy próbek biocharu z trocin (tabela 8). Rozdzielenie na poszczególne frakcje i analiza ich składu ukazują pewne trendy, które muszą być uwzględnione w celu pełnej charakterystyki przebadanych próbek. Wyniki jasno wskazują na wyraźną odmienność składu frakcji najgrubszej w porównaniu z innymi. Niezależnie od temperatury pirolizy udział fragmentów nisko przeobrażonych jest w tej frakcji wyraźnie wyższy, a udział fragmentów porowatych – niższy. W obrębie frakcji najdrobniejszej można z kolei dostrzec, choć już nie tak wyraźnie, pewną tendencję do zawyżania zawartości frakcji nieporowatej – jest to zrozumiałe, bo im drobniejsza frakcja,

tym gorzej zachowane są rozbudowane struktury komórkowe, a tym samym fragmenty, które pierwotnie były klasyfikowane jako porowate, ze względu na wysoki stopień pokruszenia materiału, stają się fragmentami nieporowatymi.

Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia, za wyniki odzwierciedlające reprezentatywny skład uznać należy te, które pochodzą z analizy próbek utworzonych z materiału pobranego z sit o oczkach 0,63 × 0,63 i 0,1 × 0,1 mm. Na podstawie

Tabela 7. Wyniki analizy składu metodą planimetrowania – biochar ze słomy
Table 7. Results of compositional analysis by planimetric method – straw-derived biochar

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	Nr subpróbki	Rodzaj składnika [% obj.]			Liczba zliczonych punktów
			Nisko przeobrażone	Przeobrażone		
				Porowate	Nieporowate	
Słoma	500	1	23,92	75,09	0,99	811
		2	23,63	75,09	1,29	855
		3	23,30	76,28	0,43	940
		4	23,28	75,93	0,79	885
	550	1	8,47	91,04	0,49	815
		2	8,10	91,53	0,37	815
		3	8,32	91,29	0,39	769
		4	8,68	90,39	0,94	853
	600	1	2,70	97,08	0,22	889
		2	3,17	96,61	0,22	915
		3	2,60	97,29	0,11	886
		4	2,94	96,45	0,61	816
	650	1	0,36	99,04	0,60	832
		2	0,74	98,65	0,61	814
		3	0,71	98,35	0,94	848
		4	0,45	99,09	0,45	882

Tabela 8. Wyniki analizy składu metodą planimetrowania – biochar z trocin
Table 8. Results of compositional analysis by planimetric method – sawdust-derived biochar

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	Nr subpróbki	Rodzaj składnika [% obj.]			Liczba zliczonych punktów
			Nisko przeobrażone	Przeobrażone		
				Porowate	Nieporowate	
Trociny	500	1	18,11	78,37	3,53	624
		2	15,77	82,32	1,91	577
		3	14,18	84,12	1,70	529
		4	9,20	87,81	2,99	402
	550	1	25,53	73,69	0,77	517
		2	12,47	86,85	0,68	730
		3	11,45	87,60	0,95	629
		4	8,83	87,18	3,99	351
	600	1	37,37	60,54	2,09	479
		2	4,24	93,89	1,87	589
		3	4,89	93,02	2,09	573
		4	5,37	91,28	3,36	149
	650	1	6,17	92,10	1,73	405
		2	0,19	97,77	2,05	537
		3	0,36	98,92	0,72	555
		4	0,55	97,24	2,21	181

ich analizy dostrzec można podobny trend jak w przypadku próbek biocharu pochodzącego ze słomy. Trend ten polega na stopniowym zaniku frakcji nisko przeobrażonej i wzroście udziału fragmentów porowatych wraz ze wzrostem temperatury pirolizy. W przypadku fragmentów nisko przeobrażonych jest to spadek udziału z ok. 14,18–15,77% (500°C), przez 11,45–12,47% (550°C) i 4,24–4,89% (600°C), aż do 0,19–0,36% (650°C). Jednocześnie następuje wzrost udziału fragmentów porowatych od 82,32–84,12% (500°C), przez 86,85–87,60% (550°C) i 93,02–93,89% (600°C), aż do 97,77–98,92% (650°C).

Analiza składu na podstawie wyników pomiarów refleksyjności

Analiza morfologii obserwowanych fragmentów, choć bardzo ważna, nie wnosi pełnej informacji, gdyż brakuje danych o reaktywności uzyskanego biocharu, a takowe mają znaczenie w kontekście możliwości jego wykorzystania. Dlatego też, podobnie jak to zrobili Mastalerz i in. (2025), wykorzystano wyniki z pomiarów refleksyjności w celu scharakteryzowania składu próbek pod takim kątem, który pozwalałby wnioskować o stabilności chemicznej otrzymanego materiału.

Wyniki składu przebadanych próbek, z uwzględnieniem reaktywności, zostały zawarte w tabeli 9.

Próbki słomy charakteryzują się spadkiem udziału frakcji reaktywnej wraz ze wzrostem temperatury pirolizy – z 46,90% (temp. 500°C) przez 40,46% i 34,21% (odpowiednio temp. 550°C i 600°C), aż do 27,54%. Jednocześnie wyraźnie rośnie udział frakcji niereaktywnej – od 31,19% (temp. 500°C), przez 46,58% (temp. 550°C) i 52,88% (temp. 600°C) do 57,17% (temp. 650°C).

Różnice pomiędzy składem poszczególnych subpróbek a składem całej próbki w odniesieniu do temperatury pirolizy zawiera tabela 10. Różnice nie przekraczają 7,48 p.p., natomiast najczęściej mieszczą się w granicy 5 p.p., co wydaje się wartością akceptowalną.

Próbki trocin również wykazują uzasadniony spadek udziału frakcji reaktywnej wraz ze wzrostem temperatury pirolizy – z 50,86% (temp. 500°C) do 19,72% (temp. 650°C), przy czym dla temperatur 550°C i 600°C otrzymane wartości są zbliżone (ok. 32–34%). Jednocześnie obserwuje się wzrost udziału frakcji niereaktywnej z 25,37% do (temp. 500°C) do 67,99% (temp. 650°C). Zauważalna jest jedynie niewielka różnica w udziale frakcji niereaktywnej w zakresie temperatur

Tabela 9. Skład próbek w odniesieniu do reaktywności biocharu
Table 9. Sample composition in relation to biochar reactivity

Typ biomasy		Słoma				Trociny			
Temperatura pirolizy [°C]		500	550	600	650	500	550	600	650
Udział wydzielonych grup [%]	R_o < 1,5%	46,90	40,46	34,21	27,54	50,86	31,82	33,80	19,72
	R_o = 1,5–2,0%	21,92	12,96	12,92	15,29	23,77	14,30	11,44	12,28
	R_o > 2,0%	31,19	46,58	52,88	57,17	25,37	53,87	54,76	67,99

Tabela 10. Różnice pomiędzy składem całej próbki a poszczególnymi subpróbkami w odniesieniu do temperatury pirolizy i założonych przedziałów reaktywności
Table 10. Differences between the composition of bulk samples and individual subsamples in relation to pyrolysis temperature and assumed reactivity ranges

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	Przedział zmienności R_o	Nr subpróbki			
			1	2	3	4
Słoma	500	<1,5%	3,08	−7,48	0,95	3,52
		1,5–2,0%	−3,88	1,92	3,54	−2,48
		>2,0%	0,80	5,56	−4,49	−1,04
	550	<1,5%	1,54	0,96	−1,05	−1,54
		1,5–2,0%	−1,64	−1,21	0,97	1,96
		>2,0%	0,10	0,24	0,08	−0,42
	600	<1,5%	0,38	0,04	0,21	−0,63
		1,5–2,0%	−0,25	−0,25	−0,08	0,58
		>2,0%	−0,12	0,21	−0,12	0,04
	650	<1,5%	3,71	−0,96	1,04	−3,79
		1,5–2,0%	1,29	1,29	−2,88	0,29
		>2,0%	−5,00	−0,33	1,83	3,50

cd. Tabela 10/cont. Table 10

Typ biomasy	Temperatura pirolizy [°C]	Przedział zmienności R_o	Nr subpróbki			
			1	2	3	4
Trociny	500	<1,5%	−1,50	1,44	2,86	−4,67
		1,5–2,0%	1,60	−0,22	−0,73	0,43
		>2,0%	−0,10	−1,22	−2,13	4,24
	550	<1,5%	−13,51	0,90	0,97	2,16
		1,5–2,0%	5,64	0,49	−1,01	−0,86
		>2,0%	7,87	−1,39	0,04	−1,30
	600	<1,5%	−8,80	0,02	2,18	−0,21
		1,5–2,0%	−1,52	−1,32	1,32	0,04
		>2,0%	10,32	1,30	−3,50	0,17
	650	<1,5%	−3,31	−1,69	2,39	−0,44
		1,5–2,0%	3,19	−1,00	−1,05	0,78
			0,11	2,68	−1,34	−0,34

550–600°C (ok. 54–55%). Różnice pomiędzy składem poszczególnych subpróbek a składem całej próbki w odniesieniu do temperatury pirolizy zwykle nie przekraczają 5 p.p. W pewnych przypadkach jednak, w obrębie największej frakcji, obserwuje się różnice, które mogą wynieść nawet ponad 10 p.p., co wskazuje na niereprezentatywność jej składu i wyklucza ją jako potencjalną frakcję do badań. Biorąc pod uwagę wcześniej omówione wyniki, frakcje zebrane z sit 0,63 mm i 0,1 mm wydają się najodpowiedniejszym wyborem do badań pod kątem reprezentatywności uzyskanych wyników.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że analiza mikroskopowa biocharu stanowi skuteczne narzędzie do oceny jego stopnia uwęglenia, morfologii oraz potencjalnej reaktywności, a tym samym może być wykorzystywana w charakterystyce materiału pod kątem jego dalszego zastosowania.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na wzrost średniej refleksyjności (R_o) wraz ze wzrostem temperatury pirolizy, co odzwierciedla postępujący proces uwęglenia biomasy. Jednocześnie we wszystkich badanych próbkach obserwowano szeroki zakres zmienności refleksyjności, potwierdzający wysoką heterogeniczność biocharu.

Analiza reprezentatywności wykazała, że w przypadku próbek o objętości rzędu 100 cm^3, przygotowanych z zastosowaniem procedury kruszenia i kwartowania, pojedyncza subpróbka o objętości 5 cm^3 jest wystarczająca do otrzymania wiarygodnych wyników zarówno w zakresie średniej refleksyjności, jak i składu morfologicznego.

Istotnym wynikiem pracy jest określenie minimalnej liczby pomiarów refleksyjności niezbędnej do uzyskania reprezentatywnych wyników. Na podstawie przyjętego kryterium akceptacji ustalono, że liczba ta nie powinna być niższa niż 350 pomiarów.

W przypadku biocharu z trocin stwierdzono wyraźny wpływ frakcji ziarnowej na wyniki analiz. Frakcja najgrubsza charakteryzuje się podwyższonym udziałem materiału nisko przeobrażonego i nie może być uznana za reprezentatywną. Najbardziej wiarygodne wyniki uzyskuje się dla materiału o frakcji pośredniej (0,63–0,1 mm).

Analiza składu, uwzględniająca zarówno cechy morfologiczne, jak i podział na frakcje reaktywne i niereaktywne na podstawie wartości refleksyjności, pozwala na pełniejszą charakterystykę biocharu. Wraz ze wzrostem temperatury pirolizy obserwuje się systematyczny spadek udziału frakcji reaktywnej oraz wzrost udziału materiału stabilnego, co ma bezpośrednie znaczenie dla potencjalnych zastosowań środowiskowych i technologicznych.

Otrzymane wyniki wskazują, że mikroskopia optyczna, pomimo relatywnie rzadkiego zastosowania w badaniach biocharu, ma duży potencjał jako metoda wspierająca ocenę jego właściwości oraz standaryzację procedur analitycznych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Ocena stopnia uwęglenia biomasy po pirolizie w różnych temperaturach na wybranych przykładach* – praca INiG-PIB na zlecenie MEiN; nr archiwalny: DK-4100-46/25, nr zlecenia: 0069/SG/25.

Literatura

Aboughaly M., Babaei-Ghazvini A., Dhar P., Patel R., Acharya B., 2023. Enhancing the potential of polymer composites using biochar as a filler: A review. *Polymers*, 15: 3981. DOI: 10.3390/polym15193981.

Cao X., Sun S., Sun R., 2017. Application of biochar-based catalysts in biomass upgrading: A review. *RSC Advances*, 7: 48793–48805. DOI: 10.1039/C7RA09307A.

Cayuela M.L., van Zwieten L., Singh B.P., Jeffery S., Roig A., Sánchez-Monedero M.A., 2014. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191: 5–16. DOI: 10.1016/j.agee.2013.10.009.

Chauhan S., Shafi T., Dubey B.K., Chowdhury S., 2023. Biochar-mediated removal of pharmaceutical compounds from aqueous matrices via adsorption. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 5 (1): 37–62. DOI: 10.1007/s42768-022-00118-y.

Chiaramonti D., Lotti G., Vaccari F.P., Sanei H., 2024. Assessment of long-lived carbon permanence in agricultural soil: Unearthing 15-year-old biochar from a long-term field experiment in a vineyard. *Biomass and Bioenergy*, 191: 107484. DOI: 10.1016/j.biombioe.2024.107484.

Conte P., Schmidt H.-P., 2017. Soil–water interactions unveiled by fast field cycling NMR relaxometry. *eMagRes*, 6(4): 1–12. DOI: 10.1002/9780470034590.emrstm1535.

Das C., Tamrakar S., Kiziltas A., Xie X., 2021. Incorporation of biochar to improve mechanical, thermal and electrical properties of polymer composites. *Polymers*, 13 (16): 2663. DOI: 10.3390/polym13162663.

Dissanayake P.D., You S., Igalavithana A.D., Xia Y., Bhatnagar A., Gupta S., Kua H.W., Kim S., Kwon J.-H., Tsang D.C.W., Ok Y.S., 2020. Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119: 109582. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109582

Drobniak A., Mastalerz M., Knauth W., Ardakani O., Dos Santos T., De Faria V., Congo T., Hackley P., Hatcherian J., Hower J., Petersen H., Reyes J., Sanei H., 2024. Atlas of Microscopic Images of Biochar. *Indiana Journal of Earth Sciences*, 6. DOI: 10.14434/ijes.v6i1.37623.

Drobniak A., Mastalerz M., Liu B., Lis G., Lis K., Rudra A., Petersen H.I., Hower J., Eble C., Widziewicz-Rzońca K., 2025. Developing methodology for biochar reflectance measurements: A round robin study. *SSRN*. DOI: 10.2139/ssrn.5681664.

Edeh I.G., Mašek O., Buss W., 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties: New insights and future research challenges. *Science of the Total Environment*, 714: 136857. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136857.

Fortune Business Insights, 2024. Biochar market size, share, trends, growth | Forecast, (2024–2032). https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biochar-market-100750 (dostęp: 1.09.2025).

Gholizadeh M., Hu X., 2021. Removal of heavy metals from soil with biochar composite: A critical review of the mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9: 105830. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105830.

Giorcelli M., Khan A., Pugno N.M., Rosso C., Tagliaferro A., 2019. Biochar as a cheap and environmentally friendly filler able to improve polymer mechanical properties. *Biomass and Bioenergy*, 120: 219–223. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.11.036.

Godlewska P., Schmidt H.-P., Ok Y.S., Oleszczuk P., 2017. Biochar for composting improvement and contaminants reduction: A review. *Bioresource Technology*, 246, 193–202. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.07.095.

Hagemann N., Joseph S., Schmidt H., Kammann C.I., Harter J., Borch T., Young R.B., Varga K., Taherymoosavi S., Elliott K.W., Albu M., Mayrhofer C., Obst M., Conte P., Dieguez-Alonso A., Orsetti S., Subdiaga E., Behrens S., Kappler A., 2017a. Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature Communications*, 8 (1): 1089–1101. DOI: 10.1038/s41467-017-01123-0.

Hagemann N., Kammann C.I., Schmidt H.-P., Kappler A., Behrens S., 2017b. Nitrate capture and slow release in biochar-amended compost and soil. *PLOS ONE*, 12(2): e0171214. DOI: 10.1371/journal.pone.0171214.

He Y., Yao Y., Ji Y., Deng J., Zhou G., Liu R., Shao J., Zhou L., Li N., Zhou X., Hosseini Bai S., 2020. Biochar amendment boosts photosynthesis and biomass in C3 but not C4 plants: A global synthesis. *GCB Bioenergy*, 12(8): 605–617. DOI: 10.1111/gcbb.12720.

He Y., Zhou X., Jiang L., Li M., Du Z., Zhou G., Shao J., Wang X., Xu Z., Hosseini Bai S., Wallace H., Xu C., 2017. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: A meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 9: 743–755. DOI: 10.1111/gcbb.12376.

Hosseini Bai S., Omidvar N., Gallart M., Kämper W., Tahmasbian I., Farrar M.B., Singh K., Zhou G., Muqadass B., Xu C.-Y., Koech R., Li Y., Nguyen T.T.N., van Zwieten L., 2022. Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 808: 152073. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152073.

International Biochar Initiative, 2024. Global biochar market report 2023. https://share.google/s47MMQsEyQC6xHSgd.

Jeffery S., Verheijen F.G.A., van der Velde M., Bastos A.C., 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1): 175–187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015.

Kammann C.I., Schmidt H.-P., Messerschmidt N., Linsel S., Steffens D., Müller C., Koyro H.-W., Conte P., Stephen J., 2015. Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar. *Scientific Reports*, 5: 11080. DOI: 10.1038/srep11080.

Kluska J., Ramotowski J., 2024. Combustion characteristics of biochar from food processing waste. *Archives of Thermodynamics*, 45(1): 45–51. DOI: 10.24425/ather.2024.150437.

Kumar S., Soomro S.A., Harijan K., Uqaili M.A., Kumar L., 2023. Advancements of biochar-based catalysts for improved production of biodiesel: *A comprehensive review. Energies*, 16 (2): 644. DOI: 10.3390/en16020644.

Laird D.A., 2008. The charcoal vision: A win–win–win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal*, 100(1): 178–181. DOI: 10.2134/agronj2007.0161.

Lee J., Kim K.-H., Kwon E.E., 2017. Biochar as a catalyst. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77: 70–79. DOI: 10.1016/j.rser.2017.04.002.

Lehmann J., Joseph S., 2015. Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd ed.). *Routledge*.

Lehmann J., Abiven S., Kleber M., Pan G., Singh B.P., Sohi S.P., Zimmerman, A.R., 2015. Persistence of biochar in soil. [W:] Lehmann J., Joseph S. (eds.). Biochar for environmental management (2nd ed.). *Routledge*: 235–299.

Lehmann J., Gaunt J., Rondon M., 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11: 403–427. DOI: 10.1007/s11027-005-9006-5.

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.

Lis G.P., Drobniak A., Mastalerz M., 2026. Raman spectroscopy and reflectance as probes for structural evolution of biochar. *International Journal of Coal Geology*, 325: 105076. DOI: 10.1016/j.coal.2026.105076.

Liu Q., Zhang Y., Liu B., Amonette J.E., Lin Z., Liu G., Ambus P., Xie Z., 2018. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 426(1–2): 211–225. DOI: 10.1007/s11104-018-3619-4.

Liu Z., Dugan B., Masiello C.A., Barnes R.T., Gallagher M.E., Gonnermann H., 2016. Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar–sand mixtures. *Journal of Hydrology*, 533: 461–472. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.007.

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.

Mastalerz M., Drobniak A., Liu B., Sauer P.E., 2025. Reflectance as an indicator of biochar permanence. *International Journal of Coal Geology,* 306: 104809. DOI: 10.1016/j.coal.2025.104809.

Peng X., Deng Y., Peng Y., Yue K., 2018. Effects of biochar addition on toxic element concentrations in plants: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 616–617: 970–977. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.222.

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.

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.

Pokharel P., Ma Z., Chang S.X., 2020. Biochar increases soil microbial biomass with changes in extra- and intracellular enzyme activities: A global meta-analysis. *Biochar*, 2(1): 65–79. DOI: 10.1007/s42773-020-00039-1.

Prabakar P., Mustafa Mert K., Muruganandam L., Sivagami K., 2024. A comprehensive review on biochar for electrochemical energy storage applications: An emerging sustainable technology. *Frontiers in Energy Research*, 12: 1448520. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1448520.

Prost K., Borchard N., Siemens J., Kautz T., Séquaris J., Möller A., Amelung W., 2012. Biochar affected by composting with farmyard manure. *Journal of Environmental Quality*, 42 (1): 164–172. DOI: 10.2134/jeq2012.0064.

Qiu B., Tao X., Wang H., Li W., Ding X., Chu, H., 2021. Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155: 105081. DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105081.

Rudra A., Petersen H.I., Sanei H., 2024. Molecular characterization of biochar and the relation to carbon permanence. International *Journal of Coal Geology*, 291: 104565. DOI: 10.1016/j.coal.2024.104565.

Sadegh F., Sadegh N., Wongniramaikul W., Apiratikul R., Choodum A., 2024. Adsorption of volatile organic compounds on biochar: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 182: 559–578. DOI: 10.1016/j.psep.2023.11.071.

Sanchez-Monedero M.A., Cayuela M.L., Roig A., Jindo K., Mondini C., Bolan N., 2018. Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, 247: 1155–1164. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.193.

Sanei H., Rudra A., Przyswitt Z.M.M., Kousted S., Sindlev M.B., Zheng X., Nielsen S.B., Petersen H.I., 2024. Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark. *International Journal of Coal Geology*, 281: 104409. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104409.

Sanei H., Rudra A., Zhou Z., Petersen H.I., Nilsen P.J., Chairamonti D., Nielsen S.B., 2026. A unified framework for biochar carbon permanence. *International Journal of Coal Geology*, 324, 105075. DOI: 10.1016/j.coal.2026.105075.

Sen U., Esteves B., Aguiar T., Pereira H., 2023. Removal of antibiotics by biochars: A critical review. *Applied Sciences*, 13: 11963. DOI: 10.3390/app132111963.

Seroka N.S., Luo H., Khotseng L., 2024. Biochar-derived anode materials for lithium-ion batteries: A review. *Batteries*, 10(5): 144. DOI: 10.3390/batteries10050144.

Setyawan H.Y., Sunyoto N.M.S., Choirun A., Musyaroh M., Arwani M., 2024. The potential of biochar-slurry fuel from agricultural wastes in Indonesia. *Cogent Engineering*, 11(1): 2307201. DOI: 10.1080/23311916.2024.2307201.

Su C., Zeng G.M., Gong J.L., Yang C.P., Wan J., Hu L., Hua S.S., Guo Y.Y., 2016. Impact of carbon nanotubes on the mobility of sulfonamide antibiotics in sediments in Xiangjiang River. *RSC Advances*, 6: 16941–16951. DOI: 10.1039/c5ra25201f.

Toufiq Reza 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.

Wang H., Lee S.J., Olarte M.V., Zacher A.H., 2016. Bio-oil stabilization by hydrogenation over reduced metal catalysts at low temperatures. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(10): 5533–5545. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b01270.

Wang H., Zhou P., Zhao X., 2025. Applications of biochar in fuel and feedstock substitution: A review. *Energies*, 18(17): 4511. DOI: 10.3390/en18174511.

Wang X., Guo Z., Hu Z., Zhang J., 2020. Recent advances in biochar application for water and wastewater treatment: A review. *Peer J*, 8: e9164. DOI: 10.7717/peerj.9164.

Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1: 56. DOI: 10.1038/ncomms1053.

Xiong X., Yu I.K.M., Cao L., Tsang D.C.W., Zhang S., Ok Y.S., 2017. A review of biochar-based catalysts for chemical synthesis, biofuel production, and pollution control. *Bioresource Technology*, 246: 254–270. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.06.163.

Ye L., Camps-Arbestain M., Shen Q., Lehmann J., Singh B., Sabir M., 2020. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Biochar and Sustainable Soil Management*, 36(1): 2–18. DOI: 10.1111/sum.12546.

Zhang C., Lai C., Zeng G.M., Huang D.L., Yang C.P., Wang Y., Zhou Y.Y., Cheng M., 2016. Efficacy of carbonaceous nanocomposites for sorbing ionizable antibiotic sulfamethazine from aqueous solution. *Water Research*, 95: 103–112. DOI: 10.1016/j.watres.2016.03.014.

Zhang L., Jing Y., Xiang Y., Zhang R., Lu H., 2018. Responses of soil microbial community structure changes and activities to biochar addition: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 643: 926–932. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.231.

Zimmerman A.R., Gao B., 2013. The stability of biochar in the environment. [w:] Ladygina N., Rineau F. (eds.). Biochar and soil biota. *CRC Press*: 1–40.



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*