



Zbigniew JELONEK¹, Adam NOCOŃ², Iwona JELONEK³, Marta JACH-NOCOŃ²

Identyfikacja zanieczyszczeń w popiołach powstałych ze spalania pelletów drzewnych metodą petrografii optycznej

Streszczenie: Badania popiołów pod względem składu petrograficznego, chemicznego i właściwości fizycznych prowadzone są na szeroka skalę i prezentowane w licznych opracowaniach naukowych. Popioły te są pozyskiwane z filtrów i elektrofiltrów zamontowanych w dużych instalacjach przemysłowych. Masowe badanie popiołów pozyskanych bezpośrednio z palenisk rusztowych lub nadmuchowych, zamontowanych w kotłach o niskiej mocy, praktycznie rozpoczęło się dopiero w wyniku walki ze smogiem powstającym wraz z niską emisją. Przy czym pobieranie materiału do badań z palenisk domowych zazwyczaj wiąże się z badaniem ich pod kątem ewentualnego spalania odpadów w kotłach o niskiej mocy. Jest to celowe działanie w przypadku kotłów starego typu, które mogły być zasilane praktycznie dowolnym paliwem. Obecnie na rynku są oferowane piece nowego typu na paliwa dedykowane, w których istnieje możliwość spalania paliw wyłącznie do tych kotłów dostosowanych. Ma to na celu spalanie tylko paliw odnawialnych (z biomasy) lub paliw kopalnych mniej uciążliwych dla środowiska, w założeniu o wysokich parametrach jakościowych, np. ekogroszek, brykiety z węgla brunatnego i torfu. Autorzy opracowania skupili się na przebadaniu popiołu pozyskanego z kotłów przeznaczonych do spalania pelletów drzewnych poprzez wykonanie analizy mikroskopowej pozostałości po spalonej biomase. Tego typu badanie popiołów dostarcza kompleksowej informacji na temat efektywności procesu spalania, zawartości zanieczyszczeń pozostałych w popiele oraz przydatności popiołu do innych zastosowań. Cały proces od momentu pobrania materiału do badań poprzez wykonanie preparatu i przeprowadzenie analizy trwa do 12 godzin, co zapewnia szybką decyzję o regulacji pieca lub zmianie paliwa. Identyfikacja składników popiołu została opracowana na bazie wyników prac przeprowadzonych przez Grupę roboczą do spraw popiołów lotnych (Komisja III) Międzynarodowego Komitetu ds. Węgla i Petrologii Organicznej – ICCP. Wykazana klasyfikacja została uzupełniona o nowe kluczowe elementy występujące w popiołach powstałych w wyniku spalania pelletów drzewnych w kotłowniach przydomowych. Pozwoliło to na określenie procentowej zawartości charakterystycznych składników występujących w badanym materiale, które stają się swoistym reperem do opiniowania o jakości i sprawności kotła oraz spalanego pelletu.

Słowa kluczowe: popiół, pellet drzewny, biomasa, spalanie

¹ Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katowice; GGS-PROJEKT Pracownia geologii i ochrony środowiska Sp. z o.o., Chorzów; e-mail: zbigniew@jelonek.edu.pl

² Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katowice; P.P.H.U. Zamech, Czeladź; e-mail: a.nocoon@budmetnocon.pl; marta@omega-sosnowiec.pl

³ Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi, Katowice; e-mail: iwona.jelonek@us.edu.pl

The determination of contaminants in ashes produced after the combustion of wood pellets using optical petrography

Abstract: Petrographic and physico-chemical analyses of ashes are carried out on a large scale and presented in numerous scientific papers. The mentioned ashes are obtained from filters and electrostatic precipitators mounted in large industrial installations. The large-scale analysis of the ashes obtained directly from grate furnaces or blast furnaces mounted in low-power boilers started with combating smog and low-stack emissions. The collection of ash samples from household furnaces usually involves the analysis of the combustion of waste in low-power boilers. This is justified in the case of old type boilers, which were designed to use virtually any fuel. Currently, new types of boilers, designed to burn dedicated fuels, are offered on the market. The aim is to use only renewable fuels (biomass) or fossil fuels with high quality parameters, which are more environment-friendly, e.g. eco-pea coal, lignite briquettes, or peat briquettes. The authors of the study focused on examining the ash obtained from boilers for burning wood pellets by performing microscopic analysis of residues after biomass combustion. The above mentioned analysis provides a comprehensive information on the efficiency of the combustion process, the content of contaminants remaining in the ash, and the suitability of ash for other applications. The entire process, from the moment of collecting the samples to the execution of the analysis takes up to 12 hours, which ensures a quick decision on furnace adjustment or fuel change. The ash components were determined based on the results obtained by the Fly-Ash Working Group of the International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP). The mentioned classification has been supplemented with new key elements occurring in ashes resulting from the combustion of wood pellets in household boilers. This allowed determining the percentage content of characteristic components in the tested material, which can be used as a specific benchmark when issuing opinions on the quality and efficiency of the boiler and the combusted pellets.

Keywords: ash, pellet, biomass, combustion

Wprowadzenie

Analizy popiołów lotnych pozyskiwanych ze spalania w kotłach konwencjonalnych oraz fluidalnych o dużej mocy (Szponder i Trybalski 2009) są kompleksowo opisane w licznych publikacjach. W większości przypadków literatura w tym temacie skupia się na popiołach pozyskiwanych z urządzeń wychwytyjących pozostałości niespalonej materii lub popiołów pozyskanych z miejsc gromadzenia odpadów poprzemysłowych (Antonkiewicz 2009; Bahranowski i in. 1999; Ciesielczuk i in. 2011; Jelonek 2003; Jelonek i Mirkowski 2015; Kasprzyk i in. 2017; Kosior-Kazberuk i Lelusz 2010; Giergiczny 2007; Misz 2002; Poluszyńska 2013; Shibaoka 1985; Suárez-Ruiz 2017; Styszko-Grochowiak i in. 2015; Szulik i in. 2017; Waclawowicz 2012; Wiktor i in. 2017). Opracowania przedstawiają wyniki badań składu granulometrycznego, analizy termicznej, składzie chemicznym, składzie fazowym (Strzałkowska 2016) i wskazują na przydatność popiołów jako dodatków do materiałów budowlanych czy nawozów (Właśniewski 2009). Informacje o składzie chemicznym i właściwościach fizycznych popiołów poza wskazaniem praktycznymi do ich wykorzystania mogą również wspomóc metody i kierunek ich utylizacji (Misiak 2015).

Zastosowanie mikroskopii optycznej w większości opracowań jest wykazywane jako metoda uzupełniająca badania składu chemicznego i jakościowego popiołów klasyfikowanych pod kątem dalszej przeróbki lub utylizacji. W przypadku zastosowania popiołów jako komponentów na dużą skalę tego typu kompleksowe podejście do badanego materiału jest jak najbardziej wskazane. Wiedza ta umożliwi użycie popiołów o znanym składzie chemicznym, które nie będą wchodzić w niepożądane reakcje z pozostałymi składnikami do produkcji przemysłowej.

Autorzy publikacji proponują wykorzystanie wyłącznie badań petrograficznych do wstępnej identyfikacji zanieczyszczeń w popiołach pozostałych po spalaniu paliwa typu pellet drzewny w kotłach o mocy do 25 kW. Tego typu badania zostały zastosowane dla uzyskania konkretnych informacji (np. pozostałe zanieczyszczenia stałe w popiołach, jakość paliwa, efektywność spalania). Ponadto podczas pobierania materiału do badań autorzy spotkali się z dużym zainteresowaniem ze strony użytkowników kotłów CO pozyskaniem powyżej wymienionych wyników badań.

1. Prezentacja materiału i zastosowana metodyka badań

Popiół ze spalonych pelletów został pozyskany z pięciu domowych kotłów tego samego typu Forest wyprodukowanych przez Budmet-Nocoń o mocy 25 kW. W kotłach zostały spalone pellety od pięciu różnych producentów, przy czym cztery posiadały na opakowaniach dokładne dane producentów oraz przyznane certyfikaty EN+A1. Jeden z pelletów został oznakowany jako produkt markowy sieci handlowej bez podania na opakowaniu informacji o produkcie producenta oraz jakiegokolwiek certyfikatu potwierdzającego jakość wyrobu. Według deklaracji osób obsługujących piece zostało w nich spalone po około 100 kg pelletu tego samego rodzaju. Z popielnika każdego z pięciu kotłów pobrano po 0,2 kg popiołu (rys. 1) i wykonano pięć zglądów do obserwacji pod mikroskopem zgodnie z normą ISO 7404-2 (2009). Zglądy poddano analizie mikroskopowej przy użyciu mikroskopu automatycznego polaryzacyjnego Axiolmager M2m firmy ZEISS z dostawianym stolikiem



Rys. 1. Niespalone fragmenty biomasy (1) w jednej z badanych próbek popiołu uzyskanych ze spalania pelletu drzewnego, obraz makroskopowy

Fig. 1. Unburned fragments of biomass (1) in the examined ash samples obtained from the combustion of wood pellets, microscopic image

skaningowym 75 × 50, z panelem kontrolnym MCW-2 ECO w świetle białym odbitym spolaryzowanym w immersji olejowej przy powiększeniu 500×. Podczas obserwacji w każdym z preparatów zliczono po 250 punktów wyznaczonych na przecięciu krzyża nitkowego umieszczonego w okularze w celu procentowego wyodrębnienia poszczególnych zaobserwowanych składników przy skoku stolika 500 μm. Analizę wykonano zgodnie z zaproponowaną klasyfikacją przez Międzynarodowy Komitet ds. Węgla i Petrologii Organicznej – ICCP (Suárez-Ruiz i Valentim red. 2015) identyfikując następujące składniki w popiołach:

Część 1 obejmuje składniki w podziale na:

- nieorganiczne,
- metale,
- niemetale,
- materia mineralna.

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji mikroskopowych do klasyfikacji dodane zostały dwie podgrupy:

- spieki (konglomeraty, żuźle),
- ziarna piasku (wyłącznie krzemiany).

A także składniki pochodzenia organicznego:

- organiczne,
- niespalona biomasa.

W części 2 zostały zaliczone cechy optyczne składników:

- stopione
- niestopione.

W części 3 umieszczono składniki o strukturze:

- masywnej,
- porowatej.

W części 4 wykazano elementy o właściwościach:

- izotropowe,
- anizotropowe.

W części 5 oznaczono pochodzenie składników w zależności od rodzaju spalanego paliwa.

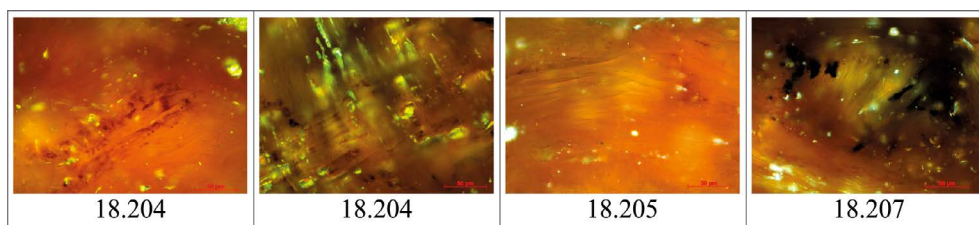
- węgiel, biomasa, pozostałe paliwa.

Zastosowana klasyfikacja ICCP opiera się wyłącznie na cechach optycznych w obrazie mikroskopowym i została opracowana w wyniku wieloletnich badań w ramach grupy roboczej przez gremium międzynarodowe zajmujące się spalaniem paliw stałych (Suárez-Ruiz i Valentim red. 2015).

2. Wyniki badań

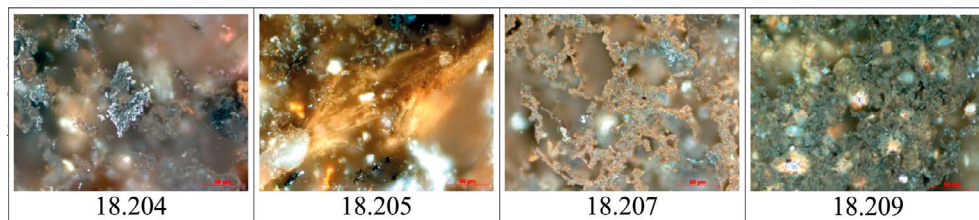
Podczas przygotowywania zglądów mikroskopowych z pozyskanych popiołów makroskopowo zauważono, w trzech spośród pięciu analizowanych próbek stwierdzono obecność licznie występującej, niespalonej biomasy (rys. 1). Obserwacja preparatów mikroskopowych potwierdziła zawartość biomasy niespalonej (rys. 2) w popiołach na poziomie 2,4–6,0%

w trzech próbkach. Pozostałe dwie próbki popiołów zarówno makroskopowo, jak i mikroskopowo nie wykazały zawartości niespalonych pelletów (tab. 1, część 1). Dominującym składnikiem we wszystkich badanych zgładach jest materia mineralna obecna pod postacią różnych związków chemicznych. Wyodrębniono z tej części spieki stanowiące swoiste konglomeraty nieorganicznych związków zawierających mieszaninę prawdopodobnie metali i składników mineralnych oraz stopionego piasku, a stanowiących jeden zwięzły klaster w obrazie mikroskopowym (rys. 3). Zaobserwowano również duże ilości ziaren o składzie krzemionki (rys. 4), które ze względu na znaczny udział w czterech analizowanych próbkach zostały wydzielone jako dodatkowa podgrupa (tab. 1, część 1). Zawartość metali oraz fragmentów rdzy (rys. 5) w próbkach wahała się w granicach 1,6–8,8%, przy czym zaobserwowano tylko dwa przypadki występowania metali kolorowych w próbce 18.204.



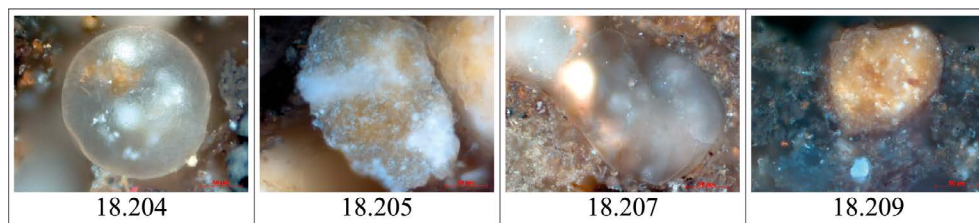
Rys. 2. Niespalone fragmenty biomasy w badanych próbkach popiołów, obraz mikroskopowy

Fig. 2. Unburned fragments of biomass in the examined ash samples, microscopic image



Rys. 3. Spieki metali, składniki mineralne oraz ziarna stopionego piasku w badanych próbkach popiołów, obraz mikroskopowy

Fig. 3. Metal sinters, minerals, and grains of molten sand in the examined ash samples, microscopic image




Rys. 4. Ziarna piasku, stopiona krzemionka w badanych próbkach popiołów, obraz mikroskopowy

Fig. 4. Sand grains and molten silica in the examined ash samples, microscopic image

TABELA 1. Udział procentowy składników występujących w badanych próbkach popiołów powstałych w wyniku spalania pelletów drzewnych oraz charakterystyka poszczególnych składników

TABLE 1. The percentage share and characteristics of individual components in the examined ash samples resulting from the combustion of wood pellets


| Nr próbki | Część 1 | | | | | Razem [%] | |
|-----------|-------------------|-----------|------------|------------------|------------|-----------|--------------------|
| | Typ | | | | organiczne | | niespalona biomasa |
| | nieorganiczne | | organiczne | | | | |
| | metale | niemetale | | organiczne | | | |
| | materia mineralna | | | | | | |
| 18.204 | 8,8 | 76,0 | | | 9,2 | 6,0 | 100 |
| | | pozostała | spieki | SiO ₂ | | | |
| | | 40,4 | 17,2 | 18,4 | | | |
| 18.205 | 1,6 | 90,4 | | | 5,6 | 2,4 | 100 |
| | | pozostała | spieki | SiO ₂ | | | |
| | | 50,4 | 29,6 | 10,4 | | | |
| 18.207 | 2,0 | 87,2 | | | 8,0 | 2,8 | 100 |
| | | pozostała | spieki | SiO ₂ | | | |
| | | 51,2 | 32,8 | 3,2 | | | |
| 18.209 | 2,8 | 74,0 | | | 23,2 | 0,0 | 100 |
| | | pozostała | spieki | SiO ₂ | | | |
| | | 33,6 | 29,2 | 11,2 | | | |
| 18.223 | 2,4 | 95,6 | | | 2,0 | 0,0 | 100 |
| | | pozostała | spieki | SiO ₂ | | | |
| | | 95,6 | 0,0 | 0,0 | | | |

| Nr próbki | Część 2 | | Część 3 | |  |
|-----------|----------------|-------------|-----------|----------|---|
| | cechy optyczne | | struktura | | |
| | stopiony | niestopiony | masywne | porowate | |
| 18.204 | 16 | 7 | 8 | 15 | /250 |
| 18.205 | 10 | 4 | 5 | 9 | /250 |
| 18.207 | 15 | 5 | 6 | 14 | /250 |
| 18.209 | 9 | 49 | 15 | 43 | /250 |
| 18.223 | 0 | 5 | 3 | 2 | /250 |

W tabeli podano ilość punktów przypadających na poszczególny składnik widoczny na przecięciu krzyża w 250 punktach pomiarowych

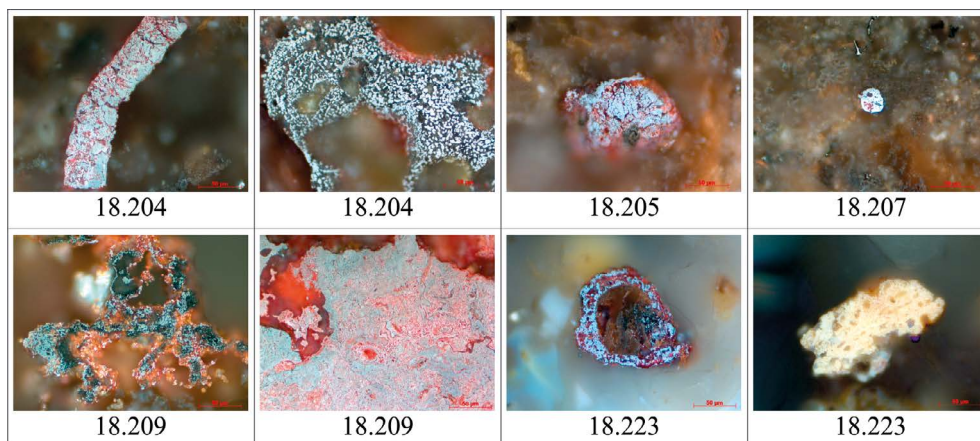
TABELA 1. cd.

TABLE 1. cont.

| Nr próbki | Część 4 | | Część 5 | | |  |
|-----------|------------|--------------|-------------|---------|-------------|---|
| | tekstura | | pochodzenie | | | |
| | izotropowa | anizotropowa | węgiel | biomasa | inne paliwa | |
| 18.204 | 16 | 6 | 1 | 22 | 0 | /250 |
| 18.205 | 6 | 8 | 1 | 13 | 0 | /250 |
| 18.207 | 18 | 2 | 3 | 17 | 0 | /250 |
| 18.209 | 58 | 0 | 0 | 58 | 0 | /250 |
| 18.223 | 4 | 1 | 0 | 5 | 0 | /250 |

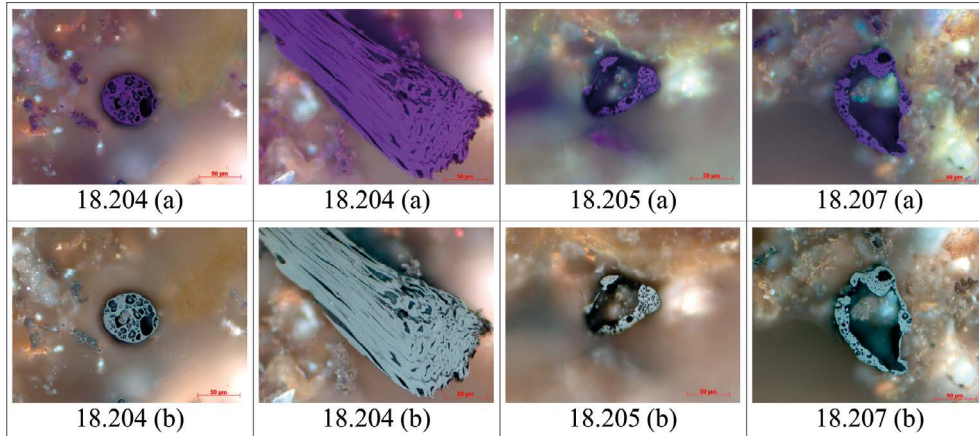
W tabeli podano ilość punktów przypadających na poszczególne składniki widoczny na przecięciu krzyża w 250 punktach pomiarowych

Na podstawie kolejnej cechy optycznej (tab. 1, część 2, 3), badane próbki z wyjątkiem jednej nr 18.209 wykazują stopioną i porowatą strukturę. Tego typu cechy świadczą o niedopalonych cząstkach związanych z bardzo szybkim podawaniem pelletów do komory spalania. Natomiast przeważająca tekstura izotropowa (tab. 1, część 4) badanych próbek jest charakterystyczna dla biomasy, z której produkowany jest pellet drzewny. Na podstawie analizy petrograficznej ostatnia wyróżniona cecha, jaką jest pochodzenie badanych próbek (tab. 1, część 5) potwierdza, że próbki pelletów drzewnych wyprodukowane zostały z biomasy. Jednak zanieczyszczenie typu węgiel występujące w ilości do 3% informuje, że w przypadku trzech producentów nie został zachowany czysty proces technologiczny produkcji.



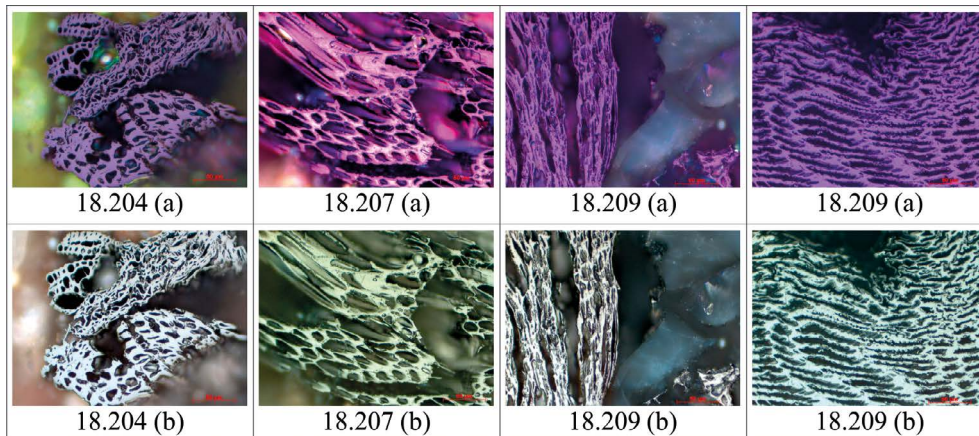
Rys. 5. Metale i rdza w badanych próbkach popiołów, obraz mikroskopowy

Fig. 5. Metals and rust in the examined ash samples, microscopic image



Rys. 6. Pozostałości po spaleniu węgla w badanych próbkach popiołów, obraz mikroskopowy (a) z zastosowaniem płytki 1λ , (b) światło spolaryzowane

Fig. 6. Fossil coals in the examined ash samples, microscopic image (a) determined using (a) a retarder plate of 1λ was added, (b) polarized light



Rys. 7. Biomasa (węgiel drzewny) w badanych próbkach popiołów, obraz mikroskopowy (a) z zastosowaniem płytki 1λ , (b) w świetle spolaryzowanym

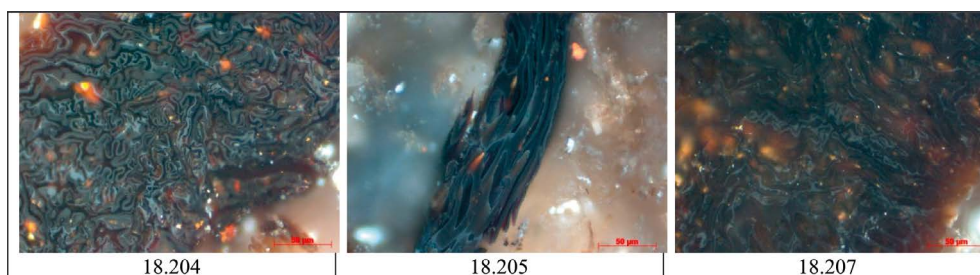
Fig. 7. Charcoal in the examined ash samples, microscopic image (a) determined using (a) a retarder plate of 1λ was added, (b) polarized light

Podsumowanie

Na pięć przebadanych próbek popiołów pochodzących ze spalania pelletów drzewnych tylko jedna (18.223) wykazuje cechy paliwa spalonego w odpowiednich warunkach. Fakt

ten nie dziwi o tyle, że kocioł, w którym spalano pellet i pozyskano popiół do badań, pracuje u producenta pieców grzewczych i jest regularnie serwisowany oraz kalibrowany do optymalnych parametrów spalania przez fachową obsługę. W zglądzie 18.223 (tab. 1) stwierdzono 95,6% związków chemicznych pochodzenia nieorganicznego. Brak jest w składzie popiołu zanieczyszczeń typu spieki, krzemionka, ziarna piasku a zawartość metalu (żelazo, rdza) kształtuje się na poziomie tylko 2,5%, a zmienionej materii organicznej na poziomie 2,0%. Analiza zglądu 18.204 obrazuje skrajny przypadek źle ustawionego kotła, w którym spalanie biomasy było wysoce nieefektywne. Materia mineralna stanowi w popiele tylko 76,0%, w dodatku z dużą zawartością spieków i krzemionki. Pomijając kwestię finansową, czyli niespalone paliwo na poziomie 6,0% w skali zużywanych kilku ton w sezonie grzewczym, w związku z dużą zawartością metali popiół z tej kotłowni kwalifikuje się jako uciążliwy odpad. Pomimo iż obecność niedopalonych, widocznych makroskopowo w popiele pelletów nie jest dla użytkownika kotła wystarczającą przesłanką wskazującą na potrzebę jego regulacji, to wyniki przeprowadzonej oceny petrograficznej i informacje o ewentualnych stratach finansowych przynoszą pożądany efekt. Dodatkowym i jednocześnie pozytywnym rezultatem spalania w sprawnych kotłach jest ograniczenie niskiej emisji, niezadymianie okolicy oraz już wspomniane oszczędności finansowe. Zidentyfikowane zanieczyszczenia stałe (metale, spieki, elementy pochodzące z innych paliw, krzemionka, niespalona biomasa) dzięki metodzie obserwacji mikroskopowej zglądów poprzez określenie procentowej zawartości tych składników może być również przydatna do określania innych zastosowań popiołów. Obecnie modne wysypywanie popiołów na ogródek jako nawozu w przypadku roślin nieprzeznaczonych do spożycia może i nie wymaga badań zawartości zanieczyszczeń stałych w popiele. Ale już używanie popiołu niemonitorowanego o dużej zawartości elementarnych metali (zwłaszcza kolorowych) jako nawozu pod rozsady nie jest wskazane. Kolejnym składnikiem występującym w popiołach informującym o nieprawidłowym procesie spalania pelletów w kotle jest węgiel drzewny. Węgiel drzewny tworzy się z kory (rys. 8) przy zmniejszonym dopływie powietrza do paleniska, kora natomiast w peliecie jest traktowana jako zanieczyszczenie tego paliwa.

Badania petrograficzne zglądów wykonanych z popiołów uzyskanych z kotłów domowych o niskiej mocy zasilanych pelletem poza praktycznym zastosowaniem dają nam wiele



Rys. 8. Fragmenty kory w badanych próbkach popiołów, obraz mikroskopowy

Fig. 8. Bark grains in the examined ash samples, microscopic image

odpowiedzi o charakterze czysto poznawczym. Otrzymujemy informacje o cechach optycznych składników popiołów, przydatne na przykład do interpretacji procesów zachodzących w kotłach domowych oraz przy ocenie dokładności spalania pelletów drzewnych. Możemy również rozpoznać strukturę oraz teksturę składników, a co najważniejsze – określić pochodzenie badanego materiału.

Badania wspierane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) w ramach programu: Doktorat Wdrożeniowy.

Literatura

- Antonkiewicz, J. 2009. Wykorzystanie popiołów paleniskowych do wiązania metali ciężkich występujących w glebie. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 41, s. 398.
- Bahranowski i in. 1999 – Bahranowski, K. Górniak, K. Ratajczak, T. Sikora, W.S. Szydlak, T. i Wyszomirski, P. 1999. Wymywalność niektórych pierwiastków głównych i śladowych z zawiesiny wodnej popiołów lotnych. *Prace Specjalne* 13, s. 35–41.
- Ciesielczuk i in. 2011 – Ciesielczuk, T., Kusza, G. i Nemś, A. 2011. Nawożenie popiołami z termicznego przekształcania biomasy źródłem pierwiastków śladowych dla gleb. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 49, s. 219–227.
- Jelonek, I. 2003. The coal matter in fly ash from Katowice steel work power station. Mineralogical Society of Poland. *Special Papers* 22, s. 95–97.
- Jelonek, I. i Mirkowski, Z. 2015. Petrographic and geochemical investigation of coal slurries and of the products resulting from their combustion. *International Journal of Coal Geology* 139, s. 228–236.
- Kasprzyk i in. 2017 – Kasprzyk, M., Szpak, A., Jelonek, I. i Wiktor, M. 2017. The analysis of mercury content in coals and ashes. *E3S Web of Conferences* 17, 00037 (2017).
- Kosior-Kazberuk, M. i Lelusz, M. 2010. Ocena popiołu pochodzącego z jednoczesnego spalania biomasy i węgla jako składnika kompozytów cementowych. *Materiały Ceramiczne* nr 2, s. 166–170.
- Giergiczny, E. 2007. *Popiół lotny ze współspalania jako dodatek do cementu i betonu w aspekcie wymagań normowych i środowiskowych [W:] Popioły z energetyki*. Międzyzdroje, 17–20 października 2007 r. monografia, red. T. Szczygielski, Szczecin: Ekotech.
- ISO 7404-2: 2009. Methods for the petrographic analysis of coals – Part 2: Methods of preparing coal samples. 12 s.
- Misiak, J. 2016. Cząstki węglowe w popiołach lotnych ze spalania węgla z polskich złóż. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 31, z. 3, s. 112–120.
- Misz, M. 2002. Comparison of chars in slag and fly ash as formed in pf boilers from Będzin Power Station (Poland). *Fuel* 81, s. 1351–1358.
- Poluszyńska, J. 2013. Możliwości zastosowania popiołów ze spalania biomasy w gospodarowaniu osadami ściekowymi. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* R. 6, 13, s. 49–59.
- Shibaoka, M. 1985. Microscopic investigation of unburnt char in fly ash. *Fuel* 64, s. 263–269.
- Strzałkowska, E. 2016. Skład materii organicznej i nieorganicznej krzemionkowych popiołów lotnych, jako element ich przydatności w technologiach materiałów budowlanych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 32, z. 1, s. 71–88.
- Styszko-Grochowiak i in. 2004 – Styszko-Grochowiak, K., Gołaś, J., Jankowski, H. i Kozinski, S. 2004. Characterization of the coal fly ash for the purpose of improvement of industrial on-line measurement of unburned carbon content. *Fuel* 83, s. 1847–1853.
- Suárez-Ruiz i in. 2017 – Suárez-Ruiz, I., Valentim, B., Borrego, A.G., Bouzinos, A., Flores, D., Kalaitzidis, S., Malinconico, M.L. Marques, M. Misz-Kennan, M. Predeanu, G. Montes, J.r. Rodrigues, S. Siavalas, G. i Wagner, N. 2017. Development of a petrographic classification of fly-ash components from coal combustion and co-combustion. (An ICCP Classification System, Fly-Ash Working Group – Commission III). *International Journal of Coal Geology* 183, s. 188–203.
- Suárez-Ruiz, I. i Valentim, B. red. 2015. *Atlas of Fly Ash Occurrences Identification and Petrographic Classification of Fly Ash Components Working Group*. Commission III – ICCP s. 203.

- Szponder, D.K. i Trybalski, K. 2009. Określenie właściwości popiołów lotnych przy użyciu różnych metod i urządzeń badawczych. *Górnictwo i Geoinżynieria* r. 33, z. 4, s. 288.
- Szulik i in. 2017 – Szulik, W., Burczyk, A. i Jelonek, I. 2017. Analiza możliwości identyfikacji domieszek, dodatków w materiałach opałowych oraz odpadów powstałych w wyniku ich spalania. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* nr 100, s. 257–264.
- Wacławowicz, R. 2012. Rolnicze wykorzystanie popiołów ze spalania biomasy. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu. Katedra Kształtowania Agroekosystemów i Terenów Zieleni. [Online] <http://www.up.wroc.pl/> [Dostęp: 28.02.2012].
- Wiktor i in. 2017 – Wiktor, M., Jelonek, I., Kasprzyk, M. i Szpak, A. 2017. The determination of mercury content in the biomass intended for industrial power plant. *E3S Web of Conferences* 17, 00097 (2017).
- Właśniewski, S. 2009. Wpływ nawożenia popiołem lotnym z węgla kamiennego na wybrane właściwości chemiczne gleby piaszczystej i plonowanie owsa. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* nr 4, s. 479–488.

