

Dominika Katarzyna Szponder, Kazimierz Trybalski**

OKREŚLANIE WŁAŚCIWOŚCI POPIOŁÓW LOTNYCH PRZY UŻYCIU RÓŻNYCH METOD I URZĄDZEŃ BADAWCZYCH**

1. Wprowadzenie

Energia elektryczna i ciepła są niezbędne do normalnego funkcjonowania współczesnych cywilizacji. Ponieważ w Polsce ich produkcja oparta jest na termicznym przetwarzaniu paliw kopalnych, a w szczególności węgla kamiennego i brunatnego, w elektrowniach i elektrociepłowniach konwencjonalnych, wzrost zapotrzebowania na energię nieuchronnie wiąże się z wytwarzaniem coraz to większych ilości odpadów produkcyjnych w postaci popiołów lotnych. Ze względu na zastosowanie różnych metod spalania (klasyczne i fluidalne kotły), różny skład paliwa (węgiel kamienny, brunatny, biomasa), wysoki stopień dyspersji substancji mineralnych paliwa oraz dynamikę procesów termicznych, ziarna popiołu wykazują wysoki stopień zróżnicowania morfologicznego, składu fazowego i chemicznego, co ma znaczenie dla jego wykorzystania gospodarczego [7]. Dobór odpowiedniej metody utylizacji popiołów jest bardzo trudny i wymaga dogłębnego poznania ich właściwości fizycznych, a także składu chemicznego i mineralogicznego. Do określania właściwości tych, jak i innych odpadów mineralnych stosowano dotychczas przede wszystkim badania petrograficzne i mineralogiczne, analizę sitową, analizę wzbogacalności, określenie właściwości magnetycznych i elektrycznych, itp. W ostatnich latach coraz większe znaczenie w badaniu właściwości surowców i odpadów mineralnych mają nowoczesne, doskonalsze metody badawcze takie jak: analiza densymetryczna przeprowadzana przy użyciu piknometrii gazowej, pomiar powierzchni właściwej metodą Blaine'a, analiza granulometryczna wykonywana przy użyciu laserowego miernika cząstek, analiza termiczna przeprowadzana na derywatorografii, rentgenowska analiza dyfrakcyjna oraz mikroskopia elektronowa skaningowa wraz z mikroanalizą rentgenowską. Uzyskiwane w takich badaniach wyniki wykorzystywane są do oceny możliwości wykorzystania i uzdatniania odpadów. Istnieje także wiele innych za-

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł został zrealizowany w ramach pracy statutowej 11.11.100.238

stosowań tych nowoczesnych metod [14]. W artykule tym zaprezentowano możliwości wykorzystania wyżej wymienionych metod i urządzeń pomiarowych do scharakteryzowania właściwości popiołów lotnych.

2. Charakterystyka materiałów i metod pomiarowych

2.1. Charakterystyka badanego materiału

Popiół lotny ma właściwości zbliżone do pucolany i powstaje w wyniku spalania rozdrobnionego węgla, a następnie opuszcza palenisko pyłowe wraz ze spalinami. Ma postać miękkiego mineralnego pyłu w kolorze od jasno do ciemnoszarego i składa się z: składników podstawowych (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO); składników ubocznych (MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O); składników śladowych (TiO_2 , P_2O_5 , Mn i inne) oraz niespalonego węgla (straty żarowe) [7]. W związku z tym, że popioły lotne charakteryzują się różnorodnym składem chemicznym, fazowym i morfologicznym ich właściwości fizyko-chemiczne są różnorodne, dlatego też można podzielić je na wiele rodzajów [4]. Podstawowymi sposobami podziału popiołów lotnych jest podział ze względu na: konstrukcję paleniska (popioły ze spalania w kotłach konwencjonalnych i ze spalania w kotłach fluidalnych); geochemiczne pochodzenie spalane-go paliwa węglowego (popioły ze spalania węgla kamiennego i ze spalania węgla brunatnego); selektywny sposób odbierania popiołów z różnych sekcji elektrofiltrów (popioły z I strefy, z II strefy i z III strefy); udział głównych składników (krzemianowy, glinowy, wapniowy) [6].

Badaniom poddano popioły lotne pochodzące z dwóch zakładów energetycznych znajdujących się na terenie Polski i stosujących technologię wytwarzania energii opartą na konwencjonalnym spalaniu węgla kamiennego (próbki Popiół L — Elektrociepłownia „Kraków” SA, próbki Popiół O — BOT Elektrownia Opole SA). Zarówno próbka pierwotna Popiół O jak i Popiół L pochodziły ze zbiorników retencyjnych popiołu lotnego umieszczonych na terenie wymienionych zakładów, gromadzących odpady pozyskiwane w trzech strefach elektrofiltrów znajdujących się na każdym z bloków energetycznych zakładów. Zgromadzone próbki były, więc uśrednioną mieszaniną popiołów lotnych wytwarzanych w tych przedsiębiorstwach. W każdym z wyżej wymienionych zakładów z leja spustowego zbiornika retencyjnego, za pomocą sondy (z głębnika) o średnicy wewnętrznej 80 mm i długości 1500 mm, w czasie grawitacyjnego ruchu materiału pobrano próbkę wielkości około jednego kilograma.

2.2. Opis metod pomiarowych

Istnieje wiele konwencjonalnych i nowoczesnych metod badania właściwości fizycznych, chemicznych i mineralogicznych surowców oraz odpadów mineralnych, np. popiołów lotnych. Metody te można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej z nich zalicza się metody pomiarowe pozwalające na określenie właściwości fizycznych badanych materiałów, np. analizę densymetryczną wykonywaną metodą piknometryczną, pomiar powierzchni

właściwej metodą Blaine'a oraz analizę granulometryczną przy użyciu granulometru laserowego. Drugą grupę przedstawionych metod badawczych stanowią metody, wykorzystywane do określania właściwości chemicznych i mineralogicznych materiałów, takie jak analiza termiczna, dyfraktometria rentgenowska, mikroskopia skaningowa i mikroanaliza rentgenowska [3].

Analiza densymetryczna, wykonywana metodą piknometrii gazowej, pozwala na bardzo dokładne wyznaczenie gęstości badanego materiału. Gęstość wyznacza się poprzez pomiar masy próbki wykonywany przy użyciu wagi analitycznej oraz pomiar objętości próbki wykonywany przy użyciu piknometru gazowego. Piknometria gazowa polega na określeniu objętości ciała stałego poprzez pomiar objętości gazu, wypartego przez badaną próbkę z uprzednio skalibrowanego naczynia pomiarowego. Jako medium stosuje się substancje o właściwościach zbliżonych do właściwości gazu doskonałego, niereagujące z badanym materiałem i nieulegające adsorpcji (np. hel) [1].

Aparat Blaine'a jest wykorzystywany do oznaczania powierzchni właściwej badanej próbki. Pomiar wykonuje się za pomocą powierzchni omierza, zwykle zgodnie z normą PN-63/B-04300 [12]. Pomiar wykonywany na aparacie Blaine'a oparty jest na pomiarze przepływu gazu przez warstwę sprasowanego preparatu (metoda przepuszczalności). Metoda ta bazuje na własnościach przepływu laminarnego (lepkiego) typu Poiseuille'a przez porowatą warstwę. Pomiar wykonuje się dla dwóch substancji — próbki wzorcowej i próbki badanej. Wyniki otrzymane tą metodą mają charakter względny i zależą od użytego w doświadczeniu wzorca. By uzyskać bezwzględną wartość powierzchni właściwej należy wykonać dodatkowe obliczenia [13].

Analiza granulometryczna, wykonywana przy użyciu laserowego miernika cząstek, daje pełną ocenę składu ziarnowego przebadanej próbki drobnoziarnistej. Analiza uziarnienia w urządzeniach tego typu oparta jest na pomiarze intensywności rozproszenia spójnego światła laserowego przez ziarna zawarte w zawiesinie. Gdy światło lasera napotyka populację ziarn, rozkład objętościowy ich wielkości wyraża się za pomocą intensywności rozproszonego na nich światła, przy czym kąt załamania wiązki laserowej na ziarnach mniejszych jest większy niż na dużych ziarnach. Powstały w ten sposób obraz dyfrakcyjny jest identyfikowany za pomocą układu czujników, natomiast otrzymane sygnały wykorzystuje się do wyliczenia rozkładu wielkości cząstek [15]. W czasie określania składu ziarnowego wyznacza się częstość występowania wybranych klas ziarnowych. Wyniki analizy składu ziarnowego przedstawiane są w postaci tabeli lub wykresów (histogram — procentowa zawartość ziarn, których wielkości mieszczą się w wybranych przedziałach klasowych; krzywa kumulacyjna — w postaci ciągłej funkcji obrazującej zawartość w badanym materiale ziarn o średnicach mniejszych, bądź większych od wybranej średnicy D ; krzywa rozkładu ziarnowego — zróżniczkowana krzywa kumulacyjna równoważna statystycznej funkcji gęstości). W celu scharakteryzowania rozkładu wielkości ziarn, zbliżonego do normalnego, jako parametry podaje się wartość średnią (medianę), odchylenie standardowe i wartość modalną (modę). W przypadku, gdy rozkład ziarn odbiega od rozkładu normalnego wyznacza się dodatkowo współczynniki asymetrii i spłaszczenia [2].

Rentgenowska analiza fazowa z wykorzystaniem metody proszkowej, wykonywana za pomocą aparatu rentgenowskiego, wykorzystuje promieniowanie rentgenowskie o znanej długości fali do badania nieznanymi faz krystalicznych. Badaniu poddaje się próbki polikrystaliczne, w formie sproszkowanego minerału, skały, próbki lite drobnoziarniste, minerały drobnokrystaliczne (np. popioły lotne). Metoda ta opiera się na założeniu, że w próbce złożonej z ziaren zorientowanych w sposób przypadkowy, określona ich liczba jest usytuowana względem wiązki monochromatycznego promieniowania rentgenowskiego padającego na preparat tak, że określone płaszczyzny sieciowe *hkl* spełniają warunek interferencji Bragga. Każdej fazie krystalicznej przypisuje się zbiór płaszczyzn sieciowych obsadzonych w sposób określony atomami bądź jonami tworzącymi tą fazę. Każda substancja charakteryzuje się odpowiednim odchyleniem od pierwotnego kierunku padania wiązki interferencyjnej, która jest rejestrowana na filmie (technika filmowa) lub za pomocą licznika Geigera lub scyntylicyjnego (dyfraktometria, technika licznikowa). Wynikiem badania z zastosowaniem metody proszkowej jest zapis widma w postaci dyfraktogramu w formie graficznej i liczbowej [8]. Skład mineralogiczny badanej próbki i zawartość procentowa poszczególnych faz są identyfikowane automatycznie za pomocą oprogramowania zawierającego katalogi wartości charakterystycznych dla poszczególnych faz. W wyniku przeprowadzenia badań tą metodą otrzymuje się pełną analizę zarówno jakościową jak i ilościową składu mineralnego badanych próbek [9].

Elektronowa mikroskopia skaningowa (SEM) jest obecnie najczęściej stosowaną nowoczesną metodą obserwacji i badań mikrostruktury. W mikroskopie skaningowym wiązka elektronów o średnicy rzędu 50÷100 nm bombarduje próbkę, kolejno omiata w sposób liniowy jej powierzchnię i wywołuje emisję elektronów wtórnych. Poddana działaniu wiązki elektronów próbka emituje różnego rodzaju sygnały, które są następnie rejestrowane za pomocą odpowiednich detektorów i kolejno przetwarzane na obraz badanej próbki, czy też widmo promieniowania rentgenowskiego. Sygnałami generującymi informacje o różnorodnych właściwościach badanej próbki są takie zjawiska jak: emisja elektronów wtórnych — topografia i morfologia, struktura krystaliczna, rozkład potencjału i natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w próbce; emisja elektronów wstecznie rozproszonych — informacje o topografii i morfologii, rozkładzie domen magnetycznych; emisja elektronów Augera — analiza chemiczna warstw powierzchniowych próbki, pomiar potencjałów lokalnych; katodoluminestencja — procesy rekombinacji w materiale, identyfikacja zanieczyszczeń, domieszek i niejednorodności struktury; emisja promieniowania rentgenowskiego charakterystycznego — chemiczna analiza jakościowa i ilościowa materiału; zależnie od stosowanej techniki badawczej: analiza jakościowa z całego obrazu — identyfikacja pierwiastków w wybranym obszarze; technika powierzchniowych rozkładów pierwiastków w badanym mikroobszarze — mapping pierwiastka; analiza liniowa — rozmieszczenie pierwiastka wzdłuż linii; analiza ilościowa punktowa — określenie pierwiastków występujących w danym punkcie w celu identyfikacji elementów mikrostruktury [5, 9].

Przy użyciu derywatografu wykonuje się kompleksową analizę termiczną, składającą się z dwóch etapów. Pierwszym z nich jest pomiar zmian masy próbki w czasie studzenia bądź

ogrzewania w funkcji czasu, w wyniku którego otrzymuje się wykres przedstawiający krzywe DTG (krzywa termograwimetryczna różnicowa) i TG (krzywa termograwimetryczna). Drugim etapem jest termiczna analiza różnicowa (krzywa DTA), która polega na pomiarze różnicy temperatur pomiędzy badaną próbką a substancją odniesienia, względem czasu bądź temperatury, przy czym próbki znajdują się w jednakowych warunkach, a ich ogrzewanie bądź chłodzenie jest ściśle kontrolowane. Badania kompleksowe metodami analiz termicznych pozwalają na prześledzenie reakcji, jakie zachodzą w wybranym interwale temperatur. W wyniku interpretacji i porównywania krzywych DTA, DTG, TG można określić rodzaj zachodzącej reakcji (odwadnianie, utlenianie, rozkład, przemiany polimorficzne, spiekanie, topnienie, itp.). Natomiast analizy krzywych TG i DTG pozwalają na dokładne oznaczenia ilościowe zachodzących procesów, co umożliwia analizę jakościową oraz ocenę ilościową biegu obserwowanych procesów [11].

Oprócz omówionych metod badania właściwości materiałów w literaturze można znaleźć wiele informacji o urządzeniach różnego typu, stosujących także odmienne metody badawcze.

3. Opis i analiza wyników badań

Na rysunkach 1–8 i w tabelach 1–3 przedstawiono wyniki badań próbek popiołów lotnych, przeprowadzonych na wyżej wymienionych urządzeniach. Ze względu na dużą ilość zdjęć zamieszczono tylko wybrane, ale wnioskowanie prowadzono na podstawie wszystkich otrzymanych wyników. Ich interpretacja pozwala otrzymać informacje na temat właściwości fizycznych, składu chemicznego i mineralogicznego badanych próbek oraz określenia odpowiedniej metody ich utylizacji.

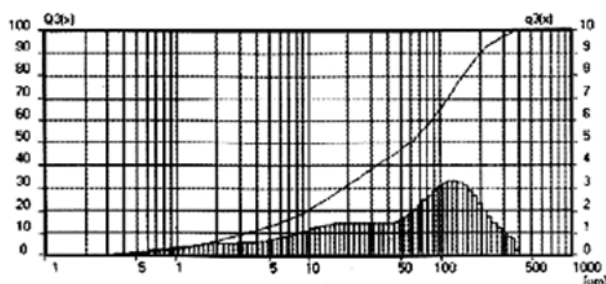
W tabeli 1 zaprezentowano wyniki pomiaru gęstości (piknometr gazowy) oraz powierzchni właściwej dwóch przebadanych próbek popiołów lotnych.

TABELA 1
Wyniki pomiaru gęstości powierzchni właściwej próbek

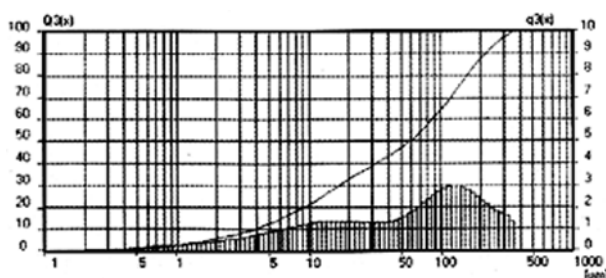
Próbka	Gęstość właściwa, g/cm ³	Powierzchnia właściwa, cm ² /g
Popiół L	2,2529	3233,668
Popiół O	2,1847	3523,541

Określone na podstawie pomiaru piknometrycznego wartości gęstości popiołów lotnych są porównywalne dla obu próbek. Gęstość wynika ze składu chemicznego oraz mineralogicznego badanych próbek i jest zbliżona do średniej gęstości minerałów budujących te popioły. Pomiar gęstości jest podstawowym badaniem wykonywanym dla wszystkich odpa-

dów i surowców wykorzystywanych w szeroko pojętym budownictwie. Pozwala na dobranie odpowiedniego składu mieszanek wykorzystywanych do produkcji materiałów budowlanych, podsadzek, itp. Także wyznaczone za pomocą aparatu Blaine'a wartości powierzchni właściwej są porównywalne dla obu badanych próbek. W zestawieniu z wartościami powierzchni właściwej popiołów lotnych podawanymi przez literaturę ($2500\pm 6000\text{ cm}^2/\text{g}$) [10], otrzymane w badaniu wielkości klasyfikują popioły poddawane analizie, do grupy popiołów o rozwiniętej powierzchni właściwej, co związane jest z ich drobnoziarnistością i występowaniem wielu porowatych lub kulistych ziarn o rozbudowanej strukturze. Wielkość powierzchni właściwej ma szczególne znaczenie przy określaniu właściwości cementów (badane popioły należą do surowców wykorzystywanych do produkcji wysokiej jakości cementów). Ma to także znaczenie w przypadku wykorzystania tych popiołów do produkcji ceramiki, betonów, podsadzek, nasypów drogowych, czy nawet w rolnictwie. Uzyskane rozkłady składu ziarnowego próbek popiołu są przedstawione na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Analiza granulometryczna — Popioł L



Rys. 2. Analiza granulometryczna — Popioł O

Dla popiołu L wielkości ziaren zawarte są w przedziale 0 do $420\ \mu\text{m}$ (3% ziarn jest mniejsze niż $1\ \mu\text{m}$, 99% ziarn ma wymiary mniejsze niż $340\ \mu\text{m}$, a 80% to ziarna poniżej $150\ \mu\text{m}$). W związku z tym można ten popiół uznać za drobno uziarniony. Rozkład ziarnowy Popiołu L ma jedno maksimum wynoszące około $126\ \mu\text{m}$ (rozkład jednomodalny). Wartość średnia wynosi $57\ \mu\text{m}$, a odchylenie standardowe $9\ \mu\text{m}$.

Popiół O ma podobny skład ziarnowy. Wielkości ziarn w tym przypadku zawarte są w przedziale od 0 do 360 μm (2,5% ziarn mniejszych od 1 μm , 99% ziarn mniejszych od 350 μm , a 80% ziarn poniżej 170 μm — popiół drobnoziarnisty). Popiół O ma rozkład jednomodalny z maksimum w przedziale ok. 125÷138 μm (moda), wartość średnią zawierającą się w przedziale 58÷62 μm i odchylenie standardowe równe 10 μm . Oba badane popioły mogą być stosowane do produkcji materiałów ceramicznych, cementów, betonów, podsadzek, tworzyw sztucznych, natomiast ich zastosowanie do produkcji kruszyw sztucznych, czy w rolnictwie jest ograniczone.

Wyniki pomiarów próbek popiołu L i popiołu O, wykonanych metodą dyfraktometryczną, przedstawiono w tabelach 2 i 3.

Popiół L jest zaliczany do grupy popiołów krzemianowych o znacznej zawartości związków glinu. Głównym składnikiem tego popiołu są krzemiany, występujące zarówno w postaci kwarcu (skała płonna) jak i mullitu (skała płonna — glinokrzemiany, łupki ogniotrwałe i gliny). Kwarc w popiołach lotnych ma podobne zastosowanie jak naturalne kruszywa mineralne o zbliżonym składzie (np. piaski), natomiast mullit nadaje popiołowi właściwości ogniotrwałe często wykorzystywane w ceramice i budownictwie. Dodatkowo skład mineralogiczny popiołu uzupełniony jest przez węglany wapnia i magnezu, które wpływają na jego właściwości wiążące.

Popiół O należy do grupy popiołów lotnych krzemianowo — glinowych, zawierających niewielkie ilości składników wapniowych w postaci dolomitu. Składa się on z dużych ilości mullitu syntetycznego i kwarcu. Badana próbka zawierała także dodatkowo pewne ilości żelaza w postaci hematytu, co stanowi cenny składnik uzupełniający surowiec do produkcji klinkieru, cementu czy też ceramiki budowlanej. Domieszka dolomitowa natomiast uzupełnia skład mieszanek do produkcji materiałów budowlanych i podsadzek, gdyż nadaje mieszanke właściwości wiążące. Oba popioły można stosować do produkcji materiałów budowlanych, podsadzek w górnictwie, do budowy dróg.

Wyniki pomiarów wykonanych za pomocą mikroskopu skaningowego ukazane są na rysunkach 3–12.

Dzięki tym pomiarom możemy stwierdzić, że zarówno Popiół L jak i Popiół O są drobnoziarniste (ziarna 1÷100 μm), (rys. 3, rys. 8). Przeważają w nich ziarna kuliste gładko powierzchniowe (pirosfery, cenosfery, plerosfery (rys. 9)), pojedyncze (rys. 9) lub połączone w aglomeraty (rys. 10). Na podstawie punktowej analizy składu pierwiastkowego tych ziarn (rys. 10–12) można stwierdzić, iż składają się głównie z krzemu, glinu i tlenu (szkliwo, kwarc, mullit). Pozostałe ziarna dzielą się na ziarna: o nieregularnych kształtach (cienkie płytki, prążki — spoiwo ziarn kulistych, zawierające wapń, magnez, sód, potas, węgiel — kalcyt, dolomit) (rys. 4 i 6); kuliste zbudowane z kryształów o pokroju słupkowym (żelazo, tytan i inne metale — hematytu) (rys. 5 i 7); o nieregularnym kształcie, silnie porowate o zaokrąglonych lub ostrokrawędzistych brzegach (20÷100 μm , węgiel). Popioły te można wykorzystać przede wszystkim w produkcji materiałów budowlanych, w górnictwie do produkcji podsadzek, drogownictwie, rolnictwie (zależnie od zawartości węgla).

TABELA 2
Analiza dyfraktometryczna — Popiół L

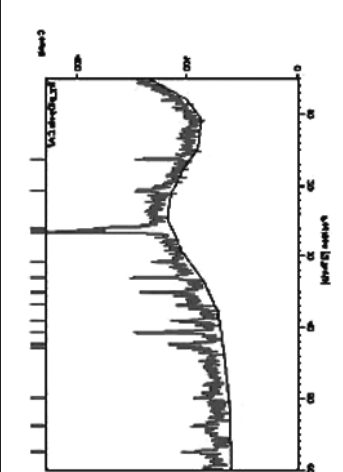
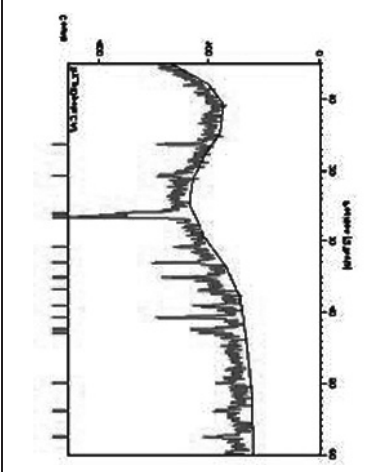
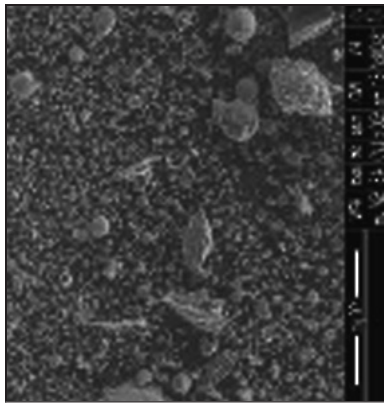
	Masa, %	49	47	4
	Kod Ref.	81-0065	82-1237	86-2336
	Sc.	62	39	22
	Nazwa minerału	kwarc	mullit, syntetyczny	kalcyt i dolomit
	Ekspozycja	0,000	0,000	0,000
	Współczynnik skali	0,896	0,202	0,069
	Wzór chemiczny	SiO ₂	Al _{5,65} Si _{0,35} O _{9,175}	(Mg _{1,29} Ca _{0,871})CO ₃

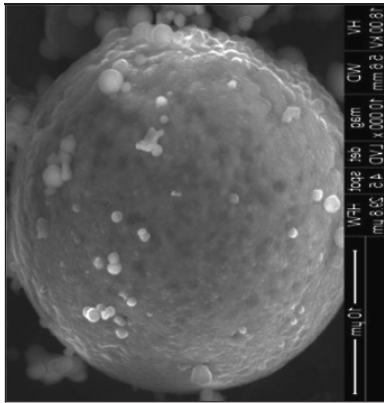
TABELA 3
Analiza dyfraktometryczna — Popiół O

	Masa, %	25	6	62	7
	Kod Ref.	83-2187	88-2359	79-145	73-2444
	Sc.	60	31	51	24
	Nazwa minerału	kwarc	hematyt	mullit, syntetyczny	dolomit
	Ekspozycja	0,000	0,000	0,000	0,000
	Współczynnik skali	0,906	0,199	0,501	0,195
	Wzór chemiczny	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al _{4,984} Si _{1,016} O _{9,...}	CaMg (CO ₃) ₂

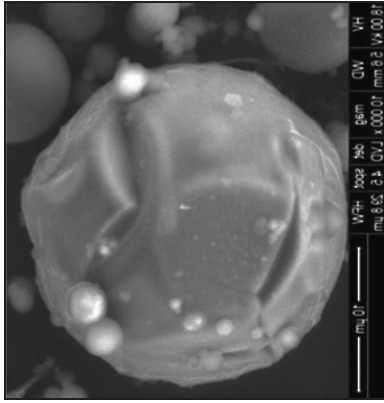
Próbka Popiół L



Rys. 3. Widok ogólny próbki



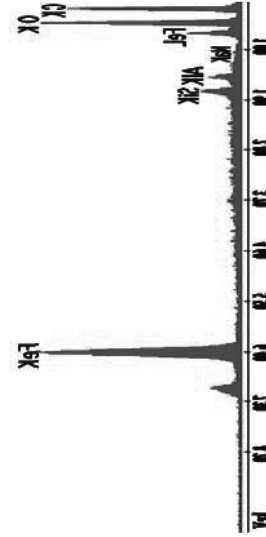
Rys. 4. Ziarno z rozbudowaną powierzchnią



Rys. 5. Ziarno gładko powierzchniowe

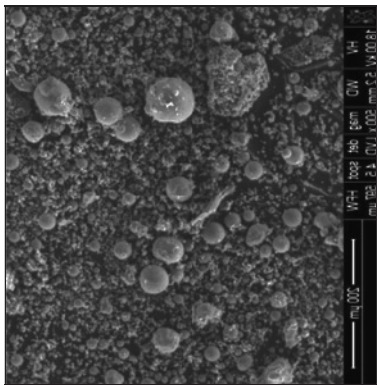


Rys. 6. Mikroanaliza w punkcie nr 1 na rysunku 4

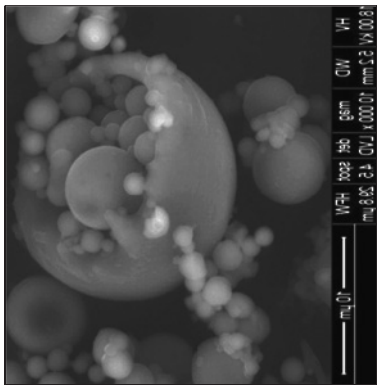


Rys. 7. Mikroanaliza w punkcie nr 1 na rysunku 5

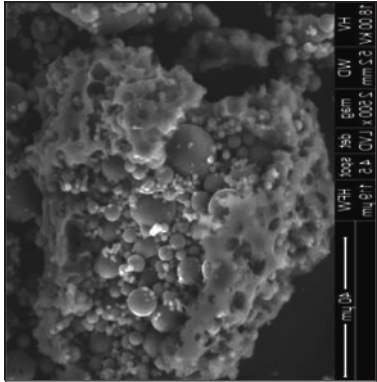
Próbka Popiół O



Rys. 8. Widok ogólny próbki



Rys. 9. Pterosfera



Rys. 10. Aglomerat



Rys. 11. Mikroanaliza w punkcie nr 1 na rysunku 10



Rys. 12. Mikroanaliza w punkcie nr 2 na rysunku 10

Na podstawie analizy wyników otrzymanych za pomocą derywatografu ustalono, że w czasie ogrzewania, w obu badanych próbkach, zaszła reakcja chemiczna utleniania pozostałości węgla do tlenku węgla (IV). Procentowa zawartość węgla pozostałego w próbce Popiołu L, po spalaniu w elektrowni, wynosi 3,5% całkowitej masy popiołu. Natomiast dla Popiołu O zawartość niespalonego węgla w popiele lotnym wynosi 3%. Z otrzymanych wyników można wnioskować, że popiół ten może być stosowany przede wszystkim w produkcji materiałów budowlanych i ceramice.

4. Podsumowanie

Polska energetyka oparta jest na przetwarzaniu paliw kopalnych, a w szczególności węgla kamiennego i brunatnego, co prowadzi do powstawania w procesie produkcyjnym dużych ilości odpadów, które należy poddawać wtórnemu wykorzystaniu. Przyjęty kierunek utylizacji popiołów lotnych, jak i innych odpadów jest uzależniony od ich właściwości fizycznych oraz składu chemicznego i mineralogicznego. Zastosowane urządzenia i metody badawcze pozwalają na pełne scharakteryzowanie właściwości fizycznych i budowy mineralogicznej różnego rodzaju surowców, odpadów i produktów mineralnych. Każda z metod rozpatrywana osobno daje obraz właściwości badanych próbek przedstawiony pod różnymi kątami, charakteryzuje ona popioły lotne w innym aspekcie, pokazuje pewien obszar, natomiast nie daje pełnego opisu. Podjęcie dalszych badań przy wykorzystaniu wyżej omówionych i innych nowoczesnych metod badawczych może przyczynić się do stworzenia kompleksowych procedur badania surowców i odpadów mineralnych w skali laboratoryjnej oraz podstaw do zastosowania tych procedur w skali półprzemysłowej i przemysłowej, do bieżącego badania zmiennych właściwości surowców mineralnych i powstających z nich produktów. Umożliwi to nie tylko bieżącą ocenę właściwości produktów i znalezienie najbardziej ekonomicznych sposobów utylizacji odpadów.

LITERATURA

- [1] Ahuja S., Jespersen N.: *Modern Instrumental Analysis*. Elsevier, 2006
- [2] Bolewski A., Kubisz J., Żabiński W.: *Mineralogia ogólna*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa, 1981
- [3] Elssner G., Hoven H., Kiessler G., Wellner P.: *Ceramics and Ceramic Composites*. Materialographic Preparation. Elsevier, 1999
- [4] Giergiczny, Z.: Popiół lotny aktywnym składnikiem cementu. IV Sympozjum Naukowo-Techniczne: Reologia w technologii betonu, Gliwice, 2002
- [5] Goldstein J., Newbury D.E., Joy D.C., Lyman C.E., Echlin P., Lifshin E., Sawyer L.C., Michael J.R.: *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. 3rd ed., Plenum Press, New York, 2003
- [6] Hycnar J.: Popioły elektrowniane — niebilansowana baza surowców mineralnych. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, nr 15, str. 3–15, 1983
- [7] Kasprzyk, K., Pietrykowski, P.: Wykorzystanie popiołów lotnych w gospodarce [online]. Zakład Spalania i Detonacji, Politechnika Wroclawska, , 2008, http://www.spalanie.pwr.wroc.pl/badania/popioły/popioły_go.htm/ [cit. 2008–04–10]
- [8] Kędzior A., Trybalski K., Konieczny A.: Zastosowanie nowoczesnych metod badawczych w inżynierii mineralnej, *Inżynieria Mineralna*, nr 3, 2003

- [9] *Krawczykowska A.*: Rozpoznawanie obrazów w identyfikacji typów rud i ich właściwości w produktach przeróbki rud miedzi. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Katedra Przeróbki Kopalini i Ochrony Środowiska, Kraków, 2007 (rozprawa doktorska)
- [10] *Malolepszy J., Tkaczewska E.*: Wpływ frakcji ziarnowej krzemionkowych popiołów lotnych na proces hydratacji i właściwości cementu, V Konferencja Naukowo-Techniczna: Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej MATBUD'2007, Kraków, 2007
- [11] *Nocuń-Wczelik W. (RED.)*: Laboratorium materiałów wiążących. AGH UWND, Kraków, 2003
- [12] Norma PN-63/B-04300 Cement — Badanie cech fizycznych, punkt: Oznaczenie powierzchni właściwej metodą Blaine'a
- [13] *Rymon-Lipiński T., Zborowski J.*: Fizykochemiczne metody badań w ceramice. AGH UWND, Kraków, 1978
- [14] *Szponder D.*: Badanie właściwości fizycznych popiołów lotnych z wykorzystaniem różnych metod i urządzeń badawczych. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Katedra Przeróbki Kopalini i Ochrony Środowiska, Kraków, 2008 (praca magisterska)
- [15] *Trybalski K., Kędzior A., Krawczykowski D.*: Urządzenia i metody pomiarowe uziarnienia w polskich zakładach przeróbki rud metali nieżelaznych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 28, z. 2/1, 2004