



EWA STRZĄLKOWSKA\*

## **Skład materii organicznej i nieorganicznej krzemionkowych popiołów lotnych, jako element ich przydatności w technologiach materiałów budowlanych**

### **Wprowadzenie**

Od szeregu lat w wielu technologiach materiałów budowlanych, zwłaszcza przy produkcji cementu i betonu, wykorzystuje się popioły lotne (Galos i Uliasz Bocheńczyk 2005; Galos i in. 2009). Szczególnie cennym materiałem, zagospodarowywanym niemal w 100%, są popioły lotne krzemionkowe, definiowane jako drobny pył mający właściwości pucolanowe, powstały w wyniku spalania węgla kamiennego w kotłach pyłowych. Zagospodarowanie tych popiołów pozwala z jednej strony na ograniczenie ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne, podczas ewentualnego składowania, z drugiej strony wpływa na obniżenie zużycia surowców naturalnych, które mogą być przez nie zastąpione. Popiół lotny stosowany jako dodatek do betonu czy cementu musi jednak spełniać określone wymogi, ujęte w odpowiednich normach. Jednym z kryteriów stosowalności popiołów, odpowiedzialnym za ich aktywność pucolanową jest uziarnienie, o którym w znacznym stopniu decyduje: miejsce poboru z instalacji odpopielania, rozdrobnienie użytego paliwa, a także jego pochodzenie oraz zawartość i rodzaj domieszek mineralnych występujących w węglu. W litera-

\* Dr inż., Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice; e-mail: ewa.strzalkowska@polsl.pl

turze zwrócono uwagę na zależność składu fazowego popiołów lotnych od ich uziarnienia (Krztoń 2006; Tkaczewska, Małolepszy 2009; Giergiczny, Giergiczny 2010; Strzałkowska w druku). Wyniki prowadzonych badań wykazały, że popioły o drobniejszym uziarnieniu charakteryzują się większym udziałem fazy szklistej, natomiast w klasach grubszych koncentrują się głównie niespalone cząstki węgla. Obecność części palnych jest ważnym parametrem decydującym o przydatności popiołów w budownictwie. Obowiązująca w kraju norma (PN-EN 450-1: 2012, *Popiół lotny do betonu*) kategoryzuje popioły w zależności od zawartości w nich niespalonego węgla, oznaczanej jako strata prażenia. Ze wzrostem strat prażenia zwiększa się wodozadność popiołu, na skutek obecności w nim dużej ilości porowatych ziaren, o silnie rozwiniętej powierzchni. Może to przynieść negatywne skutki w postaci obniżonej trwałości betonu, związanej ze zwiększoną nasiąkliwością i zmniejszoną mrozoodpornością. Nie wszystkie formy morfologiczne niespalonej materii organicznej w jednakowym stopniu wpływają na zwiększoną chłonność wody, co wynika z ich różnej porowatości, a ta zależna jest m.in. od składu maceralnego spalanego węgla (Misz 2004). Niekorzystna jest również adsorpcja na węglu substancji chemicznych dodawanych do mieszanek betonowych np.: środków napowietrzających czy plastyfikatorów, co zwiększa koszty wytwarzania betonu (Kurdowski 2010; Giergiczny 2009). Mając na uwadze powyższe przesłanki w niniejszej pracy zbadano, jakie formy morfologiczne niespalonego węgla koncentrują się w poszczególnych klasach ziarnowych popiołu, a także jak zmienia się jakościowy skład fazowy popiołu lotnego krzemionkowego w zależności od jego uziarnienia.

## 1. Metodyka badań

Badanie składu granulometrycznego uśrednionej próbki popiołu prowadzono metodą sitową przy wykorzystaniu kompletu sit o wymiarach oczek: 0,315; 0,25; 0,125; 0,09; 0,071; 0,063 i 0,045 mm. Do badań fazowych wykorzystano termoanalyzer firmy MOM Budapeszt, analizę prowadzono w tyglach korundowych, ogrzewając próbkę w atmosferze powietrza z szybkością 10°C/min do temperatury 1000°C. W czasie pomiarów rejestrowano efekty cieplne na krzywych DTA, ubytek masy na krzywych TG i szybkość ubytku masy na krzywych DTG. Analizy termiczne, których wyniki przedstawiono na rysunkach 6–8 wykonano w tych samych warunkach technicznych, tzn.: jednakowa naważka 600 mg (z wyjątkiem dwóch najgrubszych klas ziarnowych popiołu) i ta sama czułość galwanometrów: DTA – 1/10, DTG – 1/5, TG – 100 mg. Jedynie dla klasy najgrubszej powyżej 0,315 mm, krzywe uzyskano przy mniejszej czułości galwanometru TG – 200 mg i mniejszej naważce 300 mg, a dla klasy 0,315–0,25 mm naważka wynosiła 500 mg. Dla wybranych klas ziarnowych popiołu zastosowano dodatkowo badania rentgenograficzne przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego firmy Philips, stosując promieniowanie CuK $\alpha$  (rys. 1–5) i mikroskopowe z zastosowaniem mikroskopu polaryzacyjnego firmy ZEISS w świetle przechodzącym i odbitym (fot. 1–12). Badania uzupełniono analizą składu chemicznego uśrednionej próbki

popiołu metodą spektrometrii fluorescencji rentgenowskiej (XRF). Straty prażenia (LOI) oznaczono metodą wagową zgodnie z obowiązującą normą.

## 2. Wyniki badań

### 2.1. Skład granulometryczny

Wychód klasy powyżej 0,045 mm przekracza 40%, co oznacza, że badany popiół nie spełnia wymogów normowych dotyczących mialkości. W celu wyeliminowania tej niekorzystnej cechy i doprowadzenia do zgodności z obowiązującą normą, koniecznym byłoby domielenie popiołu uzyskując tym samym większą powierzchnię właściwą, a co za tym idzie – większą reaktywność badanego popiołu. Może to jednak przynieść niepożądany efekt w postaci zwiększonej wodożądności mieszanki betonowej, wynikający z destrukcji kulistych cząstek popiołu (Nowak-Michta 2012). Celowym zatem wydaje się odsianie dwóch najgrubszych klas ziarnowych: powyżej 0,315 mm i od 0,315 do 0,25 mm, których ubytek masy wynosi odpowiednio 21% i 10% (tab. 1, rys. 8). Zabieg ten zwiększy udział procentowy drobniejszych cząstek popiołu, a także dzięki wyeliminowaniu największych cząstek niespalonego węgla, zmniejszy się sumaryczna wartość strat prażenia.

Tabela 1. Skład granulometryczny badanej próbki popiołu

Table 1. The granulometric composition of the fly ash sample

Symbol próbki	Klasa ziarnowa [mm]	Wychód [% mas.]	Suma wychodów [% mas.]	Ubytek masy [% mas.]
1	> 0,315	0,25	0,25	20,7
2	0,315–0,25	0,75	1,00	10,0
3	0,25–0,125	15,64	16,64	6,2
4	0,125–0,09	14,82	31,46	4,5
5	0,09–0,071	7,79	39,25	3,3
6	0,071–0,063	23,74	62,99	3,2
7	0,063–0,045	18,57	81,56	2,8
8	< 0,045	18,44	100	2,2
K	Nadawa	–	–	3,6

## 2.2. Skład chemiczny

Skład chemiczny uśrednionej próbki popiołu zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Skład chemiczny próbki popiołu lotnego

Table 2. Chemical composition of the fly ash sample

Składnik chemiczny	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
[% wag.]	55,13	22,84	6,09	2,84	6,11	0,54	1,30	0,90	0,35	3,60

Analizując zawartość podstawowych składników popiołu należy uznać, że popiół ten spełnia wymagania chemiczne stawiane popiołom lotnym stosowanym do betonu, określone w normie PN-EN 450-1 ponieważ:

- ◆ suma zawartości dwutlenku krzemu SiO<sub>2</sub>, tlenku glinu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i tlenku żelaza Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wynosi 84,07%, przekracza tym samym wymagane 70% masy,
- ◆ całkowita zawartość tlenku wapnia CaO wynosi 6,11% masy, zatem wymagania dotyczące zawartości reaktywnego tlenku wapnia należy uznać za spełnione,
- ◆ całkowita zawartość alkaliów jest znacznie niższa niż 5% i wynosi 1,84% masy,
- ◆ zawartość tlenku magnezu MgO nie przekracza 4% masy i wynosi 2,84%.

Ponieważ wielkość strat prażenia stanowi 3,6% masy, popiół ten spełnia wymagania wspomnianej wyżej normy także w tym zakresie, mieszcząc się w kategorii A.

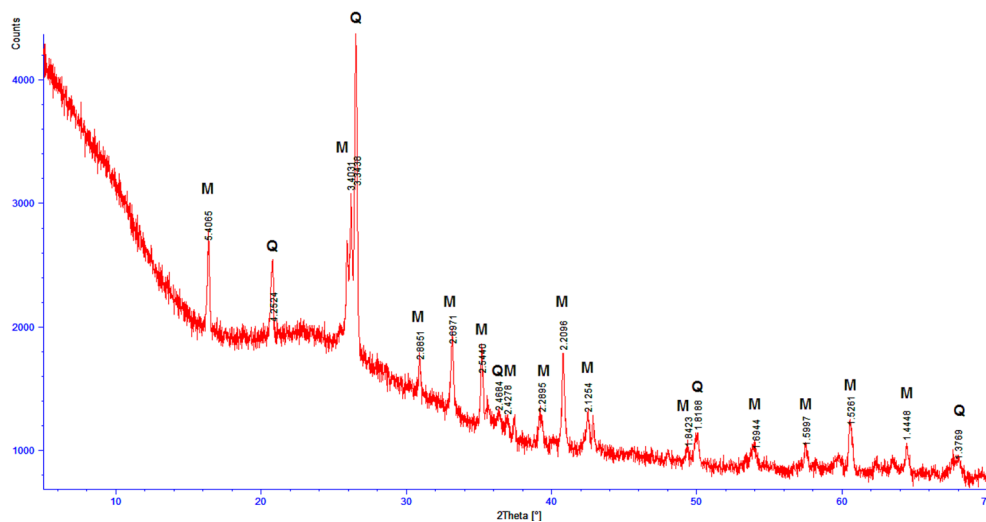
## 2.3. Skład fazowy

Podobny przebieg dyfraktogramów wybranych klas ziarnowych popiołów i próbki surowej wskazuje na podobny skład fazowy badanego materiału (rys. 1–5).

Na podstawie uzyskanych dyfraktogramów można stwierdzić, że głównymi składnikami krystalicznymi popiołu są mullit i kwarc. Mullit jest końcowym produktem zawartej w węglu wsadowym, przeobrażonej termicznie ilastej substancji mineralnej. Pojawienie się tej fazy następuje już w temperaturze około 1000°C, jednak w miarę wzrostu temperatury następuje porządkowanie struktury mullitu i wzrost jego kryształów. Badania mikroskopowe wykazały, że igiełkowe kryształy mullitu występują wśród kryptokrystalicznych agregatów (trudnych do identyfikacji z uwagi na zbyt małe rozmiary) lub tworzą inkluzje w sferycznych cząstkach popiołu (fot. 7). Krzemionka tworząca się podczas powstawania mullitu wchodzi częściowo w skład fazy ciekłej, nadmiar zaś krystalizuje w postaci krystobalitu. Jak wykazały wcześniejsze badania (Kapuściński i Strzałkowska 2007), ziarna kwarcu pierwotnego występującego w węglu charakteryzują się wysoką czystością, prawie 100% SiO<sub>2</sub> (fot. 8).

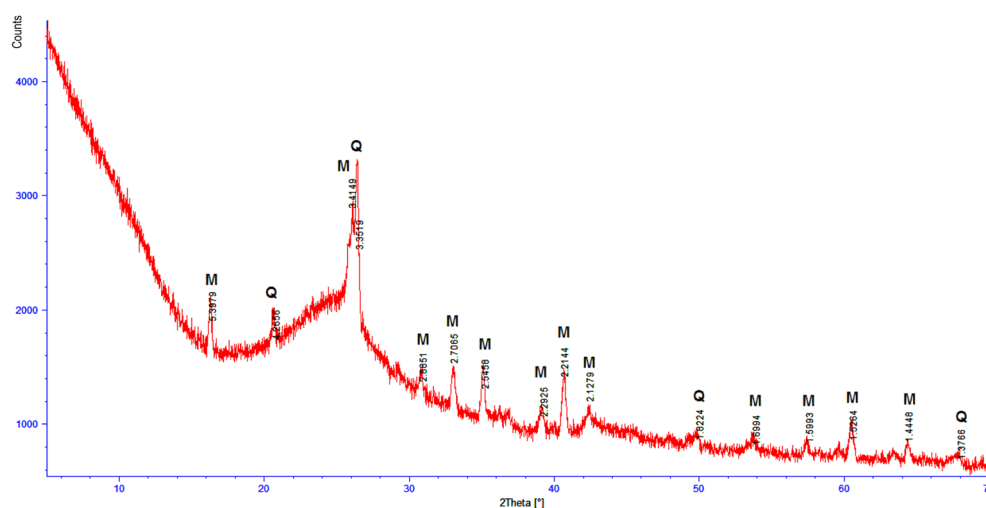
Biorąc pod uwagę skład chemiczny badanej próbki popiołu, nie wyklucza się obecności w próbce innych minerałów. Potwierdzeniem tej tezy może być wykazana w trakcie

badań mikroskopowych obecność pojedynczych ziaren magnetytu i hematytu (fot. 10–12), czy też stwierdzona podczas badań termicznych obecność węgla wapnia  $\text{CaCO}_3$  (kalcytu), o czym świadczy wyraźny efekt endotermiczny w temperaturze około  $700^\circ\text{C}$  (rys. 6). Występowanie tych faz nie zostało jednak potwierdzone w badaniach rentgenograficznych. Przyczyną może być niewielki ich udział procentowy (poniżej wykrywalności zastosowanej metody dyfrakcji rentgenowskiej) lub niski stopień ich wykrystalizowania.



Rys. 1. Dyfraktogram próbki popiołu krzemionkowego K (Q – kwarc, M – mullit)

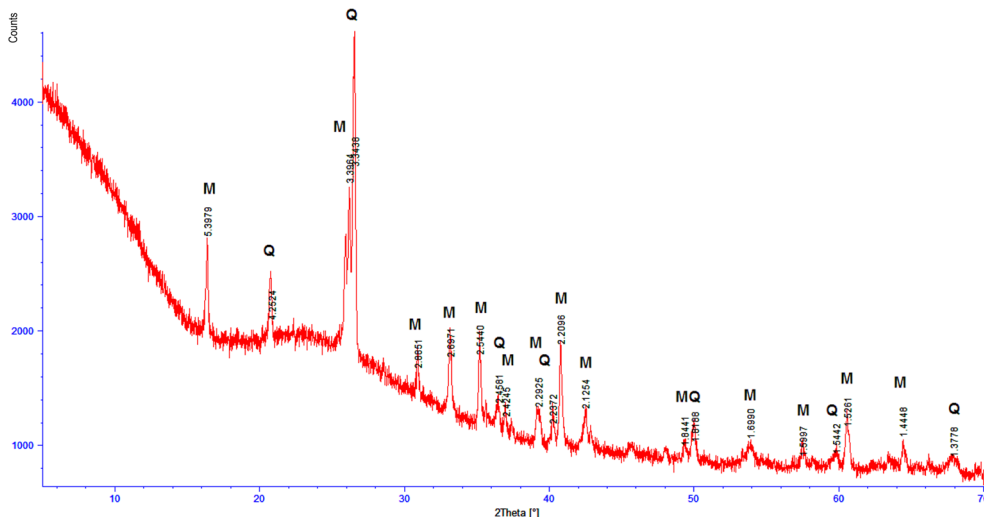
Fig. 1. The diffraction pattern of the siliceous fly ash sample K (Q – quartz, M – mullite)



Rys. 2. Dyfraktogram klasy ziarnowej  $> 0,315$  mm (Q – kwarc, M – mullit)

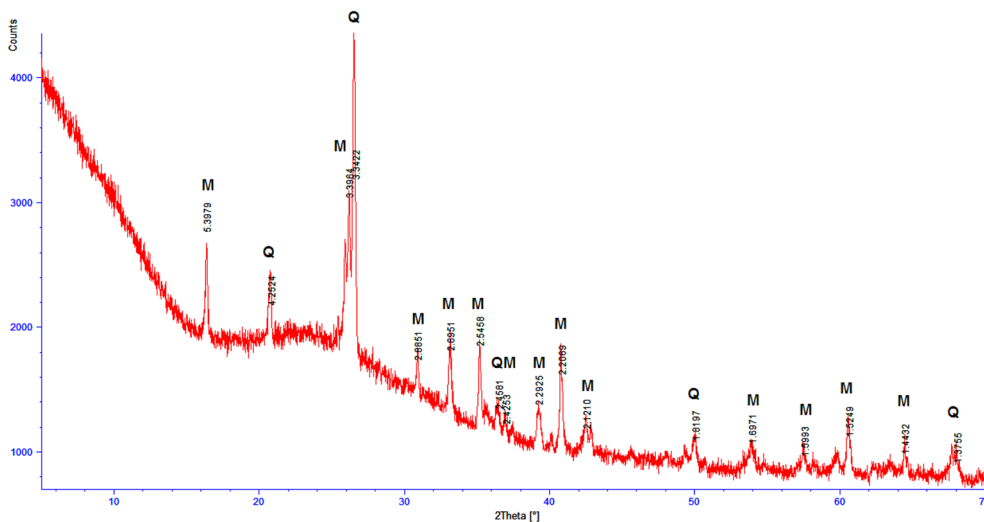
Fig. 2. The diffraction pattern of the grain class  $> 0.315$  mm (Q – quartz, M – mullite)

O obecności w badanych popiołach fazy szklistej, świadczy podniesione, w zakresie niskich kątów ugięcia promieniowania  $2\Theta$   $\text{CuK}\alpha$ , tło (rys. 1–5). Im wyższa jest temperatura spalania tym więcej powstaje fazy szklistej. Wysokie napięcie powierzchniowe prowadzi do powstania form idealnie kulistych. Badania mikroskopowe różnych klas ziarnowych popiołu wskazują, że bardziej amorficzny charakter mają klasy najdrobniejsze (fot. 9).



Rys. 3. Dyfraktogram klasy ziarnowej 0,125–0,09 mm (Q – kwarc, M – mullit)

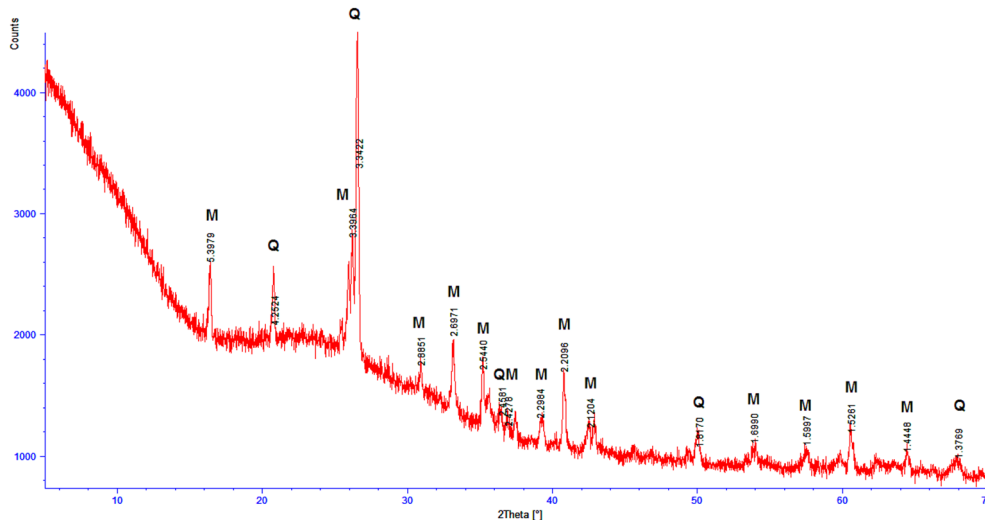
Fig. 3. The diffraction pattern of the grain class 0.125–0.09 mm (Q – quartz, M – mullite)



Rys. 4. Dyfraktogram klasy ziarnowej 0,09–0,071 mm (Q – kwarc, M – mullit)

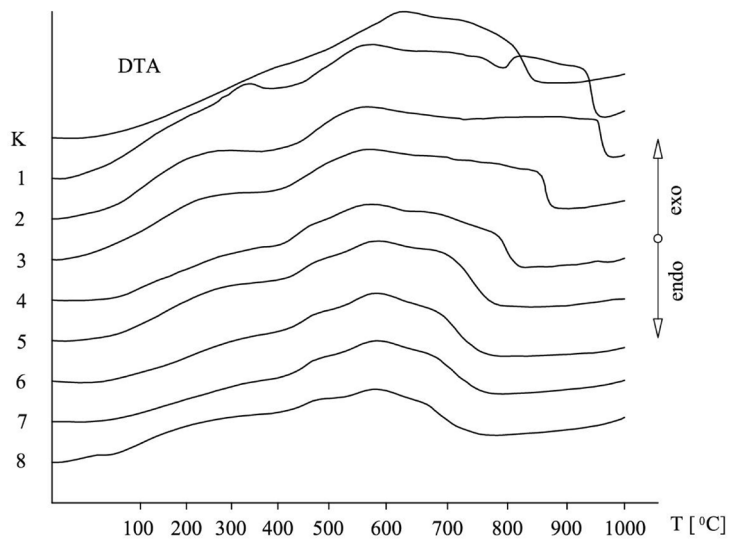
Fig. 4. The diffraction pattern of the grain class 0.09–0.071 mm (Q – quartz, M – mullite)

Dyfraktogram klasy najgrubszej (rys. 2) charakteryzuje się mniejszą intensywnością pików dyfrakcyjnych kwarcu i mullitu, co wskazuje na mniejszy udział tych faz w wyżej wymienionej klasie. Podniesienie tła w zakresie kąta  $2\theta$   $\text{CuK}\alpha = 22\text{--}30^\circ$  wynika z obecności w tej klasie ziarnowej popiołu, substancji amorficznej (w tym przypadku substancji organicznej), co wykazały także badania termiczne i mikroskopowe. O dużej zawartości



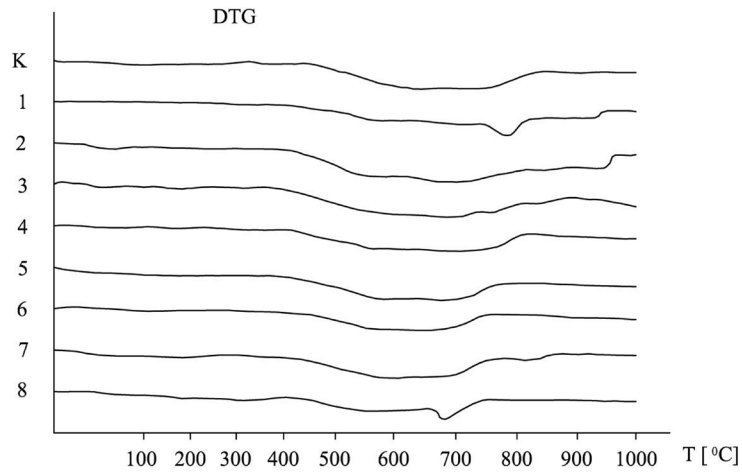
Rys. 5. Dyfraktogram klasy ziarnowej  $< 0,045$  mm (Q – kwarc, M – mullit)

Fig. 5. The diffraction pattern of the grain class  $< 0.045$  mm (Q – quartz, M – mullite)



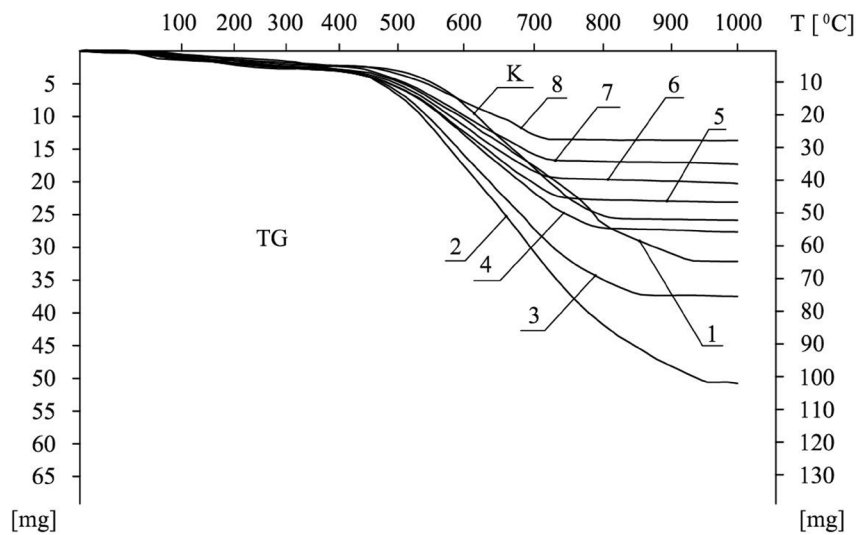
Rys. 6. Krzywe DTA badanych klas ziarnowych popiołu, oznaczenia próbek zgodnie z tabelą 1

Fig. 6. DTA curves for the tested fly ash grain classes, markings of the samples according to table 1



Rys. 7. Krzywe termogravimetryczne różnicowe (DTG) badanych klas ziarnowych popiołu, oznaczenia próbek zgodnie z tabelą 1

Fig. 7. Differential thermogravimetric (DTG) curves of the tested fly ash grain classes, markings of the samples according to table 1



Rys. 8. Krzywe termogravimetryczne (TG) badanych klas ziarnowych popiołu (prawa strona wykresu – skala dla krzywej 1, lewa strona wykresu – skala dla krzywych 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, K), oznaczenia próbek zgodnie z tabelą 1

Fig. 8. Thermogravimetric (TG) curves of the tested fly ash grain classes (on the right side – the scale for curve 1; on the left side – the scale for curves 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, K), markings of the samples according to table 1



węgla w najgrubszej klasie ziarnowej, świadczy rozległy efekt egzotermiczny, obserwowany w temperaturze około 570°C, na krzywej DTA (rys. 6, krzywa 1). Wraz ze zmniejszaniem się wielkości cząstek obserwujemy zmniejszenie wysokości tego efektu na poszczególnych termogramach, a także przesunięcie temperatury końcowej procesu w kierunku temperatur niższych (rys. 6 i 7, krzywe 1– 8).

W początkowym etapie (temperatura ok. 100°C) następuje odparowanie wilgoci całkowitej. Od temperatury 300–400°C następuje rozkład termiczny niespalonych cząstek węgla połączony z uwalnianiem części lotnych.

Udział węgla w klasie najdrobniejszej, poniżej 0,045 mm, odpowiadający w przybliżeniu ubytkowi masy na krzywej TG stanowi około 2 % (rys. 8, krzywa 8, tab. 1), a w klasie najgrubszej, ponad 20% (rys. 8, krzywa 1, tab. 1). Ta znacząca różnica w udziale ilościowym niespalonej substancji organicznej znajduje odzwierciedlenie w ciemniejszej barwie grubszych klas ziarnowych popiołu. Z przebiegu krzywych TG można zauważyć, że ubytek masy zachodzi dwustopniowo. Pierwszy etap ubytku masy, w zakresie niskich temperatur, związany jest z utratą wilgoci. Drugi etap, któremu towarzyszy największy ubytek masy, przypisany jest spalaniu substancji organicznej.

#### 2.4. Morfologia niespalonej materii organicznej

W badaniach form morfologicznych niespalonej materii organicznej zastosowano klasyfikację wprowadzoną przez M. Misz, przytoczoną w pracy (Misz 2002), uwzględniającą różnice w porowatości poszczególnych cząstek. Wśród form morfologicznych materii organicznej, występujących w badanej próbce popiołu, charakteryzujących się znaczną porowatością, należy wymienić cenosfery, czyli okrągłe cząstki składające się z jednej lub kilku porów (fot. 1). Prawdopodobnie powstały one ze spalania macerałów grupy wityrytu. W ściankach cenosfer często obserwowano liczne drobniejsze pory, będące efektem wtórnego odgazowania. Obok cenosfer formami morfologicznymi charakteryzującymi się dużą porowatością są sieci, obserwowane – podobnie jak cenosfery – w średnich i grubszych klasach ziarnowych tego popiołu. Formy te charakteryzują się występowaniem dużej liczby owalnych, rzadziej nieregularnych porów (fot. 2–3). Macerałem odpowiedzialnym za powstanie najbardziej zróżnicowanych morfologicznie form niespalonej substancji węglowej jest inertynit. Wraz ze wzrostem zawartości inertynitu w węglu, pory w niespalonej materii organicznej stają się wąskie i wydłużone, a porowatość maleje (Misz 2004). Ta forma morfologiczna występowała sporadycznie w klasie 0,125–0,09 mm (fot. 4). Mniejsze formy inertynitowe charakteryzowały się jeszcze niższą porowatością (fot. 5). W klasach drobnych i najdrobniejszych obserwowano głównie detrytus, czyli cząstki powstałe na skutek rozkruszenia wcześniej utworzonych form morfologicznych niespalonej materii organicznej (fot. 6). Te najdrobniejsze formy morfologiczne niespalonej materii organicznej pozbawione są praktycznie porowatości.



Fot. 1. Niespalona materia organiczna w formie cenosfery, próbka popiołu surowego. Światło odbite, pow. 200×

Phot. 1. Unburned organic matter in the form of cenosphere, sample of raw ash material. Reflected light, magn. 200×



Fot. 2. Niespalona materia organiczna w formie sieci, klasa ziarnowa powyżej 0,315 mm. Światło odbite, pow. 100×

Phot. 2. Unburned organic matter in the form of network, grain class > 0.315 mm. Reflected light, magn. 100×



Fot. 3. Niespalona materia organiczna w formie sieci,  
klasa ziarnowa 0,125–0,09 mm. Światło odbite, pow. 200×

Phot. 3. Unburned organic matter in the form of network, grain class 0.125–0.09 mm.  
Reflected light, magn. 200×



Fot. 4. Niespalona materia organiczna w formie inertynitu,  
klasa ziarnowa 0,125–0,09 mm. Światło odbite, pow. 200×

Phot. 4. Unburned organic matter in the form of inertinite, grain class 0.125–0.09 mm.  
Reflected light, magn. 200×



Fot. 5. Niespalona materia organiczna w formie inertynitu, klasa ziarnowa 0,09–0,071 mm. Światło odbite, pow. 500×

Phot. 5. Unburned organic matter in the form of inertinite, grain class 0.09–0.071 mm. Reflected light, magn. 500×



Fot. 6. Niespalona materia organiczna w formie detrytusu, klasa ziarnowa poniżej 0,045 mm. Światło odbite, pow. 200×

Phot. 6. Unburned organic matter in the form of detritus, grain class < 0.045 mm. Reflected light, magn. 200×



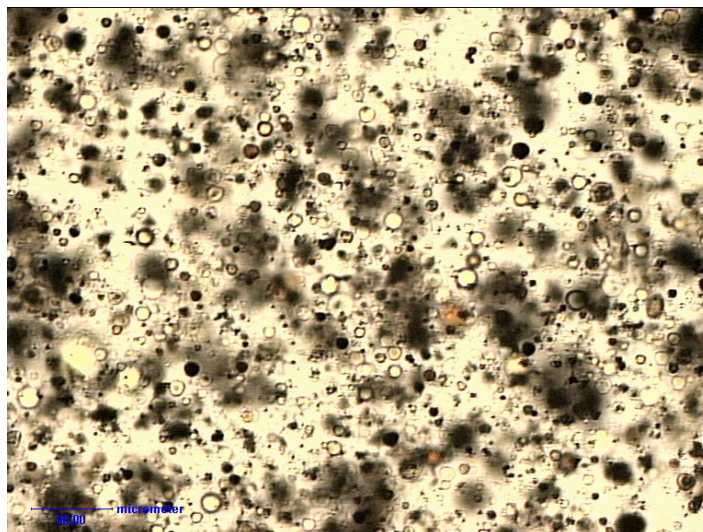
Fot. 7. Igiełkowe kryształy mullitu w formie inkluzji sferycznych cząstek popiołu.  
 Pola czarne – niespalona materia organiczna w formie detrytusu,  
 próbka popiołu surowego. Światło przechodzące, pow. 400×

Phot. 7. Needle-shaped mullite crystals in the form of inclusions of the ash spherical particles.  
 Black fields – unburned organic matter in the form of detritus, sample of raw ash material.  
 Transmission microscopy, magn. 400×



Fot. 8. Kwarc, klasa ziarnowa powyżej 0,315 mm, próbka domielona.  
 Światło przechodzące, nikole skrzyżowane, pow. 200×

Phot. 8. Quartz, grain class > 0.315 mm.  
 Transmission microscopy, NX, magn. 200×



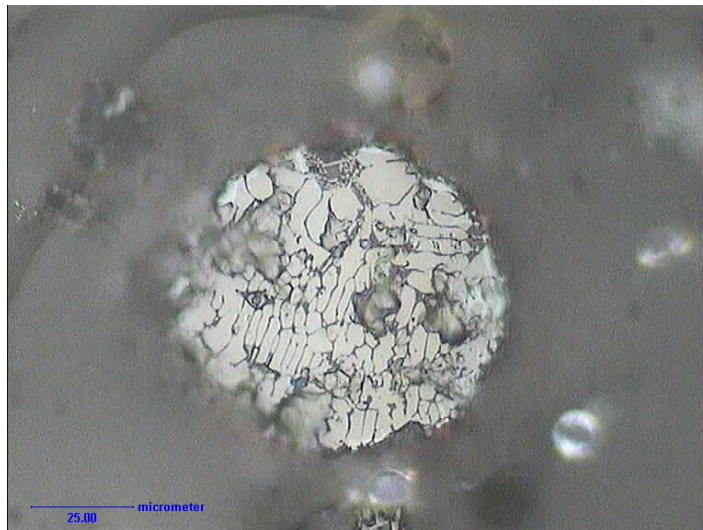
Fot. 9. Kuliste skupienia szkliwa, klasa ziarnowa poniżej 0,045 mm.  
Światło przechodzące, pow. 200×

Phot. 9. Spherical cluster of glaze, grain class < 0.045 mm.  
Transmission microscopy, magn. 200×



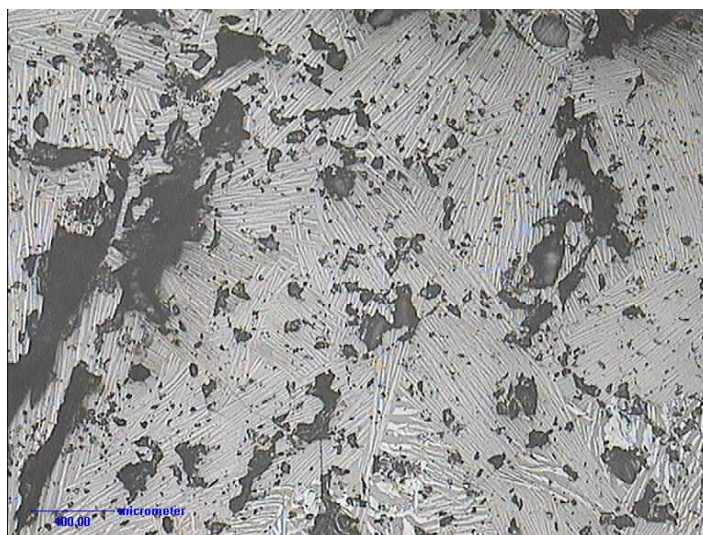
Fot. 10. Hematyt, klasa ziarnowa poniżej 0,045 mm.  
Światło odbite, nikole skrzyżowane, pow. 500×

Phot. 10. Hematite, grain class < 0.045 mm.  
Reflected light, NX, magn. 500×



Fot. 11. Magnetyt, klasa ziarnowa 0,09–0,071 mm.  
Światło odbite, pow. 500×

Phot. 11. Magnetite, grain class 0.09–0.071 mm.  
Reflected light, magn. 500×



Fot. 12. Struktura siatkowa hematytu w magnetycie,  
klasa ziarnowa powyżej 0,315 mm. Światło odbite, pow. 100×

Phot. 12. Reticular texture of the hematite in the magnetite, grain class > 0.315 mm.  
Reflected light, magn. 100×

## Wnioski

Przeprowadzone badania rentgenograficzne, mikroskopowe i termiczne popiołu lotnego krzemionkowego pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Głównymi składnikami nieorganicznymi poszczególnych klas ziarnowych są mullit i kwarc powstałe z rozkładu termicznego minerałów ilastych obecnych w spalonym węglu.
2. Czynnikiem ograniczającym wykorzystanie badanego popiołu w przemyśle materiałów budowlanych jest duży udział ziaren powyżej 0,045 mm. Koniecznym zatem wydaje się domielenie badanego popiołu. Może to jednak spowodować zwiększenie porowatości, a także pogorszenie urabialności mieszanki betonowej powstałej z jego udziałem, na skutek destrukcji cząstek kulistych.
3. Obserwacje mikroskopowe wykazały, że obecna w najgrubszych klasach ziarnowych popiołu niespalona materia organiczna, występuje głównie w formie cenosfer i sieci, form morfologicznych charakteryzujących się bardzo dużą porowatością. Wydaje się zatem słuszne odsianie tej klasy, przed dalszym ewentualnym zastosowaniem badanego popiołu, pomimo iż straty prażenia dla próbki wyjściowej nie przekraczają wartości dopuszczalnej 5%. Obecność detrytusu w drobniejszych klasach ziarnowych popiołu, ze względu na niską porowatość tych form morfologicznych, nie wpłynie na zwiększoną wodożądność materiałów na bazie tego popiołu.
4. Wraz ze zmniejszaniem wielkości cząstek popiołu zwiększa się udział fazy szklistej, co pociąga za sobą wzrost zawartości aktywnego  $\text{SiO}_2$  w tych klasach ziarnowych, a tym samym decyduje o ich dobrych właściwościach pucolanowych. Udział tej fazy wpłynie zatem pozytywnie na zwiększenie wytrzymałości betonu.
5. Obecność żelaza w postaci hematytu i magnetytu nie będzie miała większego znaczenia przy ewentualnym dalszym zagospodarowaniu tego popiołu, gdyż udział tych faz jest niewielki, poniżej progu wykrywalności metodą dyfrakcji rentgenowskiej.
6. Przeprowadzone badania wykazały, że pod względem składu chemicznego, fazowego i granulometrycznego, popiół ten nie odbiega znacząco od innych popiołów krzemionkowych dostępnych na polskim rynku, zatem może być wykorzystany w różnych technologiach materiałów budowlanych. Jako składnik cementu i betonu, dzięki swoim właściwościom, na pewno wpłynie na zwiększoną odporność na korozję chemiczną wyprodukowanych z jego udziałem materiałów. Odporność ta będzie tym większa, im większy będzie udział najdrobniejszej klasy ziarnowej tego popiołu.



## LITERATURA

- Galos i in. 2009 – Galos, K., Gawlicki, M., Hycnar, E., Lewicka, E., Nieć, M., Ratajczak, T., Szlugaj, J. i Wyszomirski, P. 2009. *Surowce mineralne Polski. Mineralne surowce odpadowe*, Wydawnictwo Instytutu GSMiE PAN Kraków.
- Galos, K. i Uliasz-Bocheńczyk, A. 2005. Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgla w Polsce. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 21(1), s. 23–41.
- Giergiczny, E. i Giergiczny, Z. 2010. Wpływ zmiennej jakości popiołów lotnych na właściwości kompozytów cementowo-popiołowych. *Cement Wapno Beton* 3, s. 157–163.
- Giergiczny, Z. 2009. Popioły lotne składnikiem betonu – normalizacja i praktyka. *Budownictwo, Technologie, Architektura nr 1*, s. 40–43.
- Tkaczewska, E. i Małolepszy, J. 2009. Właściwości szkła w krzemionkowych popiołach lotnych. *Cement Wapno Beton* 3, s. 148–153.
- Krztoń, H. 2006. Zastosowanie proszkowej dyfrakcji rentgenowskiej do badań składu mineralnego popiołów. XIII Międzynarodowa Konferencja *Popioły z Energetyki*, Kraków, s. 1–9.
- Kurdowski, W. 2010. *Chemia cementu i betonu*. Kraków/Warszawa: Stowarzyszenie Producentów Cementu/Wyd. Nauk. PWN.
- Nowak-Michta, A. 2012. Wytrzymałość na ściskanie betonów z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego. *Budownictwo. Czasopismo techniczne, Technical Transactions*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1–B(2), s. 77–98.
- Misz, M. 2002. Comparison of chars in slag and fly ash as formed in pf boilers from Będzin Power Station (Poland). *Fuel* 81, Elsevier, s. 1351–1358.
- Misz, M. 2004. Wpływ warunków spalania w kotłach pyłowych i rusztowych na morfologię niespalonego węgla w popiołach. *Geologia* t.16. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice, s. 39–50.
- Kapuściński, T. i Strzałkowska, E. 2007. Wykorzystanie mikrosondy elektronowej do badań odpadów paleniskowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Górnictwo* z. 280, Gliwice, s. 57–72.
- PN-EN 450-1: 2012. Popiół lotny do betonu.
- Strzałkowska, E. Zmienność jakościowego składu fazowego popiołów lotnych wapiennych w zależności od wielkości ich uziarnienia. *Archiwum Górnictwa* (w druku).

### SKŁAD MATERII ORGANICZNEJ I NIEORGANICZNEJ KRZEMIONKOWYCH POPIOŁÓW LOTNYCH, JAKO ELEMENT ICH PRZYDATNOŚCI W TECHNOLOGIACH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

#### Słowa kluczowe

popiół lotny krzemionkowy, skład fazowy, skład granulometryczny,  
niespalony węgiel, badania termiczne

#### Streszczenie

Obecnie w Polsce powstaje rocznie około 18 mln Mg odpadów energetycznych. Sposób utylizacji tych odpadów zależy od ich właściwości fizykochemicznych. Do produkcji cementów wykorzystuje się głównie popioły lotne krzemionkowe, które mają właściwości pucolanowe, korzystnie wpływające na właściwości cementów. W ramach pracy przedstawiono rezultaty badań składu fazowego różnych klas ziarnowych popiołu lotnego krzemionkowego. Na podstawie badań termicznych, mikroskopowych i rentgenograficznych stwierdzono obecność mullitu i kwarcu oraz podrzędnie

magnetytu, hematytu i kalcytu. Znaczny udział w składzie badanych popiołów mają także fragmenty niespalonego węgla, które w zależności od stopnia porowatości przyjmują różne formy morfologiczne. W badanej próbce popiołu wyróżniono następujące formy niespalonego węgla: cenofery, sieci, inertynit masywny i porowaty oraz detrytus. Formy porowate gromadzą się głównie w grubszej klasie ziarnowej i są reprezentowane przede wszystkim przez cenofery i sieci. Ich udział jest bardzo niekorzystny przy jakichkolwiek dalszych zastosowaniach tego popiołu, dlatego celowym wydaje się uprzednie odsianie tej klasy. Zmniejszy to wodożądność popiołu oraz zwiększy mrozoodporność zapraw i betonu z jego udziałem.

**THE COMPOSITION OF THE ORGANIC AND INORGANIC MATTER OF THE SILICEOUS FLY ASHES AS PART OF THEIR USEFULNESS IN TECHNOLOGIES OF BUILDING MATERIALS**

Keywords

siliceous fly ash, phase composition, grain composition, unburned coal, thermal analysis

Abstract

Nowadays in Poland around 18 mln tons of energy wastes are produced every year. The utilization method of wastes depends principally on their physicochemical properties. Siliceous fly ashes which have pozzolanic properties which advantageously influence on cement properties, are mainly used in production of cement. The results of studies of the phase composition of the different grain classes of the siliceous fly ash were presented in this article. The minerals: mullite and quartz as well as magnetite, hematite and calcite were identified on the base of thermal analysis, microscopic observation and X-ray diffractometry examination. Significant participation in the composition of investigated fly ashes have also fragments of unburned coal. They present different morphological forms depend on the porosity degree. The following forms were distinguished: cenospheres, networks, inertynite massive and porous, detritus. Porous particles accumulate mainly in the coarser grain class and are represented primarily by cenospheres and networks. Their content may have an adverse effect on any further applications of fly ash, so as it is necessary to separation of this class. This will reduce water demand and increase the freeze-thaw resistance of mortar and concrete containing fly ash.