

Elżbieta Giergiczny<sup>1</sup>, Zbigniew Giergiczny<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu

<sup>2</sup> Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Katedra Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych; Górażdże Cement S.A.

## Wpływ zmiennej jakości popiołów lotnych na właściwości kompozytów cementowo-popiołowych

## Influence of siliceous fly ash variable quality on the properties of cement-fly ash composites

### 1. Wprowadzenie

Współczesny beton i specjalistyczne zaprawy budowlane są materiałami kompozytowymi, do produkcji których, obok tradycyjnych składników takich jak cement oraz kruszywo i woda, stosuje się także dodatki mineralne i domieszki chemiczne. Jednym z najczęściej stosowanych dodatków do produkcji zapraw budowlanych i betonu, jest krzemionkowy popiół lotny. Dobrej jakości krzemionkowy popiół lotny jest stosowany nie tylko do produkcji betonów zwykłych, ale także uważany za pełnowartościowy składnik betonów samozagęszczających się i wysokowartościowych. Wprowadzenie krzemionkowego popiołu lotnego do składu tych kompozytów wpływa na ich właściwości zarówno w stanie plastycznym (mieszanka betonowa), jak i w stanie stwardniałym (1-5). Korzystny wpływ dodatku krzemionkowego popiołu lotnego związany jest z morfologią jego cząstek (kształt, właściwości powierzchniowe), aktywnością pucolanową i efektem uszczelnienia stosu okruszonego (mikrokruszywo) (6-9).

Wymagania stawiane popiołom lotnym stosowanym jako dodatki do betonu zawarte są w normie PN-EN 450-1:2009 (10) i obejmują właściwości fizyczne i chemiczne. Szczególną uwagę w ocenie jakościowej popiołu zwrócono na wielkość strat prażenia w popiołach oraz ich miałość. Norma PN-EN 450-1 (10) wprowadza bowiem podział popiołu lotnego na kilka kategorii w zależności od wielkości strat prażenia (nie spalonego węgla) (tablica 1 – kategorie A, B lub C) oraz miałości (tablica 1 - kategorie N i S). Są to właściwości mające ważne znaczenie w stosowaniu popiołu lotnego do produkcji betonu i innych kompozytów cementowo-popiołowych.

W przeprowadzonych badaniach starano się odpowiedzieć na pytanie w jakim stopniu stosowanie krzemionkowych popiołów lotnych o zmiennej jakości, może mieć wpływ na podstawowe właściwości kompozytów cementowo-popiołowych. Szczególną uwagę zwrócono na stosowanie krzemionkowych popiołów lotnych o zmiennej zawartości strat prażenia i zmiennej miałości.

### 1. Introduction

Modern concrete and ready building mortars are nowadays the composite materials containing, except of the traditional components as cement, aggregates and water, chemical admixtures as well as mineral additions. Siliceous fly ash is one of the most popular additions used in the production of mortars and concrete. High quality siliceous fly ash is used not only in ordinary concrete, but also as a valuable component of self compacting and high performance concretes. The implementation of fly ash into these composites influences the properties not only of the plastic mixture, but also of hardened concrete (1-5). Advantageous impact of fly ash addition is related to the morphology of its particles (shape, surface properties), pozzolanic activity and microfiller effect (aggregate void filling) (6-9).

The requirements for siliceous fly ashes used in concrete production are covered by the standard: PN-EN 450-1:2009 (10) and embraces the chemical and physical properties. For quality evaluation of fly ash, special attention is put on the loss of ignition and fineness (Table 1). However, the standard PN-EN 450-1 (10) introduces different categories of fly ash, depending of the loss of ignition value (unburnt carbon) (Table 1 – categories A, B or C) and fineness (Table 1 - categories N and S). These properties are very important for practical use of fly ash as the component of concrete and other cement-fly ash composites.

The aim of the study presented in this paper is the answer to the question: how important is the influence of siliceous fly ashes variable quality on basic properties of cement-fly ash composites. Special attention was given to the use of siliceous fly ashes with variable loss of ignition and fineness.

### 2. Materials and methods

The tests embrace 22 fly ash samples, the samples designated P1 to P22 of which for P1 to P11 full chemical composition was determined (Table 2), but for the samples from P12 to P22 only the

Tablica 1 / Table 1

PODZIAŁ POPIOŁU LOTNEGO NA KATEGORIE WG PN-EN 450-1:2009 (10)

CATEGORIZATION OF FLY ASH IN PN-EN 450-1:2009 (10)

Właściwość /Property	Wymagania / Requirement
Strata prażenia / Loss of ignition – kategoria A – kategoria B – kategoria C	≤ 5,0 % 2,0% ÷ 7,0 % 4,0% ÷ 9,0 %
Miałość, pozostałość na sicie o 0,045 mm przy przesiewaniu na mokro wg PN-EN 451-2 Fineness, residue on 0,045 mm sieve according to wet sieving method PN-EN 451-2 – kategoria N – kategoria S	≤ 40 % ≤ 12 %
Wodożądność (dotyczy popiołu o miałości w kategorii S) Water demand (category S only)	≤ 95% wodożądności cementu portlandzkiego CEM I użytego do badań ≤ 95% water demand of Portland cement CEM I used in tests

## 2. Materiały stosowane w badaniach

Badania przeprowadzono na 22 próbkach krzemionkowych popiołów lotnych, przy czym w przypadku próbek o symbolach od P1 do P11 oznaczono ich skład chemiczny (tablica 2), natomiast w przypadku próbek o symbolach od P12 do P22 oznaczono tylko zawartość strat prażenia. Natomiast w przypadku wszystkich próbek zbadano miałość i wodożądność (tablica 3). Próbkę popiołów pochodzących z różnych elektrowni. Wszystkie, z wyjątkiem próbek P1 i P11, zostały odebrane spod komór zbiorczych efektofiltrów. Próbkę P1 została odebrana z ostatniej III sekcji efektofiltru (położonej najdalej od paleniska kotła), natomiast próbkę P11 została pobrana z II, środkowej sekcji efektofiltru. Spoiwem porównawczym był cement portlandzki CEM I 42,5R, o powierzchni włą-

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁÓW LOTNYCH

CHEMICAL COMPOSITION OF FLY ASHES

Składnik Component	Zawartość składnika, %masy, w popiele Content of component, % by mass, in fly ash										
	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11
str.praż.	1,79	7,80	8,48	6,20	8,22	6,25	4,06	7,66	5,17	4,66	3,55
SiO <sub>2</sub>	49,86	47,85	47,73	49,80	48,27	49,77	50,46	47,71	49,16	49,65	50,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,58	24,52	24,93	20,86	20,02	21,95	21,10	24,02	26,28	25,52	25,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,66	6,30	5,78	8,84	6,64	5,83	6,97	6,55	6,49	6,14	6,02
SiO <sub>2</sub> reakt.	44,20	37,47	35,34	30,34	35,49	36,44	34,75	34,95	31,96	33,75	42,41
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85,10	78,67	78,44	79,50	74,93	77,55	78,53	78,28	81,93	81,31	82,78
CaO	3,56	4,66	4,35	6,22	5,04	3,53	4,14	4,47	4,33	3,88	3,60
MgO	2,77	2,16	2,53	4,79	1,76	1,49	2,80	2,92	3,01	3,02	2,62
SO <sub>3</sub>	0,70	0,35	0,26	0,69	0,47	0,34	0,70	0,39	0,74	0,70	0,38
Na <sub>2</sub> O	1,27	1,14	1,10	1,33	0,99	0,93	1,28	0,96	1,02	1,01	1,17
K <sub>2</sub> O	3,48	3,01	2,81	2,16	2,35	2,49	3,07	2,71	2,76	2,76	3,12
Na <sub>2</sub> O <sub>eq.</sub>	3,56	3,12	2,95	2,75	2,54	2,57	3,30	2,74	2,84	2,83	3,22

loss of ignition, fineness and water demand were examined (Table 3). The samples are from different power stations. All samples, except of P1 and P11, have been taken from electric precipitators cumulative chamber. However, the sample P1 has been obtained from the 3rd precipitator's section (located the farthest from boiler furnace), and the sample P11 from the 2nd precipitators section (middle one). Portland cement CEM I 42,5R with Blaine's surface of 3600 cm<sup>2</sup>/g, tricalcium aluminates C<sub>3</sub>A – 10% and alkalis Na<sub>2</sub>O<sub>eqv</sub> 0.7% contents was used as a standard binder as well as in blended cements with fly ash addition.

## 3. Test results and discussion

The methods used in all studies were in accordance with the standard PN-EN 450-1 (10). The fineness of fly ash is expressed as the residue on the sieve 0.045 mm, in %, and the wet sieving was applied. Water demand of fly ash was determined as the ratio [in %] of flow diameter of the mortar from blended cements containing 30% of fly ash and 70% of Portland cement CEM I to the flow diameter of the mortar from cement CEM I only. Detailed methods description is in the Annex B to the standard PN-EN 450-1:2009 (10).

On the Fig. 1 the relation between of loss of ignition and fineness of fly ash samples is depicted. In the range of the loss of ignition up to 7%, the obtained results do not allow to state that the fly ash samples with lower residue on 0,045 mm sieve (higher fineness) have lower loss of ignition i.e. have low content of unburnt coal [quick-coke]. However, it is clearly seen that the higher loss of ignition (above 7%; Table 1) is typical for the fly ash samples with the residue on 0.045 mm sieve exceeding 35% (coarse fly ash).

On Fig. 2 the relation between the loss of ignition and water demand is presented. From the distribution of points in Fig. 2, it is evident that fly ash samples with unburnt coal content over 5% [categories B and C according to the standard (10)] have higher

ściwej 360 m<sup>2</sup>/kg i zawartości glinianu trójwapniowego C<sub>3</sub>A – 10% oraz zawartości alkaliów Na<sub>2</sub>O<sub>eqv</sub> – 0,7%.

### 3. Wyniki badań i ich omówienie

Poszczególne oznaczenia zostały wykonane zgodnie z metodami podanymi w normie PN-EN 450-1 (10). Miałkość stanowi pozostałość na sicie o boku oczka 0,045mm, w % masowych, przy przesiewaniu na mokro. Wodożądność popiołu (w %) określano poprzez porównanie rozplywu zaprawy wykonanej ze spoiwa cementowo-popiołowego zawierającego w swoim składzie 30% popiołu lotnego i 70% cementu portlandzkiego CEM I z rozplywem mieszanki kontrolnej wykonanej z cementu CEM I [metoda badań jest szczegółowo opisana w Załączniku B do normy PN-EN 450-1:2009 (10)].

Na rysunku 1 pokazano zależność pomiędzy wielkością strat prażenia a miałkością. W zakresie start prażenia do około 7%, uzyskane wyniki nie pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że popioły o mniejszej pozostałości na sicie 0,045 mm (bardziej miałkie) mają mniejszą stratę prażenia, a więc zawierają mniej nie spalonego węgla (koksiku). Natomiast wyraźnie widać, że wyższa zawartość strat prażenia (powyżej 7%; tablica 2) jest typowa dla próbek popiołów o pozostałości na sicie 0,045 mm przekraczającej 35% (popioły grube). Na rysunku 2 pokazano zależność pomiędzy stratami prażenia a wodożądnością. Z analizy rozmieszczenia punktów na rysunku 2 wynika, że krzemionkowe popioły lotne o zawartości nie spalonego węgla przekraczającej 5% [kategorie B i C według normy (10)] wykazują wyższą wodożądność. Analizując rozmieszczenie punktów na rysunku 3 można zauważyć, że popioły miałkie, o małej pozostałości na sicie 0,045 mm, charakteryzują się niższą wodożądnością. Szczególnie jest to widoczne w przypadku próbek popiołu selektywnie odebranych z wybra-

Tablica 4 / Table 4

#### AKTYWNOŚĆ POPIOŁÓW LOTNYCH

#### ACTIVITY INDEX OF FLY ASHES

Symbol Próbki Sample designation	Zawartość reaktywnego SiO <sub>2</sub> % masy Content of reactive SiO <sub>2</sub> , % of mass	Wskaźnik aktywności pucolanowej, %, po upływie Pozzolanic activity index, %, after			
		2 dni 2 days	7 dni 7 days	28 dni 28 days	90 dni 90 days
CEM I 42,5R	–	100,0	100,0	100,0	100,0
P 1	44,20	74,3	81,8	104,4	128,3
P 2	37,47	66,8	72,1	74,2	95,4
P 3	35,34	67,9	71,6	80,5	99,6
P 4	30,34	68,7	75,0	82,4	100,2
P 5	35,49	60,8	65,8	74,2	84,0
P 6	36,44	72,0	73,1	78,8	98,5
P 7	34,75	75,0	76,2	91,8	110,5
P 8	34,95	70,9	71,4	80,3	98,9
P 9	31,96	73,1	73,1	85,7	101,9
P 10	33,75	70,1	75,0	83,2	101,3
P 11	42,41	73,9	80,1	96,0	114,0

Tablica 3 /Table 3

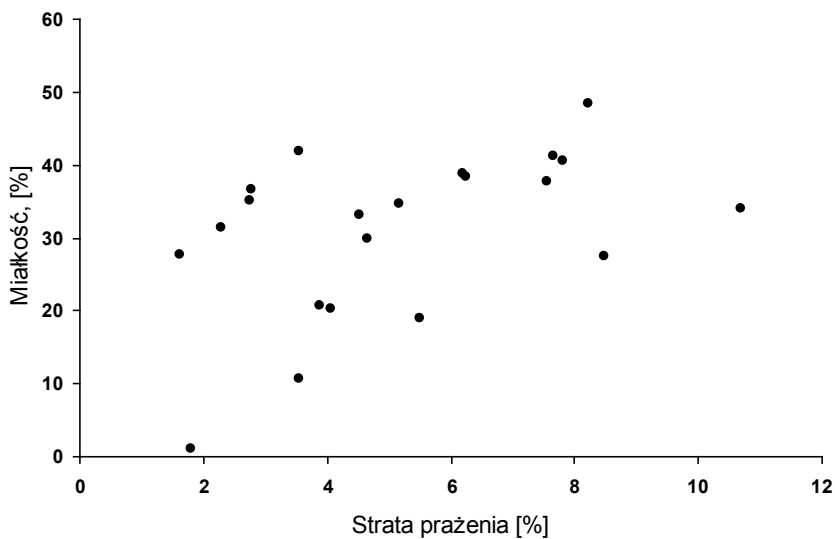
#### WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI POPIOŁÓW LOTNYCH

#### SELECTED PROPERTIES OF FLY ASHES

Numer próbki Sample designation	Strata prażenia, % masy Loss of ignition, % of mass	Miałkość, % masy Fineness, % of mass	Wodożądność, % masy, Water demand, % of mass
P 1	1,79	1,0	84,4
P 2	7,80	40,6	104,0
P 3	8,48	27,5	102,0
P 4	6,20	38,8	100,5
P 5	8,22	48,4	111,1
P 6	6,25	38,4	104,0
P 7	4,06	20,2	100,4
P 8	7,66	41,3	104,4
P 9	5,17	34,7	104,4
P 10	4,66	29,9	100,4
P 11	3,55	10,7	90,7
P 12	2,74	35,2	97,8
P 13	5,50	18,9	97,8
P 14	2,28	31,4	96,9
P 15	1,63	27,8	93,3
P 16	4,52	33,1	100,0
P 17	3,55	42,0	103,1
P 18	10,68	34,0	105,8
P 19	7,56	37,8	104,9
P 20	2,78	36,7	97,8
P 21	3,88	20,8	95,1
P 22	1,63	27,8	93,3

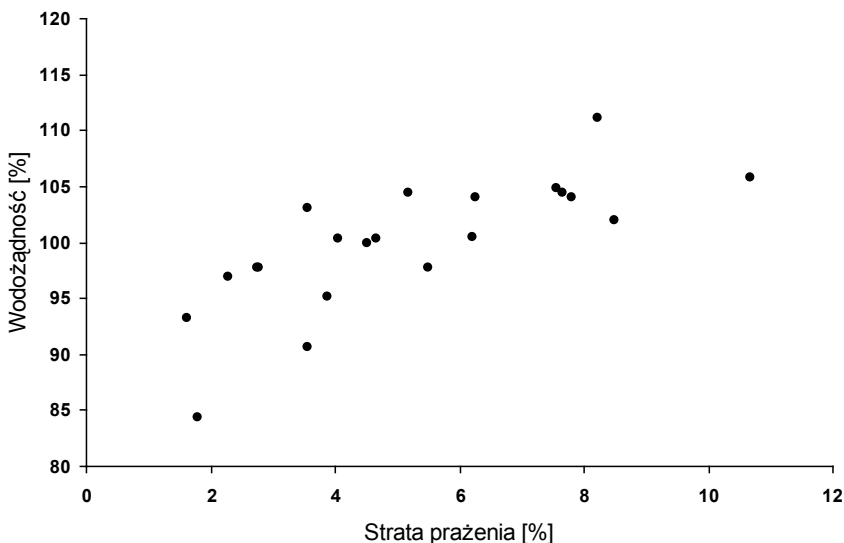
water demand. From the distribution of experimental points on Fig. 3, it can be stated that the fly ash samples of higher fineness i.e. with low residue on 0.045 mm sieve, caused decrease of the paste water demand. This fact is particularly evident for samples of fly ash taken from the selected precipitator sections (samples P1 and P11; Table 3). In the case of fly ash P1, the decrease of water demand in comparison to Portland cement CEM I 42.5R is equal 15.6%, whereas in case of fly ash P11 – 9.3%. Both fly ash samples comply with the requirements of S category of fineness (10). The application of these fly ashes causing such water demand fall must give the decrease of mixing water content in concrete mix, necessary to gain its desired consistency. It will cause the decrease of w/c ratio and finally will lead to the higher strength and durability of hardened concrete.

Such siliceous fly ash of high fineness (samples P1 and P11) are typically composed of



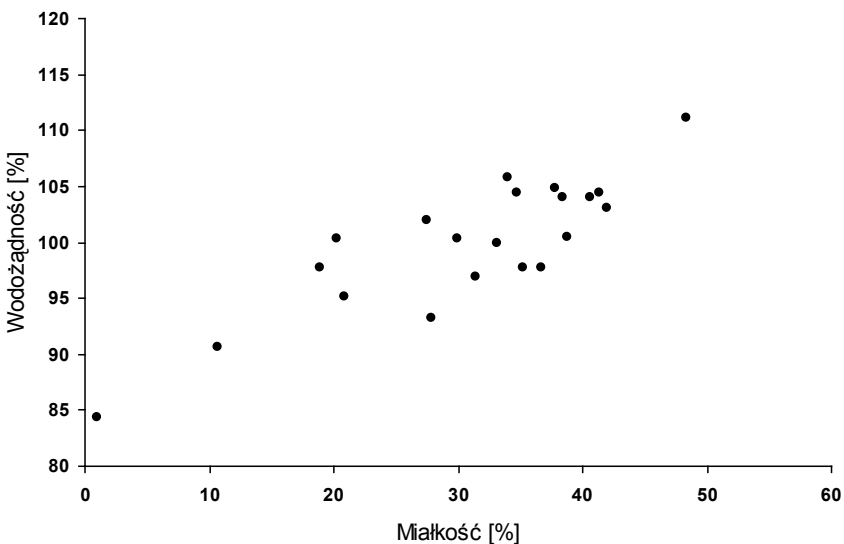
Rys. 1. Zależność pomiędzy stratą prażenia a miałkością popiołu lotnego

Fig. 1. Correlation between loss of ignition and fly ash fineness



Rys. 2. Straty prażenia a wodożądność popiołu lotnego

Fig. 2. Loss of ignition and fly ash water demand



Rys. 3. Miałkość a wodożądność popiołu lotnego

Fig. 3. Fineness and fly ash water demand

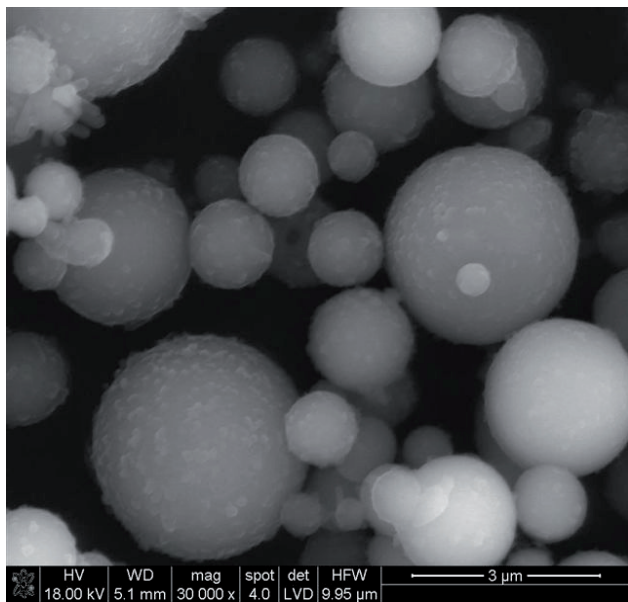
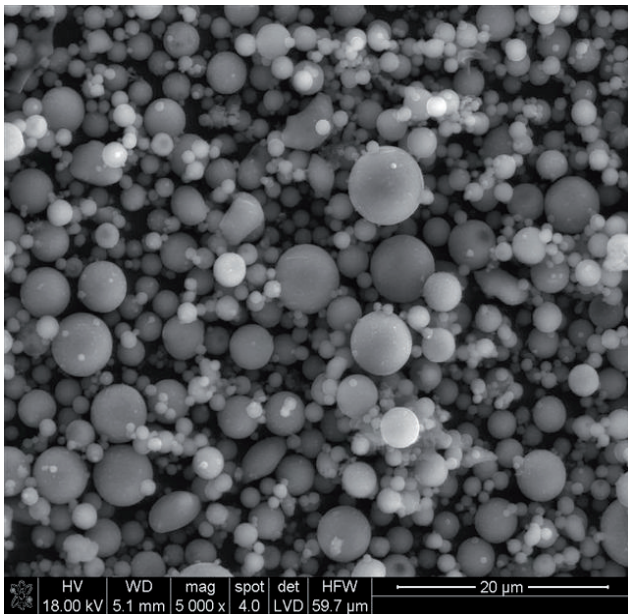
small spherical particles with dimension of a few  $\mu\text{m}$  (Fig. 4). However, in coarse fly ash, with the residue of over 40% on 0.045 mm sieve (Fig. 5), the dimensions of particles are in the range from a few to several dozen of micrometers. Apart from spherical particles, there are also irregular ones, being mostly a conglomerates of few joined ash particles (Fig. 5).

Chosen XRD patterns of fly ashes (Fig. 6) selectively obtained from precipitator sections (samples P1 and P11) show, that their content of crystalline components is lower than in fly ashes from precipitators cumulative chamber. It is proved by lower intensity of peaks of crystalline components, mainly quartz. Large amount of  $\text{SiO}_2$  in siliceous fly ashes as well as the considerable share of glass lead to relatively high amount of active  $\text{SiO}_2$  (Table 2), which in fact influences pozzolanic activity.

In Table 4 test results of reactive  $\text{SiO}_2$  content and activity index are depicted. Activity index is the correlation (in %) of compressive strength of bars from standard mortar, made of blended cement containing 75% of Portland cement CEM I 42.5R and 25% of fly ash to the compressive strength of Portland cement CEM I 42.5R standard mortar. The correlation of fly ash fineness and activity index is shown in Fig. 7, and on Fig. 8 the correlation of reactive silica content and pozzolanic activity of fly ash is depicted. The obtained curves confirm the earlier mentioned statement from technical literature (11, 12), that fly ashes with high content of glass (reactive  $\text{SiO}_2$ ) and low residue on 0.045 mm sieve residue (high fineness) have higher activity, which in effect gives higher compressive strength of cement-fly ash mortars. It is particularly noticeable after longer curing time (90 days), when the strength of mortars from blended cements containing fly ash taken out selectively from individual precipitator sections is about 28% (fly ash P1) and 14% (fly ash P11) higher in comparison to the mortars of Portland cement CEM I 42.5R.

### 3. Conclusions

Since many years siliceous fly ash have been used for blended cement production and a little later for concrete production and became a valuable component of cement and cementitious products, in the first place of concrete. Its use in concrete composition and in other cement-fly ash composites has advantageous effect and allows to create specific properties of concrete mixture and hardened concrete. The results of tests presented in this pa-

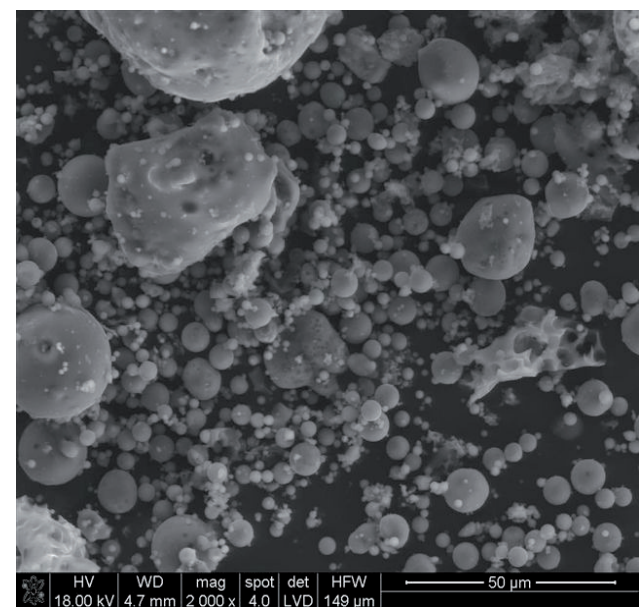
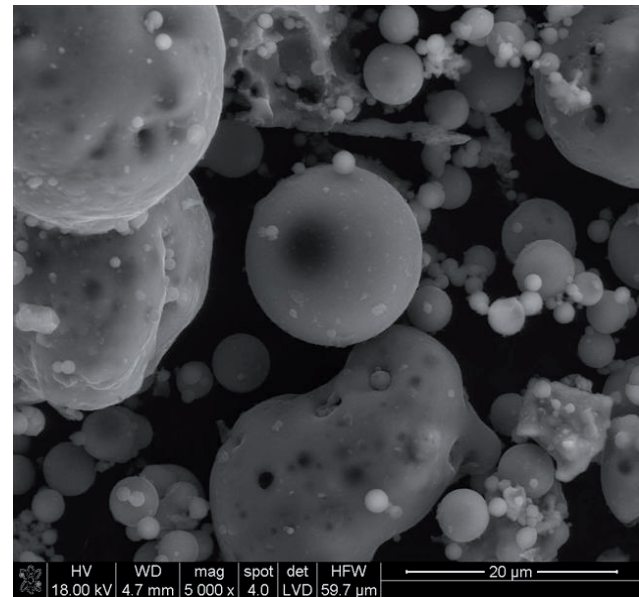


Rys. 4. Popiół lotny P 1 z III sekcji elektrofutra

Fig. 4. Fly ash from the third section of precipitator

nych sekcji elektrofutra (próbki P1 i P11; tablica 3). W przypadku popiołu P1 zmniejszenie wodożądności w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I 42,5R wynosi 15,6%, natomiast w przypadku popiołu P11 wynosi ono 9,3%. Obydwa popioły spełniają wymagania dotyczące kategorii S, w odniesieniu do miąłkości (10). Stosowanie popiołów lotnych o tak małej wodożądności powoduje zmniejszenie dodatku wody do betonu, niezbędnej dla uzyskania pożądaney konsystencji mieszanki. Wpłynie to na zmniejszenie stosunku w/c co spowoduje osiągnięcie przez beton wyższej wytrzymałości, a więc także lepszej jego trwałości po stwardnieniu.

Krzemionkowy popiół lotny o tak dużej miąłkości (próbki P1 i P11) zawiera sferyczne cząstki o rozmiarach mikronowych (rysunek 4). Natomiast w popiele grubym, o pozostałości na sicie 0,045 mm przekraczającej 40% (rysunek 5), zawarte są ziarna o wielkości od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. Obok ziaren sferycznych występują także ziarna nieregularne, będące niejednokrotnie kon-

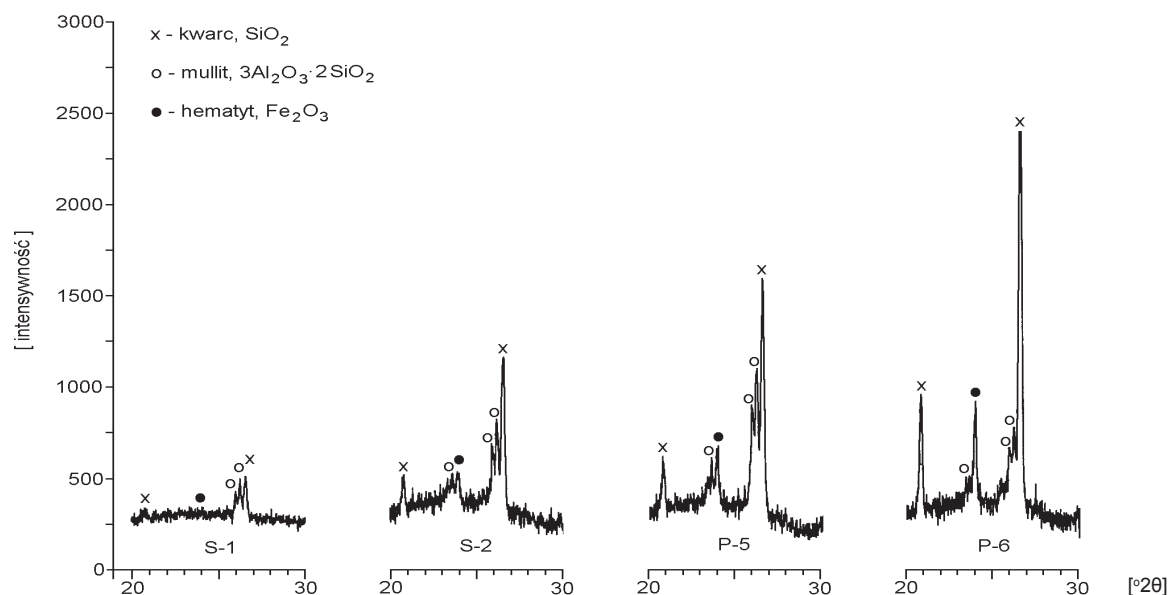


Rys. 5. Zdjęcie mikroskopowe popiołu lotnego P 5

Fig. 5. SEM of fly ash sample P 5

per show, however, that siliceous fly ashes are of variable quality and to take advantage of their favourable properties it is necessary to consider in the future the possibility to introduce new approach in their exploitation.

There are different criteria used in the evaluation of fly ashes quality, though in practice, the quickest way to assess their quality is to determine fineness and the content of unburnt coal (loss of ignition). Siliceous fly ashes with low residue on 0.045 mm sieve are distinguished by high activity, large amount of reactive  $\text{SiO}_2$  and, what is significant in concrete technology, by lowering water demand of blended cement paste. These advantageous properties are particularly evident in samples of fly ash selectively taken out from the selected precipitator sections. Due to this fact, high quality fly ashes are mostly desirable in the production of High Performance Concretes (1-3, 11, 12), having advantageous effect on their strength and durability, especially after longer curing.



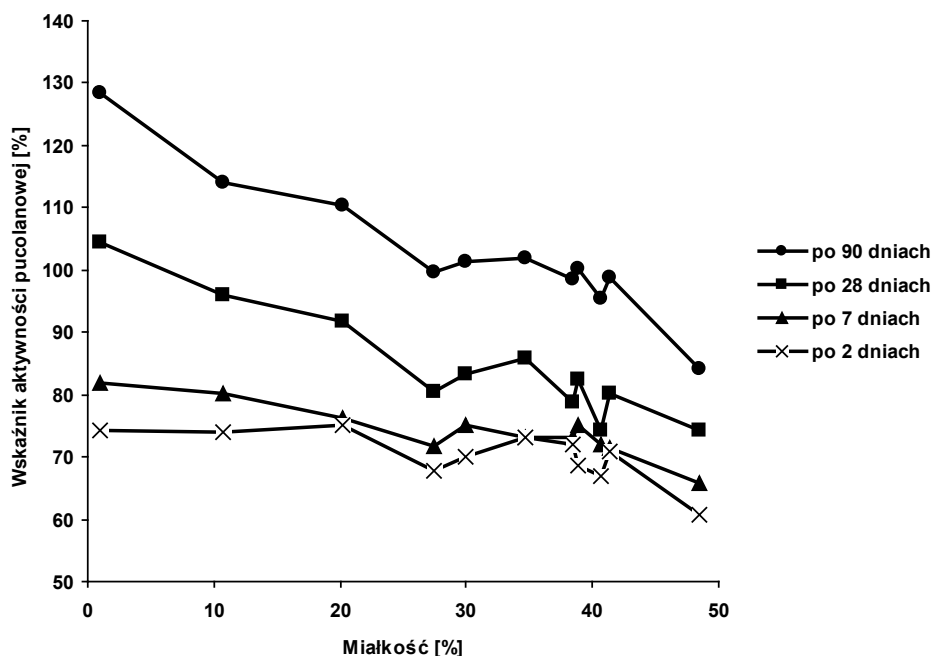
Rys.6. Fragmenty dyfraktogramów popiołów lotnych

Fig. 6. Fragments of fly ash XRD patterns

glomeratami kilku połączonych ze sobą ziaren popiołu (rysunek 5). Na wybranych fragmentach dyfraktogramów popiołów lotnych (rysunek 6) selektywnie odebranych z wybranych sekcji elektrofiltru ( próbki P1 i P11) widać, że zawartość składników krystalicznych jest mniejsza niż w próbkach popiołów pochodzących równocześnie z wszystkich komór elektrofiltru. Świadczy o tym mniejsza intensywność refleksów, głównie kwarcu. Duża zawartość  $\text{SiO}_2$  w popiołach krzemionkowych oraz znaczny udział szkła powodują stosunkowo dużą zawartość aktywnego  $\text{SiO}_2$  (tablica 2), co korzystnie wpływa na aktywność pucolanową.

W tablicy 4 zestawiono wyniki badań zawartości reaktywnego  $\text{SiO}_2$  i wskaźnika aktywności, który stanowi stosunek (w %), wytrzymałości na ściskanie beleczek ze znormalizowanej zaprawy, wykonanej ze spoiwa dwuskładnikowego, zawierającego 75% cementu portlandzkiego CEM I 42,5R i 25% popiołu lotnego, do wytrzymałości na ściskanie zapraw normowych wykonanych z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R.

Na rysunku 7 pokazano zależność pomiędzy miążkością popiołu lotnego a wskaźnikiem aktywności, natomiast na rysunku 8 pomiędzy zawartością reaktywnej krzemionki a aktywnością pucolanową popiołu. Przebieg krzywych potwierdza wyniki wcześniejszych prac (11, 12), wykazujące że krzemionkowe popioły lotne o dużej zawartości szkła krzemionkowo-potasowego i małej pozostałości na sicie 0,045 mm (miałkie) mają wyższą aktywność, efektem czego jest wyższa wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowo-popiołowych. Szczególnie jest to widoczne po dłuższym okresie twardnienia (90 dni); po tym okresie wytrzymałość zapraw uzyskanych



Rys. 7. Miążkość popiołu lotnego a jego aktywność pucolanowa

Fig. 7. Fly ash fineness and its pozzolanic activity

Siliceous fly ashes with high residue on 0.045 mm sieve (almost 40% and more) has low activity and paste of bended cement with its addition has higher water demand comparing to Portland cement CEM I. The loss of ignition (unburnt quick-coke) of these fly ashes frequently exceeds 7%.

Fly ashes with high amount of unburnt coal has poor compactibility with admixtures, particularly with superplasticizers and air entraining agents (4, 5). Unburnt coal is the main constituent of the loss of ignition of siliceous fly ash, in most cases appearing as quick-coke with highly developed specific surface. Chemical admixtures are adsorbed on this surface which decrease significantly their effectiveness. Considering the above facts, most of the Eu-

z cementów zawierających popiół krzemionkowy selektywnie odebrany z różnych sekcji elektrofiltru jest o ok. 28% (popiół P1) i 14% (popiół P11) wyższa w porównaniu z wytrzymałością zapraw z cementu portlandzkiego CEM I 42,5R.

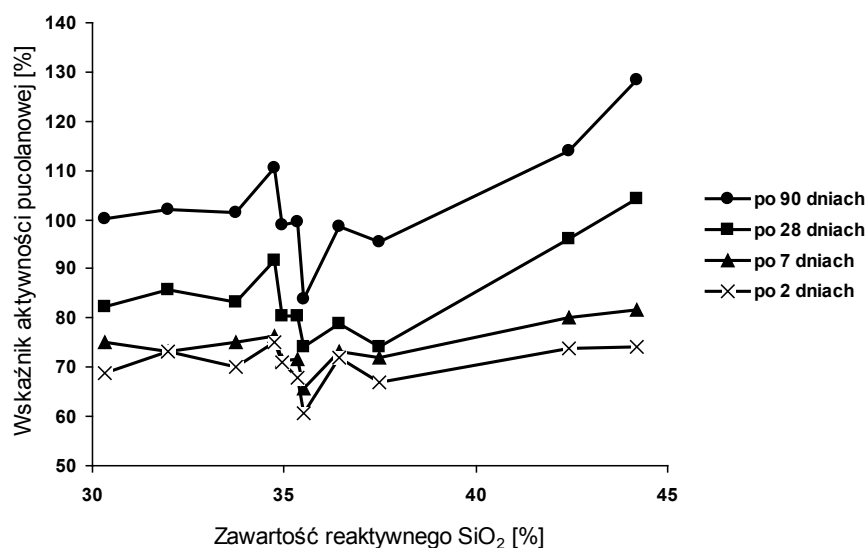
#### 4. Podsumowanie

Krzemionkowe popioły lotne są od wielu lat wartościowym składnikiem spoiw, cementów i betonów. Stosowanie popiołów lotnych do produkcji betonu i innych kompozytów cementowo-popiołowych pozwala na właściwe kształtowanie właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Równocześnie jednak przeprowadzone badania pokazały, że krzemionkowe popioły lotne charakteryzują się zmienną jakością, co nasuwa wniosek o konieczności rozważenia w przyszłości możliwości zmiany metod ich pozyskiwania.

W ocenie jakości krzemionkowych popiołów lotnych stosowane są różne kryteria, jednakże w praktyce przemysłowej najszybciej można ocenić ich jakość poprzez oznaczenie miąższości i zawartości nie spalonego węgla (straty prażenia). Krzemionkowe popioły lotne o małej pozostałości na sicie 0,045 mm wykazują dużą aktywność pucolanową, dużą zawartość reaktywnego SiO<sub>2</sub> oraz, co ma duże znaczenie w technologii betonu, zaczyn z ich dodatkiem ma mniejszą wodożądność. Te pozytywne właściwości występują szczególnie w próbkach krzemionkowych popiołów selektywnie odebranych z różnych sekcji elektrofiltru. Jak wykazały liczne prace oraz badania autorów dobrej jakości krzemionkowe popioły lotne stanowią wartościowy składnik betonów o dużej wytrzymałości (1-3, 11, 12), korzystnie wpływający na tę wytrzymałość, zwłaszcza w późniejszym okresie twardnienia.

Cechą charakterystyczną popiołów lotnych o dużej pozostałości na sicie 0,045 mm (około 40%, a nawet więcej) jest mała aktywność pucolanowa oraz większa wodożądność niż cementu portlandzkiego CEM I. Straty prażenia (koksik) w tych popiołach niejednokrotnie przekraczają 7%. Popioły zawierające nie spalony węgiel wykazują dużą adsorpcję domieszek, w szczególności napowietrzających i upłynniających (4, 5). Podstawowym składnikiem strat prażenia popiołu lotnego krzemionkowego jest nie spalony węgiel, zazwyczaj występujący w postaci koksiku o bardzo rozwiniętej powierzchni właściwej, na której są adsorbowane cząsteczki domieszek, co znacznie zmniejsza efektywność ich działania. Biorąc to pod uwagę część krajów europejskich przyjęła ograniczenie strat prażenia popiołów lotnych, stosowanych do produkcji cementów i betonów, do 5% (13).

Uzyskane wyniki badań prowadzą do wniosku, że krzemionkowe popioły lotne dobrej jakości zmniejszają ilość wody zarobowej w mieszance betonowej, popioły lotne dobrej jakości w nieznacznym stopniu ją zmieniają, natomiast popioły złej jakości znacznie ją zwiększają.



Rys. 8. Zawartość reaktywnej krzemionki a aktywność popiołu lotnego

Fig. 8. Reactive silica content and fly ash activity index

ropean countries adopted the solution confining the extent of fly ash use to the loss of ignition level of 5% (13).

The results of this study lead to the practical conclusion, that high quality siliceous fly ashes reduce the mixing water in concrete, fly ashes of good quality slightly advantageously change its content, whereas poor quality fly ashes radically increase it.

#### Literatura / References

1. K. A. Sear Lindon, Properties and use of coal fly ash. A valuable industrial by-product. London. Thomas Telford Ltd 2001.
2. R. Siddique, Waste Materials and By-Products in Concrete. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.
3. Z. Giergiczny, Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Seria: Inżynieria Lądowa, Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
3. A. Nowak-Michta, Struktura porowatości betonów napowietrzonych z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Krakowska, Kraków 2008 (praca doktorska).
4. A. Garbacik, T. Baran, Wpływu dodatku popiołu lotnego krzemionkowego z różną zawartością części palnych na właściwości cementu. Konferencja „Dni Betonu”, s. 513- 521, Wisła 2008.
5. A. Wang, Ch. Hang, W. Sun, Cem,Conr.Res., 33, 2023-2029 (2003).
6. A. Wang, Ch. Hang, W. Sun, Cem,Conr.Res., 34, 2057-2060 (2004).
7. A. Wang, Ch. Hang, W. Sun, Cem,Conr.Res., 34, 2061-2066 (2004).
8. D. Lutze, W. Berg, Handbuch Flugasche im Beton. Verlag Bau+Technik GmbH, Dusseldorf 2008.
9. PN-EN 450-1:2009 „Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności”.
10. CEN TC104 WG4 DOC 57-2008 Progress Report from CEN TC104/WG 4 “Fly Ash” to CEN TC 104 for the period April 2007-April 2008.
11. J. Małolepszy, E. Tkaczewska, Cement Wapno Beton, 74 ,296-302 (2007).
12. E. Tkaczewska, J. Małolepszy, Cement Wapno Beton 76 , 148 -153 (2009).
13. CEN TC 104/SC1 (2006), Survey of national requirements used In construction with EN 2006-1:2000.