

**Martin Keppert<sup>1</sup>, Pavel Reiterman<sup>2</sup>, Zbyšek Pavlík<sup>1</sup>, Milena Pavlíková<sup>1</sup>, Miloš Jerman<sup>1</sup>, Robert Černý<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Department of Materials Engineering and Chemistry, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Czech Republic

<sup>2</sup> Experimental Center, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, Czech Republic

## **Popioły ze spalania stałych odpadów miejskich jako zamiennik cementu portlandzkiego i kruszywa w betonach**

## **Municipal solid waste incineration ashes and their potential for partial replacement of Portland cement and fine aggregates in concrete**

### **1. Wstęp**

Popioły lotne powstające w elektrociepłowniach spalających węgiel są prawdopodobnie najczęściej stosowanym na świecie pozołanowym materiałem odpadowym do produkcji betonu; głównie z powodu ich dostępności w dużej masie, po niskich cenach. Z tego względu były one przedmiotem licznych badań od 1970 roku. Pierwszy przegląd tych prac obejmujący zastosowanie popiołów lotnych do betonów ukazał się w roku 1980 (1), a niezbyt wiele publikacji dotyczących tego tematu jest zawartych w bazie danych do dzisiaj [na przykład (2-8)].

Popioły z miejskich spalarni odpadów (MSO) mają skład chemiczny, który nie różni się specjalnie od popiołów lotnych z węgla (9). Podczas gdy zagospodarowanie popiołów z elektrociepłowni jest technologicznie opanowane i są one powszechnie stosowane w przemyśle budowlanym, popioły lotne i denne z miejskich spalarni odpadów są aż do dzisiaj zagadnieniem otwartym z tego punktu widzenia. Głównym powodem jest stosowanie metod spalania bez wykorzystania najlepszych dostępnych technologii. Powoduje to duże wahania właściwości popiołów ze spalania, a także dużą ich toksyczność, szczególnie w przypadku zastosowania filtrów workowych, w miejsce elektrofiltrów. Skład popiołów MSO

### **1. Introduction**

Fly ashes generated as byproducts of coal-burning in thermal power stations are probably the most frequently used pozzolanic waste materials in concrete production worldwide; mainly because they are available in large amounts for low price. Therefore, they were subject of intensive research since 1970s. The first critical review of using fly ash in concrete was published already in 1980 (1), and quite a few papers describing the studies relevant to this topic appeared in common scientific databases to date [e.g., (2-8)].

Municipal solid waste incineration (MSWI) ashes possess a chemical composition that is not dissimilar from that of coal fly ashes (9). While the recycling of ashes from coal power stations is technologically well established and commonly applied in the building practice, fly and bottom ashes from municipal waste incinerators are technologically an open field from this point of view, until now. The main reason is the majority of incineration technologies without utilization of modern Best Available Technologies. It causes high properties variability of ash materials from incineration and also high toxicity of ashes, especially collected on sleeve filters at the absence of electro-filter units. The composition of MSWI ashes suggests possible pozzolanic or hydraulic behavior and its addition

wskazuje na możliwość posiadania pucolanowych lub hydraulicznych właściwości, a ich dodatek do mieszanki betonowej może mieć korzystny wpływ na rozwój mikrostruktury zhydratowanego zaczynu cementowego. Będzie z tym związana duża korzyść przemysłu betonów w aspekcie zrównoważonego rozwoju, jeżeli odpady z MSO, dostępne w dużych ilościach na całym świecie, zostaną wykorzystane do produkcji betonów dobrej jakości.

Popioły z MSO można stosować w materiałach opartych na cemencie jako wypełniacz lub aktywny dodatek pucolanowy. Ponadto popioły denne i lotne z MSO mogą być stosowane jako surowce do produkcji cementu oraz materiałów ceramicznych. Pera i in. (10) badali możliwość zastępowania grubego kruszywa (4-20 mm) w betonie przez denny popiół z MSO. Stwierdzili oni powstawanie pęknięć oraz ekspansję w przypadku stosowania „surowego” popiołu. Kiedy popiół denny potraktowano wodorotlenkiem sodu trwałość betonu poprawiła się, jednak wytrzymałość tego betonu była mniejsza niż porównawczego materiału z naturalnym kruszywem. Lin i in. (11) zastosowali topienie popiołów lotnych z MSO i zmielonym produktem zastępowali cement w zaprawach. Zastępowanie 10% okazało się korzystne. Bertolini i in. (9) zaproponowali mokry (woda) przemiał popiołów z MSO jako skuteczną metodę zabezpieczającą glin przed reakcją zasadową w betonie, która powoduje wydzielanie wodoru i związaną z tym utratę wytrzymałości betonu. Müller i Rübner (12) przeanalizowali powody spadku wytrzymałości betonu zawierającego popiół z MSO. Ustaliли oni, że wydzielanie wodoru spowodowane obecnością glinu ma gorszy wpływ na wytrzymałość niż reakcja alkaliów z krzemionką, która także występuje w przypadku dodawania popiołów z MSO do betonu. Gao i in. (13) zbadali uzdatnianie wodą popiołów lotnych z MSO. Metoda ta zmniejszyła zawartość chloru w popiołach, które wykorzystywano jako zamiennik cementu; przemycie wodą było skuteczne w takim stopniu, że zapobiegło spadkowi wytrzymałości betonu aż do 10% zastępowania cementu. Ferraris i in. (4) zastosowali metodę zeszklenia w 1450°C popiołów dennych bez żadnych domieszek; metoda ta jest prawdopodobnie najlepszą drogą do rozwiązania problemów związanych z dodawaniem odpadów z MSO do betonu. Lee i Rao (15) otrzymali dobre wyniki po zeszkleniu popiołów z MSO z dodatkiem fryty szklanej i drobnym zmieleniu ochłodzonego stopu.

W pracy badano cztery rodzaje popiołów z MSO Termizo w Liberecu w Czechach. Badano zastosowanie tych popiołów w betonach, zastępując nimi cement i drobne kruszywo. Badano popioły w stanie dostawy z MSO (to jest bez jakiegokolwiek obróbki) w celu oceny możliwości ich wykorzystania bez żadnych operacji dodatkowych.

## 2. Materiały i metody

Badano cztery rodzaje popiołów z MSO Termizo w Liberecu (Czechy); denne popioły (S), lotne popioły wychwycone z drugiej i trzeciej linii kotła (A), popioły lotne odebrane z czwartej linii kotła (B) i popiół lotny z elektrofiltru (C). Składy chemiczne tych popiołów podano w tablicy 1. Przygotowano dwie serie próbek betonu [stan-

to the concrete mixture might have a beneficial role in the development of microstructure of hydrated cement paste. Hence a great advantage in the sustainability of the concrete industry would be achieved if MSWI materials, which are available in great quantities throughout the world, could be used to produce quality concretes.

The MSWI ashes can be used in cement based materials as filler or active pozzolanic admixture. Besides these applications MSWI bottom ash and fly ash can be used as raw materials for manufacturing of cement and ceramic products. Pera et al. (10) studied the possibility to replace coarse aggregates (4 – 20 mm) in concrete by MSWI bottom ash. They observed cracking and swelling when “raw” ash was used. When the bottom ash was treated by sodium hydroxide, the durability of concrete was better but still the strength of such concrete was lower than the strength of the reference one with natural gravel. Lin et al. (11) performed melting of MSWI fly ash and the solidified ground melt was used as cement replacement in mortar. The 10% replacement was found to be reasonable. Bertolini et al. (9) proposed the wet (water) grinding of MSWI ashes to be the effective way of prevention of aluminum alkali corrosion in concrete which causes the hydrogen evolution and consequent loss of the concrete strength. Müller and Rübner (12) analyzed the reasons of the strength loss of concrete with MSWI ash content. They found that the hydrogen evolution due to aluminum had the worse effect on strength than alkali-silica reaction which is taking place in MSWI concretes as well. Gao et al. (13) studied the treatment of MSWI fly ash by water. It reduced the chloride content in ash which was then used as cement replacement; the water washing was effective enough to prevent the loss of concrete strength up to 10% cement replacement. Ferraris et al. (14) treated the MSWI bottom ash by vitrification at 1450°C without any other agent; this method is probably the best way how to prevent the problems resulting from adding of MSWI materials to concrete. Lee and Rao (15) obtained positive results after MSWI ashes vitrification with added glass frit and fine grinding of the cooled melt.

In this paper we investigate four types of ashes produced by MSWI facility Termizo in Liberec, in Czech Republic. The ashes are tested as concrete admixtures in roles of cement and fine aggregates replacement. The ashes are studied in the state “as received” from the MSWI plant (i.e. without any treating operation) in order to evaluate the feasibility of their utilization without any additional procedure.

## 2. Materials and methods

Four types of MSWI ashes from Termizo facility in Liberec (CZ) were studied; the bottom ash (denoted S), the fly ash collected in 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> pass of boiler (A), the fly ash collected in 4<sup>th</sup> pass of boiler (B) and fly ash from the electrostatic precipitator ESP (C). The chemical composition of the ashes can be found in Table 1. Two series of concrete specimens [150 mm standard cubes according to (16)] containing the ashes were prepared. Firstly all the ashes were tested as the partial replacement of fine aggregates fraction 0–4 mm (sand) (Table 2). These mixtures will be denoted

dardowe kostki 150 mm według (16)] zawierające dodatek popiołów. W pierwszej serii zbadano wszystkie popioły jako zamiennik części kruszywa frakcji 0-4 mm (piasek, tablica 2). Te mieszanki oznaczono SRA, SRB, SRC, SRS. Stosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R, a kruszywo stanowił naturalny piasek krzemionkowy i dwie frakcje krzemionkowego żwiru. Dodatek wody utrzymywano na takim poziomie aby stosunek w/c wynosił 0,52; bez uwzględniania zawartości popiołu. W drugiej serii popioły lotne A, B, C zastosowano jako zamiennik cementu (tablica 3); w tym przypadku dodatek wody był wyznaczony przez stosunek w/(cement + popiół). Te mieszanki oznaczono CRA, CRB, CRC.

Wpływ popiołów MSO na początek i koniec czasu wiązania zaczynów o normalnej konsystencji badano za pomocą automatycznego aparatu Vicata. Zaczyn o normalnej konsystencji przygotowano z cementu i wody (mieszanka odniesienia) oraz z cementu i popiołów (5, 10 i 15% suchej masy) i z wody. Do badania wpływu dodatku popiołu na konsystencję świeżej mieszanki betonowej zastosowano metodę rozplywu (17). Przygotowane kostki betonowe dojrzewały w wodzie, a wytrzymałość na ścislenie badano po 28 dniach (18). Gęstość nasypową stwardniałego betonu oznaczano mierząc wymiary i ważąc kostki przed badaniem wytrzymałości. Wpływ popiołów na pH betonu oznaczano w mieszankach zawierających 10% popiołu, zastępującego drobne kruszywo. Próbkę betonu pobierano po 2 dniach po zmieszaniu i umieszczano w 200 ml destylowanej wody, pH wyciągu wodnego oznaczano okresowo do 2 miesięcy.

### 3. Wyniki doświadczeń i dyskusja

Na rysunku 1 a, b pokazano wpływ popiołów z MSO na początek i koniec wiązania zaczynu o normalnej konsystencji przygotowanego z cementu, jako próbki odniesienia, oraz z cementu i poszczególnych popiołów. Początek i koniec wiązania w przypadku próbki odniesienia wyniósł 210 i 290 minut. Popiół denny S i popiół lotny z kotła A nie miały wpływu na czas wiązania w całym zakresie dodatku. Popioły lotne B i C; szczególnie popiół lotny C z elektrofiltru miał bardzo niekorzystny wpływ na wiązanie zaczynu. Koniec wiązania zaczynu zawierającego więcej niż 5% popiołu C był dłuższy od 24 godzin. Jest to spowodowane dużą zawartością soli rozpuszczalnych, a także ZnO (8%) w popiele (C) z elektrofiltru. Ilość wody niezbędnej do uzyskania normalnej konsystencji była o około 5% większa w przypadku zaczynu z dodatkiem popiołu lotnego w porównaniu z innymi popiołami (122 ml lub 116 ml na 400 g suchej mieszanki).

Wszystkie badane popioły z MSO zmniejszały rozplyw mieszanek betonowych (rysunek 2). Ten wpływ zaznaczył się we wszystkich mieszankach; popioły adsor-

as SRA, SRB, SRC, SRS in what follows. The cement was the ordinary Portland cement CEM I 42.5 R, the aggregates were natural siliceous sand and two fractions of siliceous gravel. Water was dosed in amount to maintain w/c 0.52 with no corrections to the ash content. In the second series the fly ashes A, B and C were tested as cement replacement (Table 3); here water amount was given by water/(cement+ash) ratio. The mixtures are denoted as CRA, CRB, CRC.

Tablica 1 / Table 1

ANALIZY CHEMICZNE PRZEPROWADZONE ZA POMOCĄ FLUORESCENCJI RENTGENOWSKIEJ

RESULTS OF XRF CHEMICAL ANALYSIS

	mass %			
	A	B	C	S
SiO <sub>2</sub>	15.9	19.6	9.9	33.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.0	9.7	4.2	15.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9	3.4	1.9	8.4
CaO	25.7	25.6	13.0	19.4
MgO	2.1	2.4	1.2	2.0
SO <sub>3</sub>	28.8	14.9	15.7	9.3
ZnO	2.8	2.5	8.0	0.8
Na <sub>2</sub> O	5.4	5.9	17.9	3.6
K <sub>2</sub> O	4.4	4.4	8.4	1.9
TiO <sub>2</sub>	1.6	1.6	0.8	1.5
Cl	0.7	7.3	15.1	1.1
Σ	98.1	97.5	96.0	97.1

The effect of MSWI ashes on initial and final setting time of the paste of normal consistency was studied by help of automatic Vicat apparatus (Beton system). The paste of normal consistency was prepared from cement and water (reference mixture) and from cement and ashes (5, 10 and 15% of the total dry mass) and water. The influence of the ash admixture on the consistency of fresh concrete mixture was studied using the slump test (17).

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH Z DODATKIEM POPIOŁÓW MSO, ZASTĘPUJĄCYCH CZĘŚCIOWO DROBNE KRUSZYWO (MIESZANKI SRA, SRB, SRC, SRS)

COMPOSITION OF CONCRETE MIXTURES CONTAINING MSWI ASHES AS PARTIAL FINE AGGREGATES REPLACEMENT (MIXTURES SRA, SRB, SRC, SRS)

Zastąpienie kruszywa 0-4 Agg. 0-4 replacement	Cement	Popiół Ash	Kruszywo/Aggregates			w/c
			0-4	4-8	8-16	
%	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	
0	400	0	607	260	867	0.52
5	400	30	577	260	867	0.52
10	400	61	546	260	867	0.52
15	400	91	516	260	867	0.52

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH Z DODATKIEM POIOŁÓW MSO, ZASTĘPUJĄCYCH CZĘŚCIOWO CEMENT (MIESZANKI CRA, CRB, CRC)

COMPOSITION OF CONCRETE MIXTURES CONTAINING MSWI ASHES AS PARTIAL CEMENT REPLACEMENT (MIXTURES CRA, CRB, CRC)

Zastąpienie kruszywa Cement replacement	Cement	Popiół Ash	Kruszywo/Aggregates			w/(c+a)
			0-4	4-8	8-16	
%	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	kg m <sup>-3</sup>	
0	400	0	607	260	867	0.52
2	392	8	607	260	867	0.52
5	380	20	607	260	867	0.52
10	360	40	607	260	867	0.52
15	340	60	607	260	867	0.52

bują wodę zarobową. Stałą konsystencję mieszanek można utrzymać stosując plastyfikator.

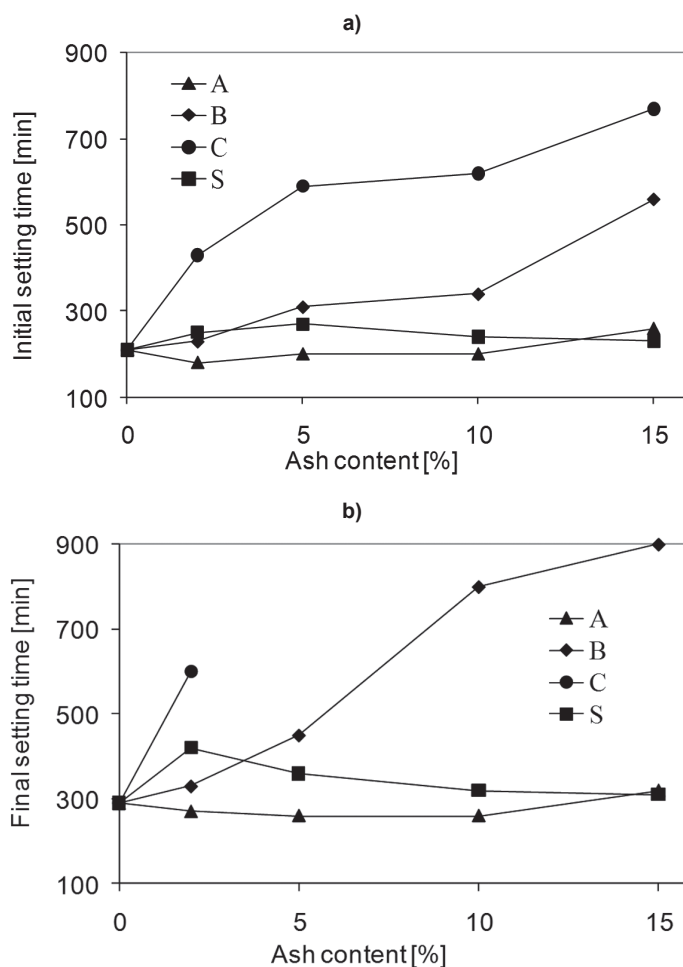
Celem badań było zastąpienie części cementu przez popioły lotne. Popioły A i B wykazały aktywność pucolanową. Ich wpływ na wytrzymałość kostek z betonu na ściskanie po 28 dniach pokazano na rysunku 3 (próbka odniesienia miała 47,1 MPa). Zaskakujący wynik uzyskano w przypadku popiołu lotnego (C) z elektrofiltru, który zmniejszyła wytrzymałość „tylko” o 18% przy jego największym dodatku podczas gdy popioły z kotłowni A i B dawały gorsze wyniki. Podobne wyniki uzyskano w przypadku popiołów z MSO jako zamienników kruszywa drobnego (rysunek 4). W tej serii zastosowano także popiół denný. Ten popiół denný miał rozkład ziarnowy zbliżony do naturalnego drobnego kruszywa (rysunek 5). Popioły lotne miały większą miarkość i z tego względu nie mogły stanowić dobrego zamiennika dla piasku jednak nie są one dostatecznie drobne aby spełniać rolę mikrowypełniacza (19).

Niekorzystnego wpływu popiołów z MSO na wytrzymałość na ściskanie i stwierdzonego zróżnicowanego wpływu poszczególnych popiołów nie można prosto wyjaśnić. Wszystkie popioły spowodowały dostrzegalną ekspansję próbek betonowych w pierwszych godzinach po związaniu w formach. Ta ekspansja znajduje również odbicie na krzywych na rysunku 6, na których pokazano gęstość nasypową próbek jako funkcję zawartości popiołu po 28 dniach dojrzenia. Największy spadek gęstości nasypowej wystąpił w przypadku popiołów lotnych A i B, który dobrze koresponduje ze zmierzonym spadkiem wytrzymałości na ściskanie. Najmniejszy spadek gęstości nasypowej spowodował popiół lotny C z elektrofiltru. Ekspansja próbek betonowych była prawdopodobnie spowodowana dużą zawartością anhydrytu i innych siarczanów we wszystkich badanych popiołach (tablica 1). W przypadku betonu zawierającego popiół denný ekspansja mogła zostać spowodowana także przez wydzielanie wodoru w związku z obecnością glinu, który występował w odpadzie ze spalania i w popiele dennym. Stosowanie popiołu dennego jest także ryzykowne ze względu na zawartość siłczki szklanej, która może spowodować reakcję krzemionki z alkaliowymi w betonie, po dłuższym okresie. Niekorzystny wpływ ekspansji równoważy korzystne właściwości pucolanowe

The prepared cubic concrete specimens were matured in water; the compressive strength was measured after 28 days (18). The bulk density of matured concrete was determined by measuring the dimensions and weighing of the cubes before the strength testing. The possible influence of ashes on pH of concrete was monitored on mixtures containing 10% of ash instead of fine aggregates. The concrete was sampled 2 days after mixing and put into 200 mL of distilled water. The pH of leachate was measured periodically for 2 months.

### 3. Experimental results and discussion

On Fig. 1a, b the influence of MSWI ashes on initial and final setting time of paste of normal consistency prepared from cement as the reference point and from cement and particular ashes is shown. The initial and final setting time of the reference mixture



Rys. 1. Wpływ dodatku popiołów z MSO na a) początek i b) koniec wiązania zaczynów o normalnej konsystencji

Fig. 1. Influence of MSWI ashes on a) initial, b) final setting time of paste of normal consistency

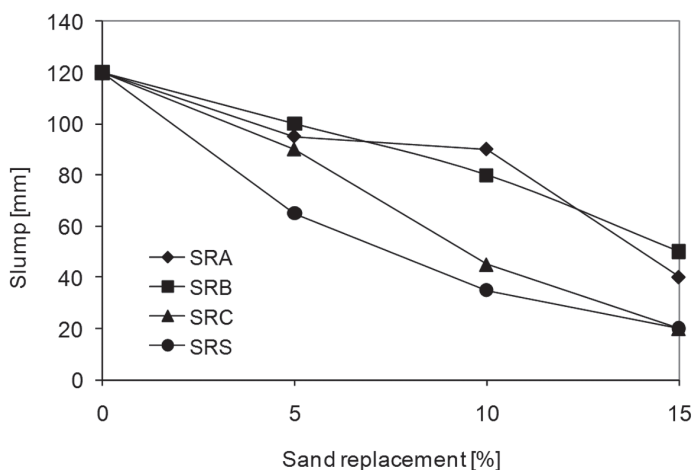


we popiołów lotnych A i B. Jedynie w przypadku popiołów dennych zastosowanych w małej ilości (rysunek 4), zaznaczył się pewien korzystny wpływ jego właściwości pucolanowych oraz składu ziarnowego na wytrzymałość betonu. Pewną zagadką był wpływ popiołu lotnego C, który powodował niekorzystne zmiany czasu wiązania, jednak właściwości końcowe betonu nie były najgorsze.

W związku z tym, że pH wyciągu wodnego popiołu z elektrofiltru oraz dennego było mniejsze od 12, zbadano możliwy wpływ dodatku popiołów na pH przygotowanych próbek betonu. pH próbek betonu, w których popiół zastępował 10% drobnego kruszywa, nie uległ zmianie i był taki sam jak próbki odniesienia (pH = 12) i nie zmieniał się przez dwa miesiące.

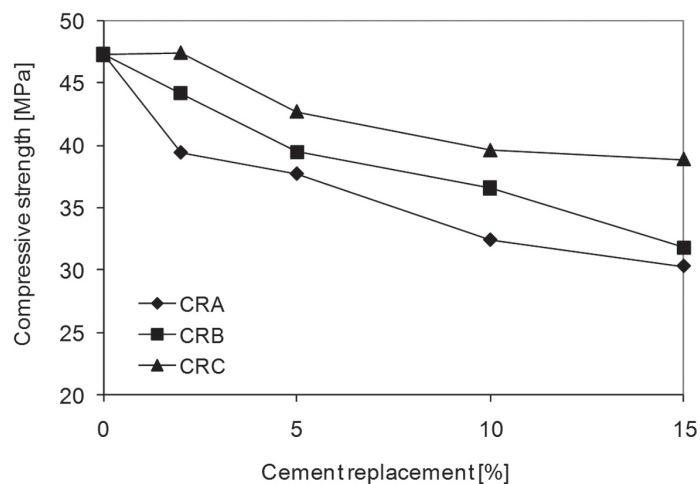
#### 4. Wnioski

Badano odpady powstałe w miejskiej spalarni Termizo w Liberecu (Republika Czeska), a mianowicie popiół denny, dwa rodzaje popiołów lotnych z palenisk kotłowych i popiołów lotnych z elek-



Rys. 2. Rozpływ mieszanek betonowych zawierających popioły z MSO

Fig. 2. Slump of the fresh concrete mixtures containing MSWI ashes



Rys. 3. Wpływ popiołów lotnych z MSO jako zamiennika cementu na wytrzymałość na ścislenie betonu po 28 dniach twardnienia

Fig. 3. Effect of MSWI fly ashes as cement substitutes on the relative compressive strength of 28 days old concrete

was 210 and 290 min. The bottom ash S and the boiler fly ash A do not have any significant influence on the paste setting in the whole concentration range. The fly ashes B and C retard the setting; especially the ESP fly ash C has very detrimental effect on the paste setting. The final setting time of mixtures containing more than 5% of C was longer than 24 hours. It is caused by high content of soluble salts and especially ZnO (8%) in the ESP ash (C). The amount of needed water for the preparation of normal consistency paste was about 5% higher for the C fly ash containing paste in comparison with the other ashes (122 ml and 116 ml per 400 g of dry mixture).

All the tested MSWI ashes reduced the slump of the fresh concrete mixture (Fig. 2). This effect was observed in all prepared mixtures; the ashes absorbed the mixing water. The constant consistency of mixture could be maintained by using of a plasticizer.

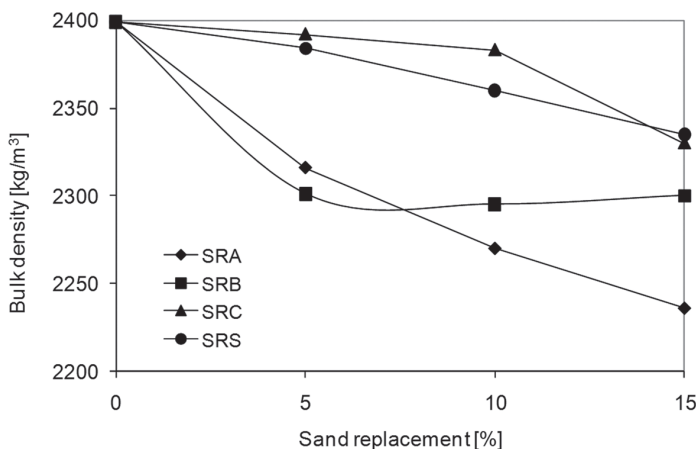
The fly ashes were intended to be used as partial cement replacement. The ashes A and B were pozzolanic active. The relative compressive strength of 28-days concrete is presented in Fig. 3. (control strength was 47.1 MPa). Surprisingly the ESP fly ash (C) reduced the strength by "only" 18 % at its highest dose while the boiler ashes A and B had the worse effect. Similar results were obtained when the MSWI ashes were used as the partial replacement of fine aggregates (Fig. 4). Here the bottom ash was also employed. The bottom ash has the particle size distribution relatively close to the natural fine aggregates (Fig. 5). The fly ashes are finer than the natural sand and thus cannot replace it adequately but they are not fine enough to play a role of microfiller (19).

The negative effect of MSWI ashes on the compressive strength and the observed different influence of particular ashes cannot be explained by a simple reason. All the ashes caused perceivable expansion of the concrete mixture during first hours of setting in moulds. The concrete expansion is documented also in Fig. 6 where the bulk density of specimens after 28 days of maturing is plotted as function of the ash content. The highest decrease of bulk density caused fly ashes A and B which is in agreement with the measured decrease of compressive strength. The smallest decrease of bulk density caused the ESP fly ash C. The expansion of concrete was most probably due to the high content of anhydrite and other sulfates in all studied ashes (Table 1). In the case of concrete containing bottom ash the expansion might be caused also by hydrogen evolution due to the presence of aluminum which was separated neither from the incinerated waste nor from the bottom ash. The bottom ash is risky also due to the visible content of scrap glass which can induce alkali-silica reaction in concrete in a longer time period. The negative effect of expansion processes overweight the positive pozzolanic activity of A and B fly ash. Only in case of bottom ash used in low amounts (Fig. 4) there was observed certain positive effect of its pozzolanicity and granulometry on the concrete strength. Sort of enigma was the behavior of fly ash C which had very negative influence on the setting time but the final properties of the concrete were not the worst.

trofiltru badanych w stanie dostawy z MSO, jako zamienniki cementu i drobnego kruszywa; w próbkach betonu z cementu portlandzkiego.

Wyniki doświadczalne nie stwarzały podstaw do traktowania popiołów jako potencjalnych składników do produkcji betonu. Jedy- nym nie wpływającym ujemnie na wytrzymałość próbek betonu był popiół denny – przy dodatku nie przekraczającym 10% - jako zamiennik drobnego kruszywa (piasek 0-4 mm). Popioły lotne skła- dają się z drobnych cząstek i z tego powodu nie mogą zastępować piasku, jednak po zmieleniu mogą spełniać rolę mikrowypełniacza w betonie. Popiół denny nie zmienia czasu wiązania mieszanki i nie powoduje ekspansji próbek betonu, w związku z tym nie ma niekorzystnego wpływu, takiego jak popioły lotne z paleniska kotła A i B. Popiół lotny C z elektrofiltru opóźnia wiązanie w sposób nie- dopuszczalny w związku z zawartością różnych soli, jednak eks- pansja i uzyskane wytrzymałości były porównywalne z popiołem dennym. Z drugiej strony nie nastąpiła zmiana pH pod wpływem popiołów, co ma korzystne znaczenie w perspektywie stosowa- nia stali zbrojeniowej.

Można podsumować, że spośród badanych popiołów z MSO, tyl- ko popiół denny może być zastosowany jako dodatek do beto- nu bez żadnej obróbki wstępnej, jeżeli jakość betonu nie ulegnie pogorszeniu. Popioły lotne wymagają pewnej obróbki wstępnej zanim mogłyby być wykorzystane jako dodatki do betonu. Najko- rzystniejszą obróbką wydaje się zeszklenie. Trzeba zbadać trwa- łość właściwości sporządzonych betonów, potrzeba także dalszych doświadczeń, w przypadku ich wykorzystania w przemysłowej produkcji betonu.

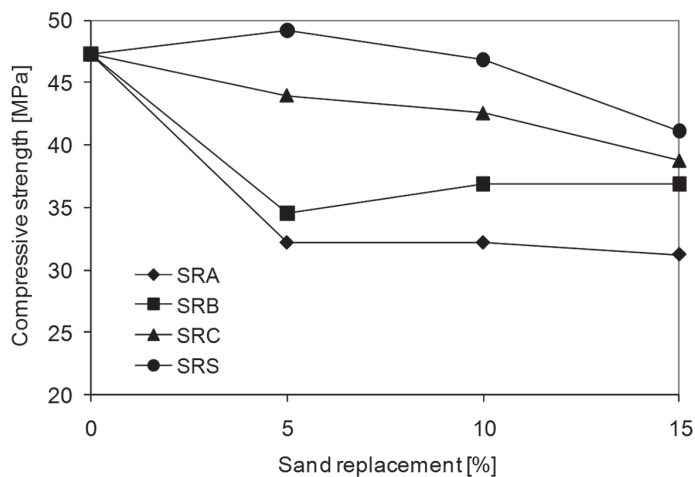


Rys. 6. Wpływ popiołów z MSO zastępujących drobne kruszywo, na gęstość nasypową stwardniałego betonu

Fig. 6. Effect of MSWI ashes as fine aggregates substitutes on the bulk density of matured concrete

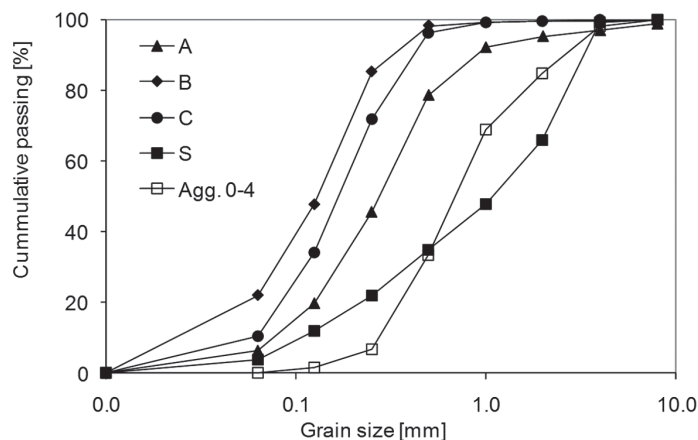
## Literatura / References

1. E. E. Berry, V. M. Malhotra, Fly-ash for use in concrete - a critical-review. *Journal of the American Concrete Institute* **77**, 59-73 (1980).
2. P. Chindapasirt, C. Chotithanorn, H. T. Cao, V. Sirivivatnanon, Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials* **21**, 356–361 (2007). J. Małolepszy, E. Tkaczewska, Effect of fly ash fineness on the fly ash cement hydration and properties. *Cement Wapno Beton* **12/74**, 297-302 (2007).



Rys. 4. Wpływ popiołów z MSO jako zamiennika drobnego kruszywa na wytrzymałość na ściskanie próbek betonu po 28 dniach twardnienia

Fig. 4. Effect of MSWI ashes as fine aggregates substitutes on the relative compressive strength of 28 days old concrete



Rys. 5. Krzywe ziarnowe popiołów z MSO i naturalnego drobnego kruszywa

Fig. 5. Grading analysis of MSWI ashes and natural fine aggregates

Since the pH of leachate of ESP and bottom ash themselves was lower than 12 the possible effect of MSWI ashes admixture on pH of the prepared concrete was examined. The pH of concrete containing the ashes in the amount of 10% fine aggregates replacement was not influenced by the ashes presence and was constant and the same as the pH of the control sample (pH = 12) during two months.

## 4. Conclusions

The waste materials generated by municipal solid waste incineration facility Termizo in Liberec (Czech Republic), namely bottom ash, two types of furnace fly ash and fly ash from electrostatic precipitator in the state “as received” from MSWI plant, were tested as cement and fine aggregates replacing admixtures in ordinary Portland cement based concrete.

The experimental results were not very prospective, as for the potential of the studied ashes for using in common concrete production. The only utilization which did not influence negatively the

3. J. M. Khatib, Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials* **22**, 1963–1971 (2008).
4. J. Bensted, J. R. Smith, Oilwell cements part 5: applications of fly ash in well cementing. *Cement Wapno Beton* **13/75**, 17-30 (2008).
5. P. Dinakar, K. G. Babu, M. Santhanam, Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. *Cement and Concrete Composites* **30**, 880–886 (2008).
6. H. Yazici, The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* **22**, 456-462 (2008).
7. E. Tkaczewska, J. Małolepszy, Effect of the fly ash fineness on the sulphate resistance off fly ash cement. *Cement Wapno Beton* **14/76**, 26-33 (2009).
8. E. Vejmelková, M. Pavlíková, M. Keppert, Z. Keršner, P. Rovnaníková, M. Ondráček, M. Sedlmajer, R. Černý, Fly-Ash Influence on the Properties of High Performance Concrete. *Cement Wapno Beton* **13/75**, 189-204 (2009).
9. L. Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A.Q. Curzio, M. Collepardi, MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cement and Concrete Research* **34**, 1899–1906 (2004).
10. J. Pera, L. Coutaz, J. Ambroise, M. Chababbet, Use of Incinerator Bottom Ash in Concrete. *Cement and Concrete Research* **27**, 1–5 (1997).
11. K. L. Lin, K. S. Wang, B. Y. Tzeng, C. Y. Lin, The Reuse of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash Slag as a Cement Substitute. *Resources Conservation & Recycling* **39**, 315–324 (2003).
12. U. Müller, K. Rübner, The Microstructure of Concrete Made with Municipal Waste Incinerator Bottom Ash as an Aggregate Component. *Cement and Concrete Research* **36**, 1434–1443 (2006).
13. X. Gao, W. Wang, T. Ye, F. Wang, Y. Lan, Utilization of Washed MSWI Fly Ash as Partial Cement Substitute with the Addition of Dithiocarbamic Chelate. *Journal of Environmental Management* **88**, 293–299 (2008).
14. M. Ferraris, M. Salvo, A. Ventrella, L. Buzzi, M. Veglia, Use of Vitrified MSWI Bottom Ashes for Concrete Production. *Waste Management* **29**, 1041–1047 (2009).
15. T.-C. Lee, M.-K. Rao, Recycling Municipal Incinerator Fly and Scrubber Ash into Fused Slag for the Substantial Replacement of Cement in Cement Mortars. *Waste Management* **29**, 1952 – 1959 (2009).
16. ČSN EN 12390-1. Testing of settled concrete – Part 1: Shape, dimensions and other requirement on specimens and moulds. European Committee for Standardization.
17. ČSN EN 12350-2. “Testing of fresh concrete – Part 2: Slump test.” European Committee for Standardization.
18. ČSN EN 12390-3. “Testing of settled concrete – Part 3: Compressive strength.” European Committee for Standardization.
19. ČSN EN 12620. “Aggregates for concrete.” European Committee for Standardization.

strength of the prepared concrete was application of bottom ash as partial – up to 10% – replacement of fine aggregates (sand 0-4 mm). The fly ashes had too fine particle size distribution to be able to replace the sand but they would have to be grinded in order to achieve the granulometry suitable for concrete microfiller. The bottom ash did not influence the setting time of the mixture and the expansion of concrete mixture was not as detrimental as in the case of boiler fly ashes A and B. The ESP fly ash C retarded the setting time in an unacceptable way due to high content of various salts but the expansion and the achieved strength was comparable with the bottom ash. On the other hand, no effect of ashes on pH was observed which is positive for the possible steel reinforcement utilization.

Therefore, it can be concluded that among the MSWI ashes investigated in this paper only the bottom ash can be used as concrete admixture without any treatment if the concrete quality is not to be sacrificed. The fly ashes have to be treated in some way in order to be applicable as concrete admixtures. The most promising treatment seems to be vitrification. The durability properties of studied concretes have to be evaluated as well in future tests if they are to be used in common production.

## Acknowledgements

The work has been supported by financial mechanisms of EEA and Norway, under grant No A/CZ0046/1/0027.