

Popiół lotny jako składnik betonu z cementów żuźlowych

Fly ash as a component of concrete from slag cements

1. Wprowadzenie

Współczesny beton jest materiałem kompozytowym, do którego, obok tradycyjnych składników takich jak cement oraz kruszywo i woda, wprowadzane są dodatki mineralne i domieszki chemiczne. Są to pełnowartościowe składniki betonu, które mogą w znacznym stopniu wpływać na właściwości zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu (1-3).

Jednym z najczęściej stosowanych dodatków do betonu są krzemionkowe popioły lotne. Są one ubocznym produktem spalania węgla kamiennego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Stanowią one cenny i pożądaną na rynku surowiec przemysłu materiałów budowlanych, stosowany zwłaszcza do produkcji cementu i betonu. Ma to swoje odzwierciedlenie w obowiązujących normach, które określają wymagania jakościowe dla popiołu, stosowanego jako główny składnik cementu (4), lub dodatek do betonu (5). Zasady stosowania popiołów lotnych jako dodatku do betonu zawarte są w normie PN-EN 206-1 (6) i uzupełnieniu krajowym do tej normy (7). Przepisy polskie (7) dopuszczają możliwość stosowania popiołu lotnego do betonu zawierającego w swoim składzie cement portlandzki CEM I lub cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/A, z wyłączeniem cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/A-V. Część krajów europejskich dopuszcza także wytwarzanie betonu z innych cementów, obok których można równocześnie dodawać krzemionkowe popioły lotne (8). Dotyczy to głównie cementów portlandzkich żuźlowych CEM II/B-S i cementów hutniczych CEM III (Belgia, Czechy, Niemcy, Włochy, Luksemburg, Holandia, Słowacja). W przypadku cementów wieloskładnikowych CEM V/A,B także norma PN-EN 197-1:2002 dopuszcza możliwość równoczesnego dodawania żuźla i popiołu, nawet gdy zawartość żuźla jest większa niż 20% (4). Zaletą takiego rozwiązania jest zwiększona odporność betonu na działanie czynników agresywnych chemicznie (9).

Szersze i właściwe stosowanie popiołów lotnych w technologii betonu jest zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju, bowiem pozwala na optymalizację zużycia cementu, a tym samym na obniżenie emisji CO₂ i zmniejszenie zużycia naturalnych surowców kopalnych w produkcji klinkieru cementowego. Równocześnie stosowanie popiołów lotnych nie tylko wpływa na zmniejszenie

1. Introduction

Modern concrete is composite material, where apart of traditional components as cement, aggregate and water, chemical admixtures and mineral additives are also present. They are fully valuable concrete components which in significant way influence the properties both, concrete mixture and hardened concrete (1-3).

One of the most common additive used in concrete production is siliceous fly ash. It is by-products of dust coal combustion in power stations. It is valuable raw material for building industry, especially for cement and concrete producers. It has its reflection in current standards, which determine quality parameters for fly ash as main component of cement (4) or additive to concrete (5). The regulations of fly ash use in concrete composition are consisted in standard PN-EN 206-1 and national appendix to this standard (6, 7). Domestic resolutions (7) admit the possibility of fly ash use as the addition of concrete containing Portland cement CEM I or composite Portland cement CEM II/A, excluding fly ash Portland cement CEM II/A-V. In some European countries (8) for wider range of cement types fly ash addition to concrete is admitted. It mainly concerns Portland slag cements CEM II/B-S and Blastfurnace slag cements CEM III in Belgium, Czech Republic, Germany, Italy, Luxembourg, Holland and Slovakia. In case of composite cements CEV/A,B also standard PN-EN 197-1:2002 allows the simultaneous addition of slag and fly ash, even when slag contents is higher than 20% (4). Increased resistance of concrete to aggressive chemical attack is also an advantage of such solution (9).

Wider and proper use of fly ash in concrete technology is in good agreement with sustainable development, for it enables the optimization of cement use which means the decrease of CO₂ emission and natural raw materials use in the production of cement clinker. The application of fly ash not only gives the decrease of natural raw materials and limits hazardous influence on the environment by the limitation of field deposits of industrial by-products, which among others is fly ash.

This paper presents the examination of the influence of siliceous fly ash addition on concrete mixture properties as well as of hardened concrete. The concrete was produced from cements containing granulated Blastfurnace slag e.g. Portland slag cement

zużycia naturalnych zasobów surowców mineralnych, lecz także ogranicza ich negatywny wpływ na środowisko naturalne poprzez ograniczenie powierzchni na składowanie tych ubocznych produktów procesów przemysłowych.

Celem badań było określenie wpływu dodatku krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu wykonanego z cementów zawierających granulowany żużel wielkopiecowy, to znaczy cementu portlandzkiego, żużlowego CEM II/B-S 32,5R oraz cementu hutniczego CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA.

2. Materiały stosowane w badaniach

Popiół stosowany jako dodatek mineralny typu II do betonu musi spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 450-1:2007 (5). W tabelicy 1 przedstawiono skład chemiczny stosowanego w badaniach popiołu lotnego, natomiast w tabelicy 2 pokazano właściwości popiołu niezbędne do jego oceny zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 450-1:2007 (5). Na rysunku 1 przedstawiono przeciętny obraz ziaren użytego popiołu lotnego.

Tabela 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY KRZEMIONKOWYCH POPIOŁÓW LOTNYCH
CHEMICAL COMPOSITION OF SILICEOUS FLY ASH

Składnik Component	Zawartość, % mas./ Content, % of mass.						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Zawartość Content	51,5	27,8	7,5	3,7	2,5	1,1	3,0

Tabela 2 / Table 2

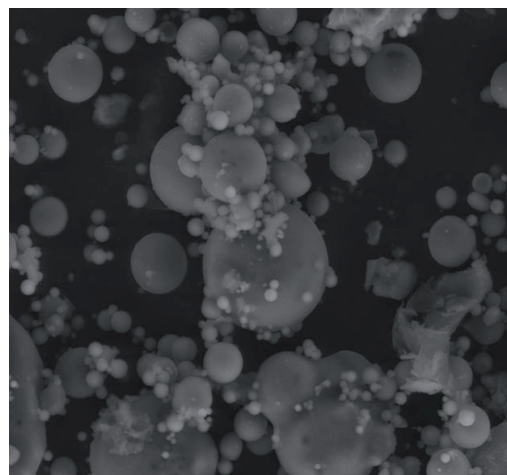
WŁAŚCIWOŚCI POPIOŁÓW LOTNYCH
PROPERTIES OF SILICEOUS FLY ASH

Składnik Component	Strata prażenia Loss of ignition %	SO ₃ %	CaO _{wolne} CaO _{free} %	Cl ⁻ %	Aktywność pucolanowa, Pozzolanic activity, %		Miałość, sito Fineness, sieve 45 μm %	Gęstość Density g/cm ³
					po 28 dniach after 28 days	po 90 dniach after 90 days		
Zawartość Content	2,2	0,7	0,07	0,01	78,4	93,2	34,0	2,13

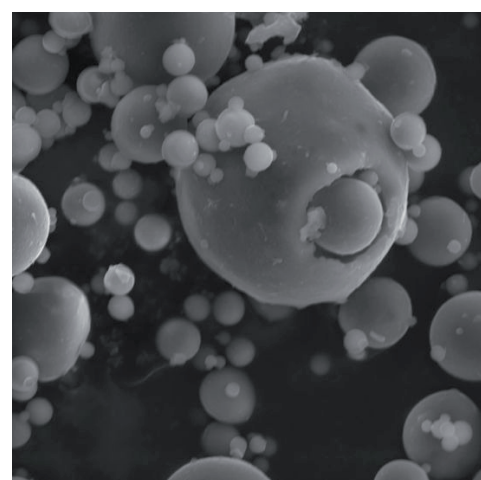
W tabelicy 3 podano podstawowe właściwości fizyczne cementów, z których wykonano mieszanki betonowe do badań.

Ważną właściwością popiołów lotnych jest ich wpływ na kształtowanie właściwości mieszanki betonowej, a przede wszystkim na wodożądność, co pociąga za sobą dobór współczynnika w/c, wybór rodzaju i ilości domieszek chemicznych (10). Wpływ stosowanego w badaniach popiołu lotnego na wodożądność zapraw zbadano metodą podaną w „Załączniku B” do normy PN-EN 450-1:2007 (5). Miarą wodożądności, według tej metody, jest rozpliw zaprawy z cementu bez dodatku popiołu lotnego oraz z jego dodatkiem, przy czym zastępuje on 30% cementu. Wyniki przeprowadzonych oznaczeń pokazano w tabelicy 4.

a)



b)



Rys. 1. Krzemionkowy popiół lotny zastosowany do badań - a) powiększenie 3000 x; b) powiększenie 8000 x

Fig. 1. SEM of siliceous fly ash used in the tests - a) 3000 x and b) 8000 x

CEM II/B-S 32.5R and Blastfurnace slag cement CEM III/A 32.5N-LH/HSR/NA.

2. Materials

Fly ash applied as mineral addition of II type must comply with the requirements of standard PN-EN 450-1:2007. Table 1 presents chemical composition of fly ash used in the study, whereas Table 2 illustrates the fly ash properties essential for its evaluation according with the requirements of standard PN-EN 450-1:2007. Figure 1 presents the picture of fly ash grains.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTÓW
PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENTS

Właściwość/Property	CEM II/B-S 32,5R	CEM III/A 32,5N
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a, Blaine's surface, cm ² /g	3400	3800
Zmiany objętości, Le Chatelier; mm	0,6	0,5
Wodożądność, Water demand, %	28,7	29,7
Początek wiązania, Beginning of setting time, min.	216	253
Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach, Compressive strength after 2 days, MPa	18,1	9,8
Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, Compressive strength after 28 days, MPa	49,8	44,4

Do przygotowania mieszanek betonowych zastosowano piasek płukany o uziarnieniu do 2 mm oraz kruszywa żwirowe frakcji 2÷8mm i 8÷16mm. W celu uzyskania zbliżonej konsystencji do wszystkich mieszanek betonowych dodano superplastyfikator nowej generacji, oparty na bazie polikarboksyteterów.

3. Wyniki doświadczeń

3.1. Wpływ dodatku popiołu lotnego na właściwości mieszanki betonowej

Skład badanych mieszanek betonowych pokazano w tablicy 5. Popiół lotny dodawano do betonu w ilości 20 i 33% w stosunku do masy cementu. Ilość spoiwa w poszczególnych mieszankach obliczano zgodnie z zasadami określonymi w normie PN-EN 206-1 (6) z uwzględnieniem wartości „k” równej 0,2 oraz 0,4 ($s = c+k \cdot p$ [kg]; gdzie s- ilość spoiwa w kg, c – ilość cementu w kg, p – ilość popiołu w kg). Stosunek wodno-spojowy (w/s) dla wszystkich badanych mieszanek betonowych wynosił 0,5. Ilość superplastyfikatora dobierano tak, aby uzyskać opad stożka (11) na poziomie 15÷18 cm, co pozwala zaliczyć ten beton do pompowalnych.

W przypadku mieszanek betonowych wykonano następujące oznaczenie:

- temperaturę mieszanki betonowej,
- konsystencję metodą opadu stożka według normy PN-EN 12350-2 (11) (po zarobieniu- t_0 oraz po 45 minutach- t_{45}),
- zawartość powietrza według normy PN-EN 12350-7 (12).

Wyniki przeprowadzonych oznaczeń przedstawiono w tablicy 6. Można zauważyć, że we wszystkich przypadkach konsystencja

In Table 3 basic physical properties of cements used for concrete mixture preparation are depicted.

The addition of fly ash influences significantly the properties of the mix and principally water demand which means of w/c ratio as well as qualitative and quantitative selection of chemical admixtures (10). Measurement of water demand changes caused by fly ash used in experiments was carried out according to procedure given in the “Appendix B” to standard PN-EN 450-1:2007 (5). The value of water demand, according to applied procedure, is the flow of paste from cement without and with the addition of fly ash. The results of measurements are shown in Table 4.

Concrete mixtures were prepared with washed sand with grains under 2 mm and gravel aggregates of fractions 2÷8 mm and 8÷16 mm. In order to obtain the similar consistency for all mixtures, the new generation of superplasticizer, based on polycarboxyl-ethers was added.

Tablica 4 / Table 4

WODOŻĄDNOŚĆ ZAPRAW BEZ I Z DODATKIEM POPIOŁU LOTNEGO
WATER DEMAND OF MORTARS WITHOUT AND WITH FLY ASH ADDITION

Rodzaj spoiwa Binder type	Rozpływ/ Flow mm	Ilość wody Water amount ml
CEM II/B-S 32,5R	163	225
CEM II/B-S 32,5R + 30 % popiół krzemionkowy/siliceous fly ash	170	225
CEM III/A 32,5N	160	225
CEM III/A 32,5N + 30 % popiół krzemionkowy/siliceous fly ash	160	225

3. Experiments

3.1. Influence of fly ash addition on concrete mixture properties

The composition of tested concrete mixtures is depicted in Table 5. Fly ash was added to concrete in amounts of 20 and 33%, in relation to cement. The content of binder in the mixtures was calculated in accordance with the standard PN-EN 206-1, taking into account „k” value of 0.2 and 0.4 ($s = c+k \cdot p$ in kg; where s – amount of binder in kg, c – amount of cement in kg, p – amount of fly ash in kg). Water to binder ratio (w/s) for all tested concrete mixtures was 0.5. The amount of superplasticizer was selected to reach the slump on the level of 15÷18 cm (pumpable concrete) (11).

Tablica 5 / Table 5

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH
MIXTURES COMPOSITION

Mieszanka Mixture	Wartość „k” value	Zawartość składnika/Amount of component, kg/m ³						
		Cement	Popiół Fly ash	Piasek Sand	Żwir Gravel 2-8	Żwir Gravel 8-16	SP	Woda Water
C II	-	320	-	699	612	641	3,3	160
CEM II/20- 1	0,2	308	62	676	592	620	3,2	160
CEM II/20-2	0,4	296	59	681	596	625	3,3	160
CEM II/33-1	0,2	300	99	663	580	608	3,1	160
CEM II/33-2	0,4	283	93	671	587	615	3,2	160
CEM III	-	320	-	699	612	641	4,0	160
CEM III/20- 1	0,2	308	62	676	592	620	3,5	160
CEM III/20-2	0,4	296	59	681	596	625	3,5	160
CEM III/33-1	0,2	300	99	663	580	608	3,0	160
CEM III/33-2	0,4	283	93	671	587	615	3,1	160

Uwaga: SP-superplastyfikator; CEM II- CEM II/B-32,5R;CEM III-CEM III/A 32,5N-LH-HSR/NA
SP-superplasticizer;CEM II- CEM II/B-32,5R; CEM III-CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA

mieszanek betonowych utrzymywała się na zakładanym poziomie (15-18 cm) przez okres 45 minut.

3.2. Wpływ dodatku popiołu lotnego na właściwości stwardniałego betonu

Zakres badań stwardniałego betonu obejmował następujące pomiary:

- wytrzymałość na ściskanie po 2, 28 i 180 dniach według normy PN-EN 12390-3 (13),
- głębokości penetracji wody pod ciśnieniem według normy PN-EN 12390-8 (14),
- nasiąkliwości według normy PN-B/88 – 06250 (15),
- mrozoodporności betonu według normy PN-B/88–06250 [15] dla stopnia mrozoodporności F150. Zgodnie z normą PN-B/88–06250 (15) za mrozoodporne uznaje się te betony, które po 150 cyklach zamrażania/rozmarzania (-18°C/+18°C), wykazują spadek wytrzymałości nie większy od 20% oraz spadek masy nie przekraczający 5% w stosunku do masy próbek nie zamrażanych.

Wyniki badań stwardniałego betonu przedstawiono w tablicach 7 i 8 oraz na rysunku 2.

4. Omówienie wyników badań

Powszechnie wiadomo, że popiół lotny jako składnik betonu wpływa zarówno na kształtowanie się właściwości mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu (1-3, 16). Wpływ dodatku popiołu na właściwości betonu zależy od jego zawartości, składu chemicznego i fazowego, a więc od rodzaju paleniska, w którym

The following parameters of concrete mixtures were examined:

- temperature of concrete mixture,
- consistency by slump method according to the standard PN-EN 12350-2 (11) (after mixing - t_0 and after 45 minutes- t_{45}),
- air content according to the standard PN-EN 12350-7 (12).

The results of examinations are presented in Table 6. For all samples the consistency of mixtures was on estimated level (15-18 cm) during 45 minutes.

3.2. The influence of fly ash addition on the properties of hardened concrete

For hardened concrete the following parameters were tested:

- compressive strength after 2, 28 and 180 days according to the standard PN-EN 12390-3 (13),
- depth of water penetration under pressure according to the standard PN-EN 12390-8 (14),
- water absorbability according to the standard PN-B/88 – 06250 (15),
- freeze-thaw resistance of concrete according to the standard PN-B/88–06250 (15) for freeze-thaw resistance, grade F 150. In conformity with the standard PN-B/88–06250 (15) concrete is freeze-thaw resistant if after 150 cycles of freezing/defreezing (-18°C/+18°C), the drops of strength are not higher than 20% and mass loss not higher than 5% in relation to the standard samples.

The results of hardened concrete tests are presented in Tables 7 and 8 as well as on Fig. 2.

spalano węgiel (17). Także rodzaj cementu, z którego wyprodukowano beton z dodatkiem popiołu lotnego, ma wpływ na jego właściwości, zwłaszcza na trwałość (9, 18).

W przypadku badanego krzemionkowego popiołu lotnego, jego dodatek do zapraw z cementu portlandzkiego CEM I i portlandzkiego żuźlowego CEM II/B-S 32,5R spowodował zmniejszenie ich wodożądności. Pokazują to wyniki zebrane w tablicy 4, a mianowicie większa średnica rozpląwu placka. Pozwala to na uzyskanie zakładanej konsystencji przy mniejszym dodatku wody zarobowej lub domieszki uplastyczniającej. Konsystencja badanych mieszanek betonowych z dodatkiem popiołu krzemionkowego nie uległa znaczącej zmianie i utrzymywała się przez cały czas pomiarów (do 45 minut) na zakładanym poziomie 15-18 cm opadu stożka (tablica 6).

Zawartość powietrza we wszystkich mieszankach nie przekraczała 2% (tablica 6) i nieznacznie zwiększała się w mieszankach z cementu żuźlowego z dodatkiem popiołu. Właściwości stwardniałego betonu pokazują, że wprowadzenie popiołu lotnego obniża wytrzymałość wczesną betonu po 2 dniach (tablica 7). Wynika to z powolnej hydratacji krzemionkowego popiołu lotnego w temperaturze pokojowej, jego korzystny wpływ na właściwości betonu zaznacza się dopiero po dłuższym okresie twardnienia. W praktyce zwiększenie aktywności spoiw zawierających krzemionkowe popioły lotne uzyskuje się poprzez dodatkowy przemiał, obróbkę cieplną lub aktywację chemiczną (3).

Badane betony z cementów żuźlowych z dodatkiem popiołu lotnego mają bardzo zbliżone wytrzymałości w okresie normowym do wytrzymałości betonów bez dodatku popiołu. Natomiast po dłuższym okresie twardnienia, po 180 dniach wytrzymałość betonów z cementów żuźlowych (CEM II, CEM III) i popiołu lotnego jest wyższa niż betonów nie zawierających dodatku popiołu lotnego (tablica 7). Szczególnie dużą dynamikę przyrostu wytrzymałości wykazują betony wykonane z cementu hutniczego CEM III/A 32,5N-LH-HSR/NA z dodatkiem popiołu lotnego (rysunek 3).

Tablica 6 / Table 6
WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH
CONCRETE MIXTURES PROPERTIES

Mieszanka Mixture	Opad stożka po zarobieniu t_0 Slump after mixing t_0 cm	Opad stożka po 45 minutach t_{45} Slump after 45 minutes t_{45} cm	Zawartość powietrza, Air content %	Temperatura mieszanki Mixture temperature °C
CEM II	18	16	1,9	19,1
CEM II/20- 1	18	16	1,7	18,6
CEM II/20-2	16	15	1,7	19,4
CEM II/33-1	17	17	1,7	18,8
CEM II/33-2	18	16	1,9	17,9
CEM III	19	15	1,9	19,0
CEM III/20- 1	18	15	1,9	18,0
CEM III/20-2	18	15	1,9	18,8
CEM III/33-1	18	15	1,9	17,9
CEM III/33-2	17	15	1,7	18,9

Tablica 7 / Table 7
ŚREDNIA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE $f_{ck,cube}$ ORAZ NASIĄKLIWOŚĆ BETONU
AVERAGE COMPRESSIVE STRENGTH $f_{ck,cube}$ AND WATER ABSORBABILITY OF CONCRETE

Mieszanka Mixture	Wytrzymałość na ściskanie po Compressive strength after			Nasiąkliwość Water absorbability %
	2 dniach/days, $f_{ck,cube}$ MPa	28 dniach/days, $f_{ck,cube}$ MPa	180 dniach/days, $f_{ck,cube}$ MPa	
CEM II	21,6	54,2	66,1	4,2
CEM II/20- 1	19,0	56,3	73,2	3,3
CEM II/20-2	16,1	49,3	70,5	4,0
CEM II/33-1	18,9	54,7	70,1	3,3
CEM II/33-2	19,1	53,6	70,4	3,4
CEM III	9,6	54,9	70,0	3,2
CEM III/20- 1	8,5	53,0	76,8	3,3
CEM III/20-2	7,8	51,7	72,1	3,8
CEM III/33-1	6,6	52,6	72,8	3,6
CEM III/33-2	6,3	47,5	70,1	3,9

4. Discussion of test results

It is commonly known that fly ash addition influences both the properties of mixture and of hardened concrete (1-3, 16). This influence on concrete properties depends on fly ash content, its chemical and phase composition, therefore of the type of furnace in which the coal was burned (7). Moreover, the type of cement from which the concrete with fly ash addition was produced influences on its properties, especially on durability (9, 18).

In the case of used siliceous fly ash its addition to the mortars from Portland cement CEM I and Portland slag cement CEM II/B-S

Wszystkie badane betony, niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu, charakteryzowały się dużą szczelnością. Głębokość penetracji wody była mniejsza od 40 mm (rysunek 3). Najlepsze wyniki uzyskano przy dodatku 20 i 33% popiołu do betonu z cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/B-S 32,5R przy współczynniku $k=0,2$ (rysunek 3, tablica 5).

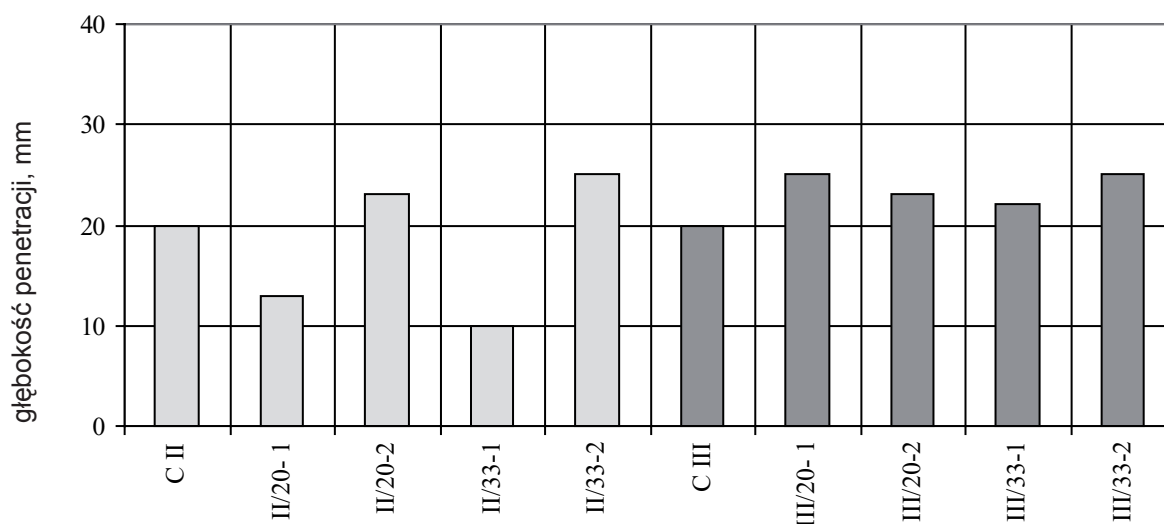
Badane betony wykazały także niską nasiąkliwość. Wynikać to może z korzystnego wpływu zarówno granulowanego żużla wielkopieczowego w cemencie, jak i dodatku popiołu lotnego, na mikrostrukturę stwardniałego betonu (1, 3, 19). Wyniki badań mrozoodporności betonu w przypadku stopnia F 150 pokazują, że wymagań normy PN-B/88-06250 (14) nie spełnił beton z cementu hutniczego CEM III/A 32,5N-LH-HSR/NA z dodatkiem 33% popiołu lotnego, przy $k=0,4$ (tablica 8). Łagosz (9) stwierdził,

Tablica 8 / Table 8

WYNIKI BADAŃ MROZOODPORNOŚCI BETONU

RESULTS OF CONCRETE FROST RESISTANCE EXAMINATION

Mieszanka Mixture	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength		Spadek wytrzymałości Drop of strength %	Ubytek masy Loss of mass %
	po 150 cyklach zamrażania after 150 freeze-thaw cycles	Świadki Standards		
CEM II	55,6	62,5	11,0	0,2
CEM II/20- 1	62,7	70,4	10,9	0,3
CEM II/20-2	57,8	65,3	11,5	0,4
CEM II/33-1	58,4	68,6	14,9	0,4
CEM II/33-2	53,8	66,9	19,6	0,1
CEM III	68,4	70,5	3,0	0,1
CEM III/20- 1	68,2	72,3	5,7	0,1
CEM III/20-2	63,0	66,8	5,7	0,3
CEM III/33-1	61,8	68,4	9,7	0,4
CEM III/33-2	51,4	67,3	23,6	0,4

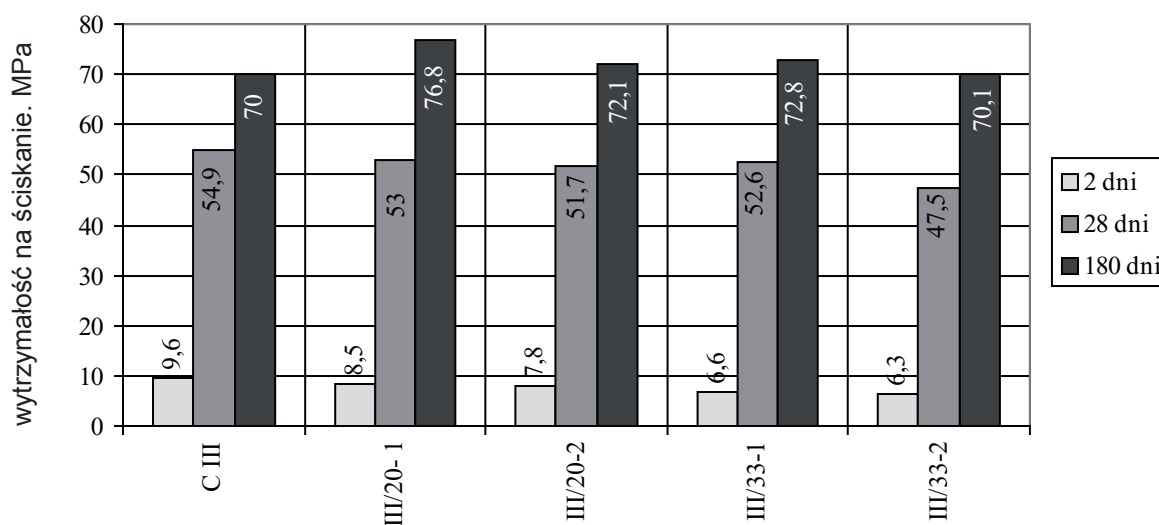


Rys. 2. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem

Fig. 2. Depth of water penetration under pressure

że betony z cementów żużlowych z równoczesnym dodatkiem popiołu lotnego mają mniejszą mrozoodporność w obecności soli odladzającej. Przy ocenie wpływu popiołu lotnego na właściwości betonu z cementów żużlowych (CEM II i CEM III), zwłaszcza przy ocenie ich trwałości, należy uwzględnić wpływ temperatury na proces twardnienia tych kompozytów. W niższych temperaturach proces twardnienia betonów zawierających popioły lotne wydłuża się; wolniejszy jest przyrost wytrzymałości betonu, zwłaszcza przy mniejszej zawartości cementu i większym dodatku popiołu lotnego. Także w niższych temperaturach wpływ aktywności pucolanowej popiołu na kształtowanie się mikrostruktury betonu jest znacznie mniejszy, co może zmniejszać jego trwałość zarówno w warunkach

causes the decrease of their water demand. It is shown in Table 4 in which the measured flow diameter of these mortars is larger. It brings about the possibility to assure the estimated consistency with lower water addition or lower amount of plasticizer. The consistency of tested mixtures with siliceous fly ash was stable during the time of test e.g. 45 minutes, retaining the slump on the level of 15-18cm. Air content in all mixtures not exceed 2% (Table 6) and slightly increased in mixtures with Portland slag cement and the with addition of fly ash. The properties of hardened concrete prove, that the addition of fly ash decreases early strength of concrete, after 2 days (Table 7). It results form the slow hydration of siliceous fly ash at low room temperature and its positive



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu z cementu hutniczego CEM III/A 32,5N-LH-HSR/NA z dodatkiem popiołu lotnego

Fig. 3. Compressive strength of concrete from slag cement CEM III/A 32.5N-LH-HSR/NA and with the addition of fly ash

korozji chemicznej, jak i przy ocenie jego odporności na mróz (18, 20).

5. Podsumowanie

Cementy z dodatkami mineralnymi, a zwłaszcza z dodatkiem granulowanego żużla wielkopieczowego (cement portlandzki żużłowy CEM II/A,B-S, cement hutniczy CEM III) są bardzo popularnymi spoiwami hydraulicznymi, znajdującym powszechne zastosowanie w wielu dziedzinach budownictwa. Przeprowadzone przez autorów badania potwierdziły doświadczenia innych krajów (8) dotyczących możliwości stosowania popiołu lotnego jako dodatku do betonu wykonywanego z cementu żużłowego CEM II/B-S 32,5R i cementu hutniczego CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA. Dobrej jakości krzemionkowy popiół lotny, spełniający wymagania normy PN-EN 450-1:2007 (5) dla kategorii A, wpływa korzystnie na właściwości reologiczne mieszanki betonowej, do których należy konsystencja i jej utrzymanie przez pewien czas. Beton z cementów żużłowych z dodatkiem popiołu lotnego osiąga wysoką wytrzymałość w okresie normowym (28 dni) i późniejszym (180 dni). Zwiększa się także odporność tego betonu na agresję chemiczną (9) co pozwala na stosowanie tych betonów w klasach ekspozycji od XA1 do XA3 wg PN-EN 206-1 (6).

Problemem wymagającym dalszych badań jest odporność betonów, z cementów żużłowych oraz z dodatkiem popiołu lotnego, na działanie niskich temperatur. W prowadzonych badaniach należy uwzględnić różne metody oceny odporności na mróz, a także trzeba sprawdzić wpływ napowietrzenia na kształtowanie się mrozoodporności tych betonów.

influence on concrete properties after longer hardening time. In practice, the activity of binders containing siliceous fly ash can be obtained by additional grinding, heat treatment, hydraulic and chemical activation (3).

Analyzed concretes with Portland slag cements and fly ash have compressive strengths after 28 days similar to that of concrete without fly ash addition. However, after longer hardening time e.g. 180 days, the strength of concretes containing Portland slag cements and fly ash is higher than concrete without fly ash addition. Especially high rate of strength growth shows concretes from Blastfurnace slag cement with the addition of fly ash e.g. CEM III/A 32.5N-LH-HSR/NA (Fig.3.).

All tested concretes, irrespectively of the cement type applied, had low water permeability. The depth of water penetration was under 40 mm (Fig. 3). The best results were achieved with the addition of 20 and 33% of fly ash to Portland slag cement CEM II/B-S 32.5R, with k factor equal 0.2 (Fig. 3, Table 5).

Examined concretes had also the low water absorbability. This property may be caused by the positive impact of the both additives, granulated blastfurnace slag and fly ash, on the microstructure of hardened concrete (1, 3, 19). The results of freeze-thaw resistance tests of concrete according to Polish standard grade F 150 had shown that concrete from Blastfurnace slag cement CEM III/A 32.5N-LH-HSR/NA with 33% of siliceous fly ash with $k=0.4$ (Table 8) did not fulfill the requirements of standard PN-B/88-06250 (14). Łagosz (9) has found, that concretes produced from Portland slag cements with the simultaneous addition of fly ash have lower freeze-thaw resistance in the presence of deicing agent. For the evaluation of the influence of fly ash on the properties of concretes from slag cements (CEM II, CEM III), especially those related to durability, it is necessary to take account of the temperature which affects the processes of hardening of those

Literatura / References

1. K. Lindon, A. Sear; 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.
4. PN-EN 197-1:2002 „Cement- Część1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”.
5. PN-EN 450-1:2007 „Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności”.
6. PN-EN 206-1:2003 „Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”.
7. PN-B-06265:2004 Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1 „Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”
8. CEN TC 104/SC1 (2006) Survey of national requirements used in construction with EN 206-1:2000.
9. A. Łagosz: Wpływ popiołu lotnego na trwałość betonu z cementami zużyłymi. Budownictwo Technologie Architektura, nr 1, 2008, s. 60-65.
10. Z. Giergiczny, T. Pużak: Properties of concrete with fluidal fly ash addition. Proceedings of the International Symposium „Non-Traditional Cement & Concrete III” organized by Brno University of Technology & ZPCV, a.s., Uhersky Ostroh, June 10-12, 2008, Brno, pp. 263-271.
11. PN – EN 12350-2 „Badania mieszanki betonowej – Badanie konsystencji metoda opadu stożka”.
12. PN-EN 12350- 7 „Badanie mieszanki betonowej – Badanie zawartości powietrza”.
13. PN-EN 12390-3 „Badania betonu. Wytrzymałość na ścislenie próbek do badania”.
14. PN-B/88 – 06250 „Beton zwykły”.
15. PN-EN 12390-8 „Badania betonu. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem”.
16. A. M. Neville A.M.: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000.
17. Z. Giergiczny, T. Pużak; Wpływ rodzaju popiołu lotnego na właściwości mieszanki betonowej. IX Sympozjum „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2007, s. 5-14.
18. J. Wawrzeńczyk: Wpływ dodatku popiołu lotnego na mrozoodporność betonu. Konferencja „Dni Betonu”, Polski Cement, 2002, s. 479-488.
19. Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Śliwiński, J. Szwabowski: Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji, Instytut Śląski, Opole, 2002.
20. M. Schneider, S. Puntke, H. M. Sylla, K. Lipus: The influence of cement on the sulphate resistance of mortar and concrete, Cement International, 2002, No. 1, pp. 130-148.

composites. In lower temperatures hardening of concretes is longer; the increase of strength is slower, especially in case of lower cement content and higher addition of fly ash. Furthermore, at lower temperature the influence of pozzolanic activity of fly ash on the concrete microstructure is considerably lower, which may cause lower durability, both in condition of chemical corrosion as well as of freezing-defreezing (18, 20).

5. Conclusions

Cements with mineral additions, especially the ones with the addition of granulated blastfurnace slag (Portland slag cement CEM II/A,B-S, blastfurnace slag cement CEM III) are very popular hydraulic binders, commonly used in building industry. Tests carried by authors confirmed the experience of other countries (8) concerning the use of fly ash as the additive for concrete made of Portland slag cement CEM II/B-S and Blastfurnace slag cement CEM III/A 32.5N-LH/HSR/NA. Siliceous fly ash of proper quality, fulfilling the requirements of the standard PN-EN 450-1:2007 for grade A, has a positive influence on the rheological properties of concrete mixture and especially on consistence, keeping its stable level during the whole measured period. Concrete from slag cements with fly ash addition has high strength after 28 days and after longer time e.g. 180 days, the resistance of concrete to chemical attack is also increased (9) which predestinate the use of these concretes in constructions exposed to classes from XA1 to XA3 according to PN-EN 206-1.

Resistance of concrete from slag cements with fly ash addition on the action of lower temperature is still an engineering problem requiring further studies. These studies should cover the various test methods of freeze-thaw resistance, as well as the examination of the influence of air content of concrete.