

ZBIGNIEW GIERGICZNY¹⁾KATARZYNA SYNOWIEC²⁾ALEKSANDRA ŻAK³⁾

SUITABILITY EVALUATION OF CALCAREOUS FLY ASH AS AN ACTIVE MINERAL ADDITIVE TO CONCRETE

OCENA PRZYDANOŚCI POPIOŁU LOTNEGO WAPIENNEGO JAKO AKTYWNEGO DODATKU MINERALNEGO DO BETONU

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono wyniki badań nad możliwością zastosowania popiołu lotnego wapiennego jako dodatku typu II w składzie betonu. Stwierdzono, że dostępne w kraju popioły lotne wapienne charakteryzują się małą mialkością (zbyt dużą ilością grubych ziaren) i dużą wodożądnością. Właściwości te stanowią główną przyczynę ich negatywnego wpływu na właściwości reologiczne mieszanki betonowej (wysokie w/c , szybka utrata konsystencji w czasie) oraz znacznego ograniczenia efektywności działania domieszek chemicznych (uplastyczniających, upłynniających i napowietrzających). Aktywacja mechaniczna (przemiał) zmniejsza wodożądność i zwiększa aktywność wapiennych popiołów lotnych. Stwardniały beton z dodatkiem wapiennego popiołu lotnego charakteryzuje się dużą szczelnością oraz wytrzymałością na ściskanie porównywalną z wytrzymałością betonu na cemencie portlandzkim CEM I. Odpowiednio napowietrzony beton z dodatkiem wapiennych popiołów lotnych charakteryzuje się odpowiednią mrozoodpornością.

SŁOWA KLUCZOWE: mieszanka betonowa, popiół lotny wapienny, stwardniały beton.

ABSTRACT. The article presents test results concerning the possibility of applying calcareous fly ash as a II type additive in concrete composition. It has been found that domestic calcareous fly ashes are characterized by not sufficient fineness (too many coarse particles) and by large water demand. These qualities constitute a main cause of calcareous fly ash negative influence on rheological properties of concrete mixture (high w/c ratio, rapid loss of consistency) and of a significant reduction of chemical admixtures performance (plasticizers, superplasticizers and air-entraining agents). Mechanical activation (grinding) reduces water demand and increases activation of calcareous fly ash. Hardened concrete with an addition of calcareous fly ash is distinguished by large tightness and the compressive strength comparable to the one of concrete produced on Portland cement CEM I. Properly air-entrained concrete with calcareous fly ash addition presents adequate frost resistance.

KEYWORDS: calcareous fly ash, concrete mixture, hardened concrete.

DOI: 10.7409/rabdim.013.007

¹⁾ Politechnika Śląska w Gliwicach, Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.; zbigniew.giergiczny@polsl.pl (✉)

²⁾ Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa; katarzyna.synowiec@polsl.pl

³⁾ Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa; aleksandra.zak@polsl.pl

1. WPROWADZENIE

Popioły lotne otrzymywane są poprzez elektrostatyczne lub mechaniczne osadzanie pylistych cząstek spalin z palenisk opalanych pyłem węglowym. W Polsce w produkcji betonu najczęściej stosuje się popioły lotne krzemionkowe powstające w wyniku spalania pyłu z węgla kamiennego w paleniskach elektrowni. Omawiane w artykule popioły lotne wapienne pochodzą ze spalania węgla brunatnego w Elektrowni Bełchatów. Ten rodzaj popiołu lotnego nie jest aktualnie stosowany jako dodatek typu II w produkcji betonu [1]. Zasady stosowania dodatków zawarte są w normie PN-EN 206-1.

W artykule przedstawiono wyniki badań nad efektami stosowania popiołu lotnego wapiennego jako dodatku typu II do betonu. Projektując skład mieszanki betonowej kierowano się zasadami zawartymi w normie PN-EN 206-1:2003. Popiół lotny wapienny uwzględniono w składzie betonu poprzez wprowadzenie współczynnika k o wielkości 0,4. Efektywną ilość cementu w recepturze betonu obliczono według zasady $c_{ef} = c + 0,4 \cdot p$, gdzie p jest to ilość popiołu wyrażona w kg. Zakresem badań objęto ocenę wpływu dodatku popiołu wapiennego zarówno na właściwości mieszanki betonowej, jak i na stwardniały beton.

2. WŁAŚCIWOŚCI POPIOŁU LOTNEGO WAPIENNEGO

2.1. SKŁAD CHEMICZNY

Popioły lotne krzemionkowe stosowane powszechnie w składzie betonu powinny spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 450-1. Zakres tych wymagań nie obejmuje popiołów lotnych, w których zawartość reaktywnego CaO przekracza 10%. Taki warunek wyklucza stosowanie dostępnych w kraju popiołów lotnych wapiennych w charakterze dodatku typu II w składzie betonu.

Ten rodzaj popiołu lotnego jest normalizowany w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie [2, 3]. W Stanach Zjednoczonych obowiązuje norma ASTM C618-12 „Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, natomiast w Kanadzie norma CAN/CSA-A23.5-98 „Cementitious Materials Compendium”. Pewien zakres prac normalizacyjnych w tym obszarze został także zrealizowany w Grecji [4 - 6]. W Tabelicy 1 zamieszczono klasyfikację i podstawowe wymagania wobec popiołów lotnych wapiennych, zawarte

1. INTRODUCTION

Fly ash is obtained by electrostatic or mechanical exhaust particles of silt deposition in pulverized coal-fired furnaces. The production of concrete in Poland tends to apply siliceous fly ash originating from a burning process of hard coal in power station furnaces. Calcareous fly ashes discussed in the paper were selected from the brown coal furnaces of Bełchatów Power Station. This type of fly ash is not used in concrete production as a type II additive [1]. The criteria of additives use are defined in the standard PN-EN 206-1 “Concrete – Part 1. Specification, performance, production and conformity”.

The paper presents test results concerning the effects of applying calcareous fly ash as a type II additive to concrete. Concrete mix was designed according to the requirements of the standard PN-EN 206-1. Calcareous fly ash was introduced in a concrete composition as a k factor size 0.4. The effective amount of cement in the concrete composition was calculated according to the principle $c_{ef} = c + 0.4 \cdot p$ (p – amount of fly ash in kg). The scope of the study covered assessment of the influence of calcareous fly ash addition on both, properties of concrete mixture and hardened concrete.

2. PROPERTIES OF CALCAREOUS FLY ASH

2.1. CHEMICAL COMPOSITION

Siliceous fly ash, a common constituent of concrete, ought to fulfil the requirements of PN-EN 450-1. The scope of these requirements does not include the fly ashes with reactive CaO exceeding 10%. Such condition excludes the application of domestic calcareous fly ashes as a type II addition to concrete.

This type of fly ash is standardized in the United States and Canada [2, 3]. The standard ASTM C618-12 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete” is obligatory in the United States, whereas in Canada – CAN/CSA-A23.5-98 “Cementitious Materials Compendium”. Some standardization works in this area were also carried out in Greece [4 - 6]. Table 1 shows the classification and basic requirements of calcareous fly ashes in the American and Canadian standards. The standards adopted in Greece are presented in Table 2 [4 - 6].

w normie amerykańskiej i kanadyjskiej. Dotychczasowe założenia normalizacyjne przyjęte w Grecji zostały przedstawione w Tablicy 2 [4 - 6].

Table 1. Classification of fly ashes as additives to concrete according to American ASTM and Canadian CAN/CSA standards

Tablica 1. Klasyfikacja popiołów lotnych stosowanych do betonu w ujęciu norm amerykańskiej ASTM i kanadyjskiej CAN-CSA

Property Właściwość		ASTM C618		CAN/CSA – A23.5-98		
		Class Klasa F	Class Klasa C	Class Klasa F	Class Klasa CI	Class Klasa CH
Total CaO content Całkowita zawartość CaO	[%]	< 10	> 10	< 8	8 - 20	> 20
Loss on ignition Strata prażenia	[%]	< 6		< 8	< 6	
Fineness (sieve residue 45 µm) Miałkość (pozostałość na sicie 45 µm)	[%]	< 34				
SO ₃ content Zawartość SO ₃	[%]	< 5				
Content of oxides sum Zawartość sumy tlenków (SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃)	[%]	> 70	> 50	–	–	–
Activity index after 7 and 28 days Wskaźnik aktywności po 7 i 28 dniach	[%]	> 75				
Volume stability in autoclave Stołość objętości w autoklawie	[%]	0.8				

Table 2. Requirements for chemical composition of calcareous fly ashes according to standard draft in Greece

Tablica 2. Wymagania odnośnie składu chemicznego popiołów lotnych wapiennych według projektu normy greckiej

Category Kategoria	Destination Przeznaczenie	Content / Zawartość SO ₃ [%]	Content / Zawartość CaO _{free/wolny} [%]
EIT 1	Low strength concretes Betony o niskiej wytrzymałości	≤ 7	no requirements brak wymagań
EIT 2	Ordinary and high strength concretes Betony zwykle i wysokiej wytrzymałości	≤ 5	≤ 3

Krajowe popioły lotne wapienne, będące przedmiotem badań, przeanalizowano w kontekście wymagań dotyczących składu chemicznego, zawartego w Tablicach 1 i 2. Zestawienie otrzymanych wyników przedstawiono w Tablicy 3. Przeprowadzona analiza składu chemicznego badanych popiołów wykazała, że najwięcej próbek (blisko 6%) nie spełniło wymagania odnośnie zawartości strat prażenia, które nie powinny przekraczać 6%. Podwyższoną zawartość SO₃, która zgodnie z normą ASTM C618 powinna wynosić mniej niż 5%, wykazały zaledwie 3 ze 121 przebadanych próbek.

Domestic calcareous fly ashes, the subject of present study, were subjected to the analysis concerning the requirements of chemical composition, as shown in Table 1 and 2. The list of obtained results is given in Table 3. The chemical composition analysis conducted for the tested fly ashes proved that the highest number of specimens (almost 6%) did not fulfil the requirement concerning loss on ignition that should not exceed 6%. Increased content of SO₃, which should reach not less than 5% according to ASTM C618, was demonstrated by only 3 out of 121 tested specimens.

Table 3. Chemical composition of analyzed calcium fly ashes compared to requirements of ASTM C618 standard
 Tablica 3. Skład chemiczny analizowanych popiołów wapiennych na tle wymagań normy ASTM C618

Property Właściwość	Requirements according to Wymagania według ASTM C618	Analyzed fly ashes complying with criteria Badane popioły spełniające kryterium [%]	Average value in analyzed fly ashes Wartość średnia w badanych popiołach [%]
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ [%]	> 50	99.2	65.87
CaO _{total/całkowity} [%]	> 10	100	24.14
SO ₃ [%]	< 5	97.5	2.74
Loss on ignition Strata prażenia [%]	< 6	94.2	3.67

2.2. MIAŁKOŚĆ I WODOŻĄDNOŚĆ

Miałkość i wodożądność są właściwościami o istotnym znaczeniu z uwagi na użyteczność popiołu lotnego jako składnika betonu. Miałkość popiołu, zgodnie z normą PN-EN 451-2, określana jest jako pozostałość na sicie 0,045 μm. Dodatek popiołu lotnego do składu betonu może zarówno zmniejszyć, jak i zwiększyć zapotrzebowanie na wodę zarobową w mieszance betonowej [1, 7]. Procedura określania wpływu popiołu lotnego na wodożądność podana jest w załączniku B normy PN-EN 450-1. Pożądanym efektem wprowadzenia popiołu lotnego do składu betonu jest obniżenie wodożądności, a tym samym możliwość obniżenia stosunku *w/c* w mieszance betonowej.

W prowadzonych badaniach stosowano zarówno popiół lotny nieuzdatniony (odebrany bezpośrednio spod elektrofiltra w elektrowni), jak i poddany procesowi aktywacji mechanicznej poprzez przemiał w laboratoryjnym młynie kulowym. Czas mielenia każdej partii wynosił około 20 minut. Popiół lotny wapienny nie poddaje się łatwo obróbce mechanicznej. Przemiał spowodował dwukrotne zwiększenie powierzchni właściwej oraz blisko czterokrotne obniżenie pozostałości na sicie 45 μm. Partie popiołów zmielonych zostały oznaczone dodatkową literą „m”. Wyniki badań miałkości i wodożądności popiołów nieuzdatnionych oraz po zmieleniu przedstawiono na Rys. 1. Widać na nim, że badane nieuzdatnione popioły lotne wapienne nie spełniają wymagań normy PN-EN 450-1 w zakresie miałkości. Norma ogranicza wartość maksymalną pozostałości na sicie 0,045 μm do 40% (kategoria N) i do 12% (kategoria S). Podobnie jest w przypadku normy ASTM, której wymóg na poziomie maksymalnym 34% pozostałości na sicie (0,045 μm) również nie jest spełniony.

2.2. FINENESS AND WATER DEMAND

Taking into consideration the usefulness of fly ash as a concrete component, both fineness and water demand are the properties of considerable significance. Fineness of fly ash, according to PN-EN 451-2, is defined as the residue of 0.045 μm on a sieve. The addition of fly ash to concrete composition may equally increase and decrease the demand for mixing water in concrete mixture [1, 7]. The procedure of determining the impact of fly ash on water demand is given in the Annex B of PN-EN 450-1. Lower water demand and therefore the reduction of water/cement ratio in concrete mixture is a desirable effect of the fly ash implementation into concrete composition.

The fly ash discussed in the study was: non activated (obtained directly from the power plant electric precipitator) and after the process of mechanical activation by grinding in a laboratory ball mill. Grinding time for each batch was about 20 minutes. Calcareous fly ash is not easy subjected to mechanical treatment. The grinding process resulted in twofold increase in surface area and nearly fourfold reduction of 45 μm sieve residue. The batches of ground fly ash were marked with the additional letter “m”. Fineness and water demand test results of non activated and ground fly ashes are presented in Fig. 1. The analysis of the data shows that tested non activated calcareous fly ashes do not meet the requirements of PN-EN 450-1 for fineness. The standard limits the maximum value of 0.045 μm sieve residue to 40% (N category) and to 12% (S category). Similarly, a requirement of maximum level of 34% of sieve residue (0.045 μm) is not met either.

The fineness of non activated fly ashes in the vast majority of specimens exceeds 40%. Only 5 out of 33 tested specimens were characterized by the fineness below this

Miałkość popiołów nieuzdatnionych w przypadku zdecydowanej większości próbek przekracza 40%. Jedynie 5 na 33 przebadanych próbek charakteryzowało się miałkością poniżej tej wartości. Tylko w przypadku jednej próbki oznaczenie wykazało wartość poniżej 34%, wymaganą przez normę ASTM C618. Po procesie przemiału, 32 z 33 badanych popiołów lotnych wapiennych spełniały wysokie wymagania normy ASTM C618 w zakresie miałkości (miałkość poniżej 34% – Rys. 1).

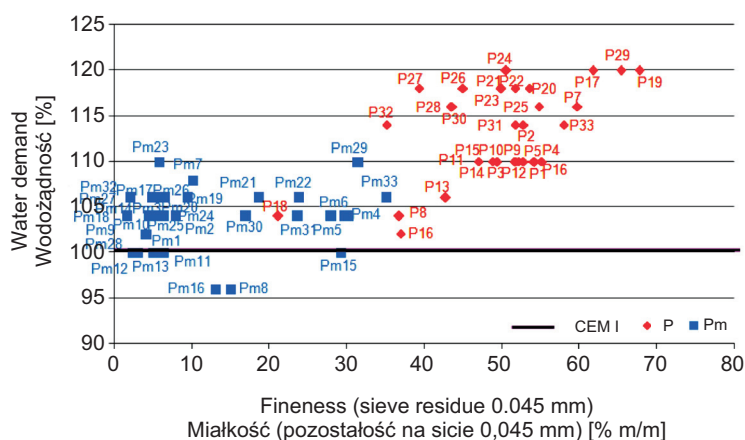
Fig. 1. Fineness and water demand of analyzed fly ashes (P – non activated fly ash, Pm – ground fly ash)
Rys. 1. Miałkość a wodożądność badanych popiołów lotnych (P – popiół w stanie nieuzdatnionym, Pm – popiół zmielony)

Norma ASTM C618 dopuszcza maksymalny wzrost wodożądności do 105% w przypadku cementu portlandzkiego CEM I. Nieuzdatnione popioły lotne wapienne stosowane w badaniach znacznie bardziej zwiększają wodożądność. W przypadku większości popiołów są to wartości z przedziału 110-120%, jedynie 3 próbki wykazały mniejsze zapotrzebowanie na wodę (Rys. 1). Proces mielenia skutkowało obniżeniem wodożądności, średnio do poziomu 104%, co spełnia wymagania normy amerykańskiej. Obniżenie wodożądności na skutek przemiału należy wiązać ze zmianą morfologii ziaren popiołu lotnego wapiennego (Rys. 2a i 2b). Ziarna nieuzdatnionego popiołu lotnego wapiennego (Rys. 2a) mają bardzo rozwiniętą powierzchnię z dużą ilością porów otwartych. Pomimo wzrostu powierzchni właściwej popiołu lotnego po procesie przemiału, obserwowano obniżenie wodożądności mieszanin cementowo-popiołowych. Jednakże znacząca ilość badanych popiołów charakteryzuje się wodożądnością powyżej 105% (Rys. 1). W przypadku dwóch popiołów lotnych (z 33 badanych) zaobserwowano obniżenie wodożądności w stosunku do cementu portlandzkiego CEM I (Rys. 1). Nie bez znaczenia jest także wzrost aktywności popiołu po procesie przemiału, co zostało omówione w dalszej części artykułu.

2.3. WSKAŹNIK AKTYWNOŚCI

Wskaźnik aktywności popiołu lotnego jest wyrażonym w procentach stosunkiem wytrzymałości na ściskanie stwardniałej zaprawy wykonanej z użyciem spoiwa składającego się w 75% z cementu portlandzkiego CEM I oraz w 25% z badanego popiołu lotnego wapiennego do wytrzymałości na ściskanie stwardniałej zaprawy wykonanej w 100% z cementu portlandzkiego CEM I. Oblicza się go według wzoru (1):

value. Only one specimen showed the value under 34%, as required by the standard ASTM C618. After the grinding process, 32 out of 33 tested calcareous fly ashes met the strict requirements of ASTM C618 for fineness (fineness under 34%; Fig. 1).



The standard ASTM C618 allows the maximum increase of water demand to 105% in case of Portland cement CEM I. Non activated calcareous fly ashes used in the study increase considerably water demand. Most fly ashes fall into the range of 110-120%, only 3 specimens showed lower water demand (Fig. 1). Grinding process resulted in a decrease of water demand, on average reaching a level of 104%, which complies with the requirements of American standard. The reduction of water demand by grinding ought to be associated with a change of morphology of calcareous fly ash particles (Fig. 2a and 2b). Non activated calcareous fly ash particles (Fig. 2a) have highly developed surface with a lot of open pores. Despite the fact that the grinding process increases the proper surface area of fly ash, the decrease of cement/fly ash mixtures water demand was also observed. However, the significant number of analyzed fly ashes was characterized by over 105% of water demand (Fig. 1). The decrease of water demand in comparison to Portland cement CEM I was noted in case of two fly ashes (out of 33 tested). Not without significance is also the fact that fly ash activity increases after grinding, which is discussed later in the paper.

2.3. ACTIVITY INDEX

Fly ash activity index is expressed in percentage, as a correlation of compressive strength of hardened mortar made on binder, consisting of 75% of Portland cement CEM I

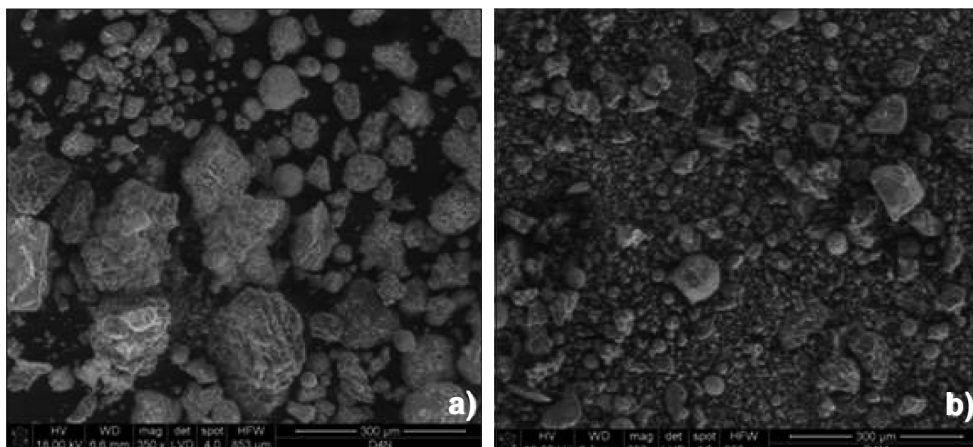


Fig. 2. SEM images of grains structure of non activated (a) and ground (b) fly ash
Rys. 2. Obrazy mikroskopowe SEM struktury ziaren popiołów lotnych nieuzdatnionych (a) i po zmieleniu (b)

$$W_{ap} = \frac{R_{cpop}}{R_c} \cdot 100\% , \quad (1)$$

gdzie:

R_{cpop} – wytrzymałość na ściskanie beleczek z zaprawy na spoiwie cementowo-popiołowym,

R_c – wytrzymałość na ściskanie beleczek z zaprawy normowej na cemencie portlandzkim.

Według normy PN-EN 450-1, wskaźnik aktywności popiołów lotnych powinien być wyższy niż 75% po 28 dniach i 85% po 90 dniach dojrzewania. W przypadku normy ASTM C618 wymagania są zbliżone, aczkolwiek odnoszą się do krótszych terminów badania, a mianowicie wskaźnik aktywności powinien przekraczać 75% po 7 i 28 dniach dojrzewania.

Wyniki przeprowadzonych oznaczeń wskaźnika aktywności badanych popiołów lotnych wapiennych przedstawiono na Rys. 3 - 5. Nieuzdatnione popioły lotne w większości spełniają wymagania normy PN-EN 450-1 zarówno po 28 (Rys. 4), jak i po 90 dniach dojrzewania (Rys. 5). Wymagania normy ASTM, choć nie wydają się być ostrzejsze, nie zostały spełnione w przypadku znacznej liczby próbek zawierających nieuzdatniony popiół lotny po 7 dniach dojrzewania (Rys. 3). Niską aktywność w początkowym okresie twardnienia spoiw mieszanych cementowo-popiołowych należy w dużym stopniu wiązać z miałością (zbyt duża ilość ziaren o wymiarach powyżej 0,045 mm). W przypadku popiołów aktywowanych mechanicznie (zmielonych), wymaganie 75% aktywności po 7 dniach zostało spełnione przez wszystkie badane próbki (Rys. 3).

and 25% of analyzed calcareous fly ash, with the compressive strength of mortar made with 100% of Portland cement CEM I. It is calculated according to the following formula (1):

$$W_{ap} = \frac{R_{cpop}}{R_c} \cdot 100\% , \quad (1)$$

where:

R_{cpop} – compressive strength of mortar beams on cement/fly ash binder,

R_c – compressive strength of standard mortar beams on Portland cement.

According to PN-EN 450-1, the fly ash activity index should be higher than 75% after 28 days and higher than 85% after 90 days of curing. ASTM C618 requirements are similar, although they refer to shorter test periods, i.e. the activity index should exceed 75% after 7 and 28 days of curing.

The test results determining the activity index of calcareous fly ashes are presented in Fig. 3 - 5. Non activated fly ashes fulfil in the majority the requirements of PN-EN 450-1, both after 28 (Fig. 4) and 90 days of curing (Fig. 5). Although the requirements of ASTM does not seem to be more strict, they were not met by the majority of specimens containing non activated fly ash after 7 days of curing (Fig. 3). Low activity in the initial setting time of cement/fly ash blended binders should be largely attributed to inadequate fineness (too many particles of over 0.045 mm size). Taking the mechanically activated (ground) fly ashes into account, it has to be stated that all the tested specimens met the requirement of 75% of activity after 7 days of curing (Fig. 3).

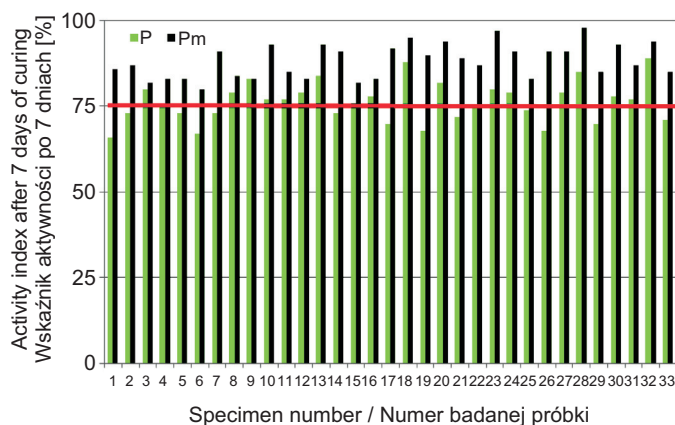


Fig. 3. Activity index of fly ashes after 7 days of curing (P – non activated fly ash, Pm – ground fly ash)
Rys. 3. Wskaźnik aktywności popiołów lotnych po 7 dniach dojrzewania (P – popiół w stanie nieuzdatnionym, Pm – popiół zmieszany)

Po 28 dniach dojrzewania wymóg został spełniony w przypadku prawie wszystkich stosowanych w badaniach popiołów nieuzdatnionych (tylko 3 próbki nie osiągnęły wskaźnika aktywności na wymaganym poziomie 75%). Ponadto wskaźnik aktywności zapraw zawierających popiół lotny zmieszany w przypadku większości popiołów przekroczył 100% (Rys. 4), co jest pozytywnym efektem aktywacji mechanicznej popiołu lotnego. Analizowane popioły w większości przypadków spełniły wymaganie mówiące o 85% wartości wskaźnika aktywności po 90 dniach (Rys. 5). Tylko 6 popiołów nieuzdatnionych nie przekroczyło tej granicy.

3. WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW Z DODATKIEM POPIOŁU LOTNEGO WAPIENNEGO

3.1. CHARAKTERYSTYKA SKŁADNIKÓW I SKŁAD MIESZANKI BETONOWEJ

W prowadzonych badaniach oceniono wpływ dodatku popiołu lotnego wapiennego na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu. Badania wykonano na dwóch partiach popiołu lotnego: nieuzdatnionego, oznaczonego symbolami 1 i 2 oraz po aktywacji mechanicznej, oznaczonego symbolami 1M i 2M.

W Tabelicy 4 przedstawiono skład chemiczny stosowanych w badaniach popiołów lotnych, natomiast w Tabelicy 5 zawarto właściwości fizyczne. Tablica 6 obrazuje właściwości stosowanego w badaniach cementu portlandzkiego CEM I 42,5R.

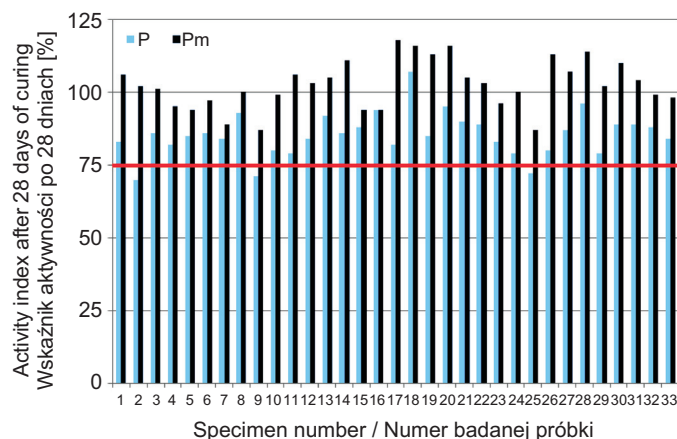


Fig. 4. Activity index of fly ashes after 28 days of curing (P – non activated fly ash, Pm – ground fly ash)
Rys. 4. Wskaźnik aktywności popiołów lotnych po 28 dniach dojrzewania (P – popiół w stanie nieuzdatnionym, Pm – popiół zmieszany)

After 28 days of curing the requirement was fulfilled for almost all the activated fly ashes applied in the study (only 3 specimens did not reach the desired 75% of activity index). Furthermore, the activity index of nearly all the mortars containing ground fly ash exceeded 100% (Fig. 4). It may be considered as a positive effect of mechanical activation of fly ash. Moreover, the majority of analyzed fly ashes fulfilled the desired 85% of activity index after 90 days (Fig. 5). Only 6 non activated fly ashes did not exceed this limit.

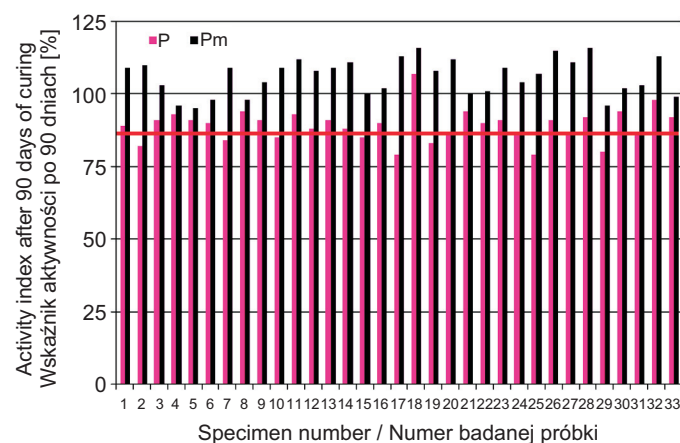


Fig. 5. Activity index of fly ashes after 90 days of curing (P – non activated fly ash, Pm – ground fly ash)
Rys. 5. Wskaźnik aktywności popiołów lotnych po 90 dniach dojrzewania (P – popiół w stanie nieuzdatnionym, Pm – popiół zmieszany)

Table 4. Chemical composition of fly ashes used in tests
 Tablica 4. Skład chemiczny popiołów lotnych stosowanych w badaniach

Designation Oznaczenie	Component content / Zawartość składnika [%]									
	Loss on ignition Strata prażenia	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO _{free/wolny}	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
1 / 1M	2.56	33.5	19.2	5.4	2.9	31.2	1.8	4.3	0.1	0.3
2 / 2M	1.83	40.2	24.0	5.9	1.5	22.4	1.3	2.5	0.2	0.2

Table 5. Physical properties of fly ashes used in tests
 Tablica 5. Właściwości fizyczne popiołów lotnych stosowanych w badaniach

Designation Oznaczenie	Fineness (sieve residue 45 µm) Miałkość (pozostałość na sicie 45 µm) [%]	Water demand Wodożądność [%]	Activity index / Wskaźnik aktywności [%]	
			7 days / dni	28 days / dni
1	38.0	108	87.2	99.8
1M	10.5	100	87.2	101.4
2	55.6	110	72.7	82.6
2M	20.0	104	81.8	101.0

Table 6. Properties of ordinary Portland cement CEM I 42.5 R
 Tablica 6. Właściwości cementu portlandzkiego CEM I 42,5 R

Properties of cement CEM I 42.5 R / Właściwości cementu CEM I 42,5 R	Value / Wielkość	
Water demand / Wodożądność	[%]	26.6
Initial setting time / Początek czasu wiązania	[min]	192
Soundness change, Le Chatelier method / Zmiana objętości, metoda Le Chateliera	[mm]	0.4
Compressive strength after 2 days / Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach	[MPa]	25.9
Compressive strength after 28 days / Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	[MPa]	51.9

Jako kruszywo stosowano piasek o uziarnieniu 0-2 mm oraz kruszywo żwirowe frakcji 2-8 mm i 8-16 mm. Krzywą uziarnienia przedstawiono na Rys. 6. Popiół lotny wapienny był dodawany do składu betonu w ilości 20 % i 33 % w stosunku do masy cementu. W celu zapewnienia założonej konsystencji, do składu mieszanek betonowych wprowadzono domieszkę chemiczną upłynniającą (superplastyfikator).

Pierwszą serię betonów zaprojektowano przy zawartości cementu w składzie betonu wynoszącej 350 kg/m³ oraz przyjęto stosunek $w/c = 0,45$. Takie założenia wynikają z minimalnych wymagań wobec klasy ekspozycji XF4 (agresywne oddziaływanie zamrażania/rozmarzania w obecności środków odladzających). Równoważną ilość cementu w każdej z projektowanych mieszanek obliczono, przyjmując wartość współczynnika k równą 0,4 (Tabl. 7 i 8 – cement efektywny $c_{ef} = c + 0,4 \cdot x \cdot p$). Drugą serię

3. PROPERTIES OF CONCRETE WITH ADDITION OF CALCAREOUS FLY ASH

3.1. COMPONENTS' CHARACTERISTICS AND THE COMPOSITION OF CONCRETE MIXTURE

The present investigation aim is assessing the influence of calcareous fly ash addition on the properties of fresh and hardened concrete. The study was conducted basing on two batches of non activated fly ash and designated with symbols 1 and 2, and after mechanical activation with symbols 1M and 2M. The chemical composition of fly ashes used in the study is given in Table 4, whereas Table 5 presents their physical properties. The properties of Portland cement CEM I 42.5R applied in the tests are shown in Table 6.

betonów zaprojektowano przy zawartości cementu 320 kg/m^3 i stosunku $w/c_{ef} = 0,6$. Ten rodzaj betonu byłby stosowany w klasach ekspozycji związanych z karbonatyzacją XC1–XC3 (bardzo duża ilość prac budowlanych). Receptury zaprojektowanych mieszanek przedstawiono w Tablicach 7 i 8.

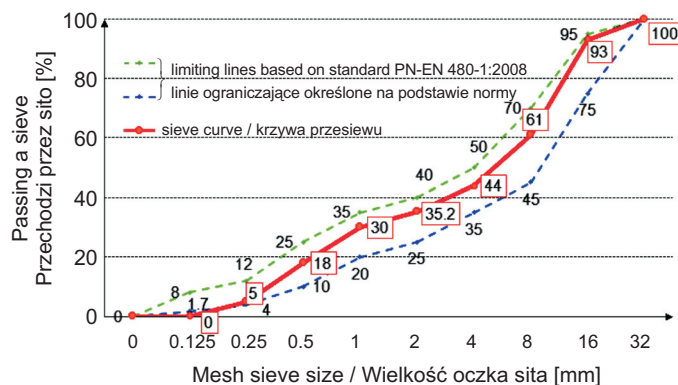


Fig. 6. Sieve curve of used aggregate

Rys. 6. Krzywa przesiewu stosowanego kruszywa

Aggregates used during the tests were: sand with grain size 0-2 mm and gravel aggregate of fraction 2-8 mm and 8-16 mm. Size distribution curve is presented in Fig. 6. Calcareous fly ash was added to concrete composition in the amount of 20% and 33% in relation to cement mass. In order to provide consistency, the superplasticizing chemical admixture was implemented to concrete mixture compositions.

The first series of concrete was designed with 350 kg/m^3 of cement in concrete mixture and with water/cement ratio $w/c = 0.45$. Such assumptions were made due to the minimal requirements for XF4 exposure class (aggressive effects of freezing/thawing with de-icing agents). The equivalent amount of cement in each designed mixture was calculated by assuming k coefficient at 0.4 (Table 7, 8 – effective cement $c_{ef} = c + 0.4 \cdot x \cdot p$). The second series of concretes was designed with 320 kg/m^3 of cement and $w/c_{ef} = 0.6$. Such concrete type would be applied in exposure classes involving carbonation XC1–XC3 (a large number of construction works). The compositions of designed concrete mixtures are presented in Table 7 and 8.

Table 7. Compositions of concrete mixtures, water-cement ratio $w/c_{ef} = 0.45$

Tablica 7. Receptury mieszanek betonowych o współczynniku wodno-cementowym $w/c_{ef} = 0,45$

Designation Oznaczenie	Fly ash Popiół lotny	Water-cement ratio Współczynnik wodno-cementowy w/c_{ef}	CEM I 42.5 R	Calcareous fly ash Popiół lotny wapienny	Efficient cement Cement efektywny	Water Woda	Sand Piasek 0-2 mm	Gravel Żwir 2-8 mm	Gravel Żwir 8-16 mm	Superplasticizer Superplastyfikator
	[%]									
CEM I	0	0.45	350	–	350	158	675	510	695	–
1-20%	20		325	65	351	158	660	495	680	0.38
1-33%	33		310	102	351	158	650	490	670	0.60
1M-20%	20		325	65	351	158	660	495	680	0.46
1M-33%	33		310	102	351	158	650	490	670	0.54
2-20%	20		325	65	351	158	660	495	680	0.57
2-33%	33		310	102	351	158	650	490	670	0.80
2M-20%	20		325	65	351	158	660	495	680	0.46
2M-33%	33		310	102	351	158	650	490	670	0.68

Remark / Uwaga

Designation: 1, 2 – fly ash batch; sign M – ground fly ash; 20%, 33% – fly ash dosage relative to quantity of used cement

Oznaczenie: 1, 2 – partia popiołu; symbol M – popiół zmielony; 20%, 33% – dozowanie popiołu w stosunku do zastosowanej ilości cementu

Table 8. Compositions of concrete mixtures, water-cement ratio $w/c_{ef} = 0.60$ Tablica 8. Receptury mieszanek betonowych o współczynniku wodno-cementowym $w/c_{ef} = 0,60$

Designation Oznaczenie	Fly ash Popiół lotny	Water-cement ratio Współczynnik wodno-cementowy w/c_{ef}	CEM I 42.5 R	Calcareous fly ash Popiół lotny wapienny	Efficient cement Cement efektywny	Water Woda	Sand Piasek 0-2 mm	Gravel Żwir 2-8 mm	Gravel Żwir 8-16 mm
	[%]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
CEM I	0	0.60	300	–	300	180	670	505	690
1-20%	20		278	56	300	180	655	495	575
1-33%	33		266	87	300	188	650	490	670
1M-20%	20		278	56	300	180	655	495	575
1M-33%	33		266	87	300	188	650	490	670
2-20%	20		278	56	300	180	655	495	575
2-33%	33		266	87	300	188	650	490	670
2M-20%	20		278	56	300	180	655	495	575
2M-33%	33		266	87	300	188	650	490	670
2M-33%	33		310	102	351	158	650	490	670

Remark / Uwaga

Designation: 1, 2 – fly ash batch; sign M – ground fly ash; 20%, 33% – fly ash dosage relative to quantity of used cement

Oznaczenie: 1, 2 – partia popiołu; symbol M – popiół zmielony; 20%, 33% – dozowanie popiołu w stosunku do zastosowanej ilości cementu

3.2. WŁAŚCIWOŚCI MIESZANKI BETONOWEJ I STWARDNIAŁEGO BETONU

Konsystencja mieszanek betonowych badana była metodą opadu stożka zgodnie z normą PN-EN 12350-2 w czasie do 90 minut, z częstotliwością pomiaru co 30 minut. Dodatkowo wykonano pomiar konsystencji po 15 minutach. Wyniki przeprowadzonych oznaczeń przedstawiono na Rys. 7. Na etapie doświadczalnego projektowania betonów założono klasę konsystencji S3 (opad stożka w granicach 100-150 mm), aczkolwiek już w trakcie formowania mieszanek betonowe były trudno urabialne. Po upływie założonego czasu badania (90 minut) mieszanek nie wykazywały oznak plastyczności. Zauważone tendencje wykazywały obie partie popiołu, zarówno nieuzdatnionego, jak i poddanego przemiałowi. Uznano zatem, że zastosowany superplastyfikator nie zadziałał w sposób dostatecznie efektywny.

W związku z tym, postanowiono zmienić założoną wyjściową klasę konsystencji z S3 na S4 (opad stożka 160-210 mm). Wprowadzono także dodatkową domieszkę uplastyczniającą (plastyfikator BVT) w ilości 0,88% masy spoiwa. Modyfikację składu wprowadzono tylko w przypadku

3.2. PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURE AND HARDENED CONCRETE

The consistency of concrete mixtures was measured by slump according to PN-EN 12350-2 in time reaching 90 minutes, measured every 30 minutes. Furthermore, the consistency was measured after 15 minutes. The results of conducted measurements are presented in Fig. 7. At the experimental stage of concrete design, the consistency class was assumed at S3 (slump within the range of 100-150 mm), although the concrete mixtures were already hardly workable during the forming stage. Once the intended test time passed (90 min), the mixtures did not show any signs of workability. Observed trends were performed by two batches of fly ash, both in non activated and ground state. Therefore, it has been stated that the applied superplasticizer did not work effectively enough.

As a result, the intended initial consistency class was changed from S3 to S4 (slump 160-210 mm). Moreover, the additional plasticizer was implemented (plasticizer BVT) in the amount of 0.88% of binder mass. The composition was modified only in reference to mixtures with the addition of 33% of calcareous fly ash from the second

mieszanek z 33% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego z drugiej partii. Efekty dokonanej modyfikacji składu przedstawiono na Rys. 8. Wprowadzenie dodatkowej domieszki uplastyczniającej przyniosło pożądany efekt. Po upływie 90 minut mieszanki betonowe o zmodyfikowanym składzie były urabialne, a wyniki pomiaru konsystencji pozwalały na oznaczenie klasy konsystencji S3. Oznaczenie wytrzymałości betonu na ściskanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-3. Otrzymane wyniki przedstawiono w formie wykresów na Rys. 9 - 10.

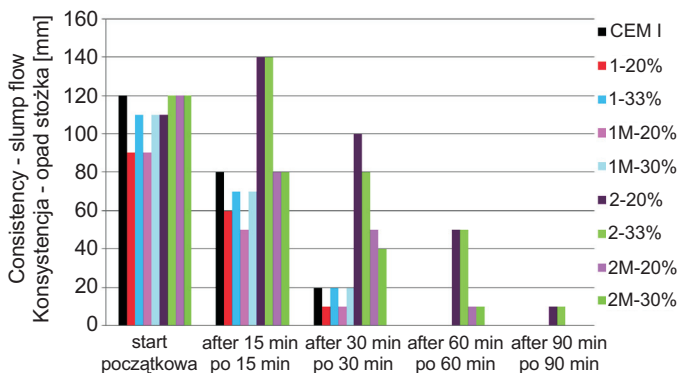


Fig. 7. Variation of consistency in time of mixtures, $w/c_{ef} = 0.45$
Rys. 7. Zmiana konsystencji w czasie mieszanek o $w/c_{ef} = 0,45$

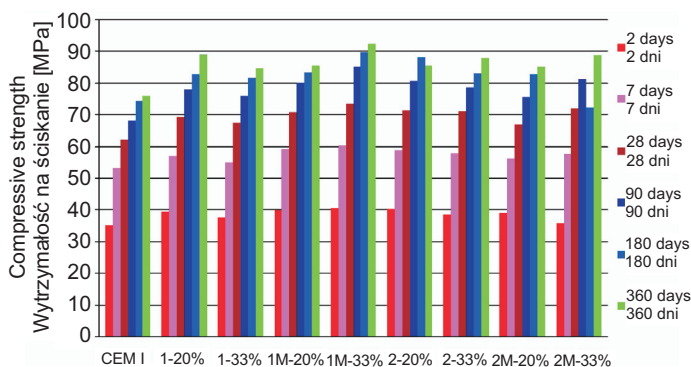


Fig. 9. Compressive strength of concretes with calcareous fly ash addition, $w/c_{ef} = 0.45$

Rys. 9. Wytrzymałość na ściskanie betonów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego, $w/c_{ef} = 0,45$

Zastosowanie popiołu lotnego wapiennego jako składnika mieszanki betonowej wpłynęło korzystnie na poziom wytrzymałości betonu na ściskanie. Zarówno w przypadku nieuzdatnionych popiołów lotnych, jak i popiołów zmielonych, w każdym terminie badania odnotowano wyższe wytrzymałości w porównaniu do wytrzymałości

batch. The effects of composition changes are presented in Fig. 8. The implementation of additional plasticizer brought the desired effect. Concrete mixtures with corrected compositions were workable after 90 days and the consistency measurements allowed determining the consistency class as S3. Determination of concrete compressive strength was conducted in compliance with the standard PN-EN 12390-3. The obtained test results are presented in Figure 9 - 10.

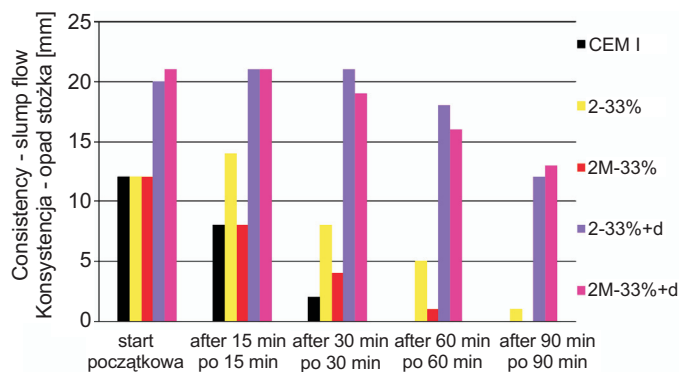


Fig. 8. Variation of consistency in time of mixtures with fly ash from batch no. 2 (d – with BVT admixture)
Rys. 8. Zmiana konsystencji w czasie mieszanek z popiołem partii 2 (d – z domieszką BVT)

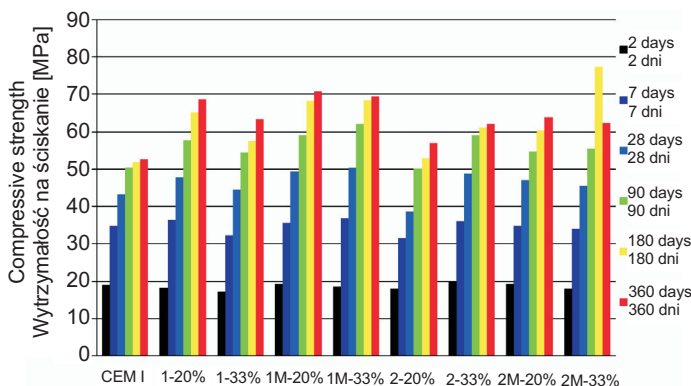


Fig. 10. Compressive strength of concretes with calcareous fly ash addition, $w/c_{ef} = 0.60$

Rys. 10. Wytrzymałość na ściskanie betonów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego, $w/c_{ef} = 0,60$

The use of calcareous fly ash as an additive to concrete mixture influenced positively the level of concrete compressive strength. Higher strengths were observed in each study period in comparison to the strength of concrete without the fly ash addition (made with Portland cement CEM I) for both non activated and ground fly

betonu bez dodatku popiołu (na cemencie portlandzkim CEM I). Zależność jest widoczna w przypadku obu stosunków w/c_{ef} , przy czym betony o niższym stosunku wodno-spoiwowym charakteryzują się wyższymi wzrostami wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu na cemencie portlandzkim CEM I (Rys. 10).

Wytrzymałość na ściskanie, choć uznawana jest za jedną z najważniejszych właściwości betonu, nie może być jedynym kryterium oceny jego jakości. Z uwagi na warunki pracy konstrukcji narażonej na różnorakie oddziaływania środowisk agresywnych równie istotna jest trwałość betonu [1, 7]. Jedną z podstawowych właściwości umożliwiających ocenę i przewidywanie potencjalnej trwałości betonu jest przepuszczalność wody (wodoszczelność). Oznaczenie wodoszczelności wykonano zgodnie z metodyką zawartą w normie PN-EN 12390-8 odnośnie betonu po 28 i 90 dniach twardnienia. Wyniki zamieszczono w Tablicy 9. Natomiast w Tablicy 10 pokazano wyniki badania nasiąkliwości betonu, oznaczonej według procedury z normy PN-88/B-06250. Wszystkie przebadane betony charakteryzowały się głębokością penetracji wody mniejszą niż 30 mm, co zgodnie z normą PN-EN 13877-2 (dopuszczającą głębokość wnikania wody do 30 mm w głąb betonu), pozwala sklasyfikować badane betony jako szczelne. W przypadku nasiąkliwości, wszystkie wyniki przekroczyły poziom 5%. W przypadku betonów o w/c_{ef} równym 0,45 średnia nasiąkliwość betonu wynosi 5,5% i nieznacznie przewyższa nasiąkliwość betonu na cemencie portlandzkim CEM I 42,5 R. Betony o podwyższonej zawartości wody ($w/c_{ef} = 0,6$) charakteryzują się nasiąkliwością na poziomie 6,7%, tj. wyższą niż betony bez dodatku popiołu (na cemencie portlandzkim CEM I).

ash. The relation is noticeable for both w/c_{ef} ratios, whereas concretes with lower water/binder ratio are characterized by higher compressive strength gains when comparing to concrete made with Portland cement CEM I (Fig. 10).

Compressive strength, though considered as one of the most important properties of concrete, cannot be treated as a sole criterion of its quality. Due to the construction work, subjected to various aggressive environmental factors, the durability of concrete is equally essential [1, 7]. One of the fundamental properties which enables to assess and predict the potential durability of concrete is permeability to water. Determination of permeability was conducted according to the methodology of PN-EN 12390-8 for concrete after 28 and 90 days of curing. The results are given in Table 9, while Table 10 describes the results of concrete water absorption test measured with accordance to PN-88/B-06250. All tested concretes performed water penetration depth of less than 30 mm, which in accordance with PN-EN 13877-2 (admitting the depth of water penetration up to 30 mm into the concrete) allows to classify analyzed concretes as permeable. Considering the water absorption, all the results exceeded the level of 5%. For concretes of $w/c_{ef} = 0.45$, the average water absorption of concrete equals 5.5% and is slightly higher than the water absorption of concrete made with Portland cement CEM I 42.5 R. Concretes with higher water content ($w/c_{ef} = 0.6$) are characterized by the water absorption of 6.7%, i.e. higher than for concretes without the addition of fly ash (with Portland cement CEM I).

Table 9. Depth of penetration of water under pressure of tested concretes
Tablica 9. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem badanych betonów

Designation Oznaczenie	Penetration depth / Głębokość penetracji [mm]			
	after 28 days / po 28 dniach	after 90 days / po 90 dniach	after 28 days / po 28 dniach	after 90 days / po 90 dniach
	$w/c_{ef} = 0.45$		$w/c_{ef} = 0.60$	
CEM I	9	9	14	28
1-20%	23	13	6	–
1M-20%	7	22	10	19
1-33%	4	3	24	16
1M-33%	14	10	20	4
2-20%	14	12	14	13
2M-20%	24	18	22	20
2-33%	17	19	23	11
2M-33%	22	21	26	13

Table 10. Water absorption of tested concretes
 Tablica 10. Nasiąkliwość badanych betonów

Designation Oznaczenie	Water absorption / Nasiąkliwość [% (m/m)]			
	after 28 days / po 28 dniach		after 90 days / po 90 dniach	
	$w/c_{ef} = 0.45$		$w/c_{ef} = 0.60$	
CEM I	5.4	5.3	6.6	6.4
1-20%	5.6	5.6	6.5	6.2
1M-20%	5.3	5.2	6.7	6.7
1-33%	5.3	5.5	7.2	6.8
1M-33%	5.5	5.2	6.7	6.5
2-20%	5.5	5.4	6.8	6.6
2M-20%	5.5	5.4	6.7	6.4
2-33%	5.4	5.3	6.5	6.4
2M-33%	5.7	5.6	6.7	6.8

Właściwością istotną w warunkach klimatycznych Polski jest mrozoodporność betonu. Badanie mrozoodporności betonu przeprowadzono metodą zwykłą według normy PN-88/B-06250 w stosunku do założonego stopnia mrozoodporności F150. Procedurę badawczą rozpoczynano po 2 terminach dojrzewania betonu, tj. po 28 i 90 dniach. Badania prowadzono na betonach zwykłych i napowietrzonych (oznaczenie symbolem „N”), zawierających 5,5% lub 6,0% powietrza, odpowiednio w przypadku popiołów pierwszej i drugiej partii. Wyniki przeprowadzonych badań mrozoodporności przedstawiono na Rys. 11. Wprowadzenie popiołu lotnego wapiennego do betonu spowodowało obniżenie odporności na działanie mrozu. W przypadku popiołu nieuzdatnionego, po badaniu mrozoodporności spadek wytrzymałości próbek dojrzewających 28 dni był na poziomie 25% ($w/c_{ef} = 0,45$), przy czym dla jednej z serii próbek spadek wyniósł blisko 60%, a betony dwóch serii uległy rozpadowi w trakcie badania ($w/c_{ef} = 0,60$).

Dodatek do betonu popiołu lotnego wapiennego zmielnego nie wpłynął istotnie na zmianę wyników badań mrozoodporności. Odnotowano również znaczny spadek wytrzymałości w porównaniu do próbek referencyjnych, aczkolwiek wynosił on średnio 15% w przypadku betonów o stosunku $w/c_{ef} = 0,45$ i blisko 50% w przypadku betonów o stosunku $w/c_{ef} = 0,6$. Po 90 dniach dojrzewania spadki wytrzymałości na ściskanie po badaniu mrozoodporności były mniejsze, ale zaobserwowane tendencje utrzymały się.

Frost resistance of concrete is one of the most important properties in Polish climate conditions. Frost resistance tests were conducted according to PN-88/B-06250 for assumed frost resistance degree F150. Testing procedure was launched after 2 concrete curing durations – 28 and 90 days of curing. Tests were performed on plain concretes and air-entrained concretes (designation “N”), containing 5.5% or 6.0% air for the first or the second ash delivery, respectively. The results of carried tests are presented in Fig. 11. The implementation of calcareous fly ash to concrete resulted in decreased resistance to frost action. Considering non activated fly ash, the drop of resistance after frost resistance tests reached 25% ($w/c_{ef} = 0.45$) in case of specimens which were curing during 28 days, whereas for one of the specimen series the drop reached the level of almost 60%, and concretes from two series fell apart during this test ($w/c_{ef} = 0.60$).

The addition of calcareous fly ash to concrete did not affect frost resistance test results significantly. Moreover, considerable drop of strength in comparison to reference specimens was observed, while it reached the level of average 15% for concretes with $w/c_{ef} = 0.45$ and almost 50% for concretes with $w/c_{ef} = 0.6$. After frost resistance test and 90 days of curing compressive strength reductions were lower, although the observed trends remained.

Frost resistance of concrete was appreciably improved by air-entrainment of concrete mixtures. In none of the aerated concretes the strength drop after 28 days did not exceed 10% (the majority of results fluctuated around 5%).

Istotną poprawę mrozoodporności betonów uzyskano poprzez napowietrzenie mieszanek betonowych. W żadnym z napowietrzonych betonów spadek wytrzymałości po 28 dniach nie był większy niż 10% (większość wyników oscylowała wokół 5%). W terminie późniejszym (po 90 dniach dojrzewania), obserwuje się jednak większe spadki wytrzymałości, aczkolwiek mieszczące się w dopuszczalnym zakresie wymagań normowych dla betonu mrozoodpornego.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania nad oceną zastosowania krajowych popiołów lotnych wapiennych, pochodzących z Elektrowni Bełchatów, jako dodatku do betonu wykazały że:

- ten rodzaj nieuzdatnionego popiołu lotnego posiada zbyt wysoką pozostałość na sicie (0,045 mm), znacznie przekraczająca wymagania zawarte zarówno w normie PN-EN 450-1, jak i w normie amerykańskiej ASTM C618-12, co skutkuje znacznie podwyższoną wodożądnością mieszanki betonowej, trudnością utrzymania konsystencji mieszanki betonowej w dłuższym czasie i bardzo niską efektywnością działania domieszek chemicznych,
- popioły lotne wapienne charakteryzują się dużą zmiennością składu chemicznego i właściwości fizycznych, co znacznie utrudnia obiektywną ocenę ich wpływu na właściwości zarówno mieszanki betonowej, jak i stwardniałego betonu,
- redukcję negatywnego wpływu właściwości popiołu lotnego wapiennego na właściwości mieszanki betonowej można uzyskać poprzez aktywację mechaniczną (przemiał) popiołu; jest to jednak dodatkowy koszt, co znacznie ogranicza atrakcyjność stosowania takiego popiołu w technologii betonu; bardziej wskazanym rozwiązaniem jest produkcja cementu z zastosowaniem popiołu lotnego jako składnika głównego; przemiał jest rutynową operacją technologiczną w produkcji cementu,
- poprawę parametrów reologicznych mieszanki betonowej można uzyskać poprzez odpowiedni dobór domieszek chemicznych o działaniu uplastyczniającym i upłynniającym; w praktycznym stosowaniu tego rodzaju popiołu jest to trudno osiągalne, ponieważ potrzebne jest posiadanie zaawansowanej wiedzy specjalistycznej i odpowiedniego sprzętu badawczego do oceny właściwości reologicznych,
- dodatek popiołu lotnego wapiennego korzystnie kształtuje poziom wytrzymałości stwardniałego betonu i szczelność (wodoszczelność),

Later on (after 90 curing days) bigger strength reductions were observed, however within the acceptable range of standard requirements for frost resistant concrete.

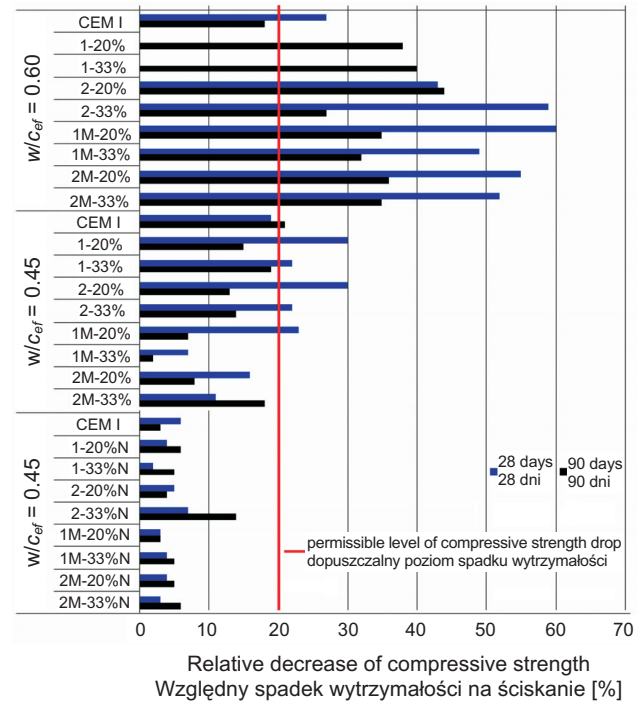


Fig. 11. Relative decrease of compressive strength of concrete after 150 cycles of freezing and thawing

Rys. 11. Względny spadek wytrzymałości na ściskanie betonu po 150 cyklach zamrażania-rozmrażania

4. FINAL CONCLUSIONS

The tests concerning the assessment of domestic calcareous fly ash of Bełchatów Power Plant application as an additive to concrete allow drawing the following conclusions:

- this type of fly ash in non activated state demonstrates too high sieve residue (0.045 mm), far exceeding the requirements of both standards: PN-EN 450-1 and the American ASTM C618-12; what results in significantly greater water demand of concrete, as well as in difficulties in keeping the concrete consistency in long term and in low efficiency of chemical admixture performance,
- calcareous fly ashes are characterized by highly changeable chemical composition and physical properties, which makes it considerably difficult to evaluate their impact on the properties of concrete mixture and hardened concrete,

- stosowanie popiołów lotnych wapiennych nieuzdatnionych i zmielonych jako dodatku do betonu pogarsza jego mrozoodporność, natomiast właściwe napowietrzenie mieszanki betonowej z użyciem środków napowietrzających pozwala na uzyskanie betonów mrozoodpornych zawierających ten rodzaj popiołu lotnego,
- prezentowane wyniki powinny stać się impulsem do dalszych wnikliwych badań i analiz; jednakże, zdaniem autorów, praktyczne stosowanie wapiennych popiołów lotnych w technologii betonu będzie bardzo trudne ze względu na ich negatywny wpływ na właściwości mieszanki betonowej oraz brak uregulowań normalizacyjnych w tym zakresie.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Neville A.M.*: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków, 2012
- [2] *Giergiczny Z.*: Rola popiołów lotnych wapiennych i krzemionkowych w kształtowaniu własności współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Politechnika Krakowska, Kraków, 2006
- [3] *Giergiczny Z.*: Popioły lotne z dużą zawartością związków wapnia. *Cement Wapno Beton*, **72**, 5, 2005, 271 - 282
- [4] *Koukouras N.K.*: Mineralogy and geochemistry of Greek and Chinese coal fly ash. *Fuel*, **85**, 16, 2006, 2301 - 2309
- [5] *Koukouras N.K., Papayianni I., Tsikardani E., Papani-kolaus D., Ketikidis Ch.*: Greek Fly Ash a cement replacement in the production of paving blocks. Word of Coal Ash Conference, 7-10 May 2007, Northen Kentucky, USA, www.flyash.info/2007/94koukouras.pdf
- [6] *Sakorafa V., Michailidis K., Burragato F.*: Mineralogy, geochemistry and physical properties of fly ash from the Megalopolis lignite fields. Peloponnese. Southern Greece. *Fuel*, **75**, 4, 1996, 419 - 423
- [7] *Beton przyjazny środowisku. Praca zbiorowa, Stowarzyszenie Producentów Betonu Towarowego w Polsce, Kraków, 2008*

NORMY / STANDARDS

- PN-EN 206-1:2003 Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- PN-88/B-06250 Beton zwykły
- PN-EN 450-1:2009 Popiół lotny do betonu – Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności
- PN-EN 451-2:1998 Metoda badania popiołu lotnego – Część 2: Oznaczanie mialkości przez przesiewanie na mokro

- the mechanical activation of fly ash (grinding) may contribute to the reduction of negative impact of calcareous fly ash properties on concrete mixture performance; it is though the additional cost, which considerably reduces the attractiveness of such fly ash use in concrete technology; the production of cement with fly ash as a main constituent is a recommended solution; grinding is a routine technological process in cement production,
- the proper selection of chemical admixtures, plasticizers and superplasticizers allow improving the rheological parameters of concrete mixture; practical application of this type of fly ash seems to be hard to achieve as the extensive expertise in the field and adequate research equipment to assess the rheological properties are essential,
- the addition of calcareous fly ash positively influences the compressive strength of concrete and its permeability,
- the application of non activated and ground calcareous fly ashes as an additive to concrete deteriorates its frost resistance; proper aeration of concrete mixture with air-entraining agents allows achieving frost resistant concretes,
- the presented test results should become an impulse for further in-depth research and analysis. Nevertheless, authors believe that practical application of calcareous fly ashes in concrete technology might be very difficult due to their negative impact on concrete mixture properties, as well as due to the lack of standardization regulations in this area.

- ASTM C618 - 12 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- CAN/CSA - A23.5-98 Cementitious Materials Compendium
- PN-EN 12350-2:2001 Badania mieszanki betonowej – Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka
- PN-EN 12390-3:2002 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania
- PN-EN 12390-8:2001 Badanie betonu – Część 8: Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem
- PN-EN 13877-2:2007 Nawierzchnie betonowe – Część 2: Wymagania funkcjonalne dla nawierzchni betonowych