

## **Właściwości cementów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego**

### **Properties of cements with calcareous fly ash addition**

#### **1. Wprowadzenie**

Ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> związanej z produkcją cementu stanowi podstawę rozwoju technologii produkcji cementów z dużą ilością dodatków mineralnych (1, 2). Podstawowym warunkiem zwiększenia skali produkcji tych cementów jest posiadanie dobrych surowców zaliczanych przez normę cementową PN-EN 197-1 do składników głównych cementu powszechnego użytku. W Polsce do produkcji cementów wykorzystuje się tradycyjnie popiół lotny krzemionkowy V i granulowany żużel wielkopiecowy S, które mają właściwości odpowiednio pucolanowe i hydrauliczne, korzystnie wpływające na właściwości cementów. Ograniczone ilości tych dodatków zmuszają przemysł cementowy do poszukiwania innych składników cementu, a tym samym rozwijania nowych rodzajów cementów wieloskładnikowych. Wykorzystywane są także coraz większe ilości kamienia wapiennego do produkcji cementów portlandzkich wapiennych CEM II/A-LL, B-LL oraz cementów portlandzkich wieloskładnikowych popiołowo-wapiennych CEM II/A-M (V-LL), B-M (V-LL) i żużlowo-wapiennych CEM II/A-M (S-LL), B-M (S-LL). W ostatnich latach w centrum uwagi producentów cementu jest możliwość zagospodarowania ogromnych ilości popiołów lotnych wapiennych powstających w procesie spalania węgla brunatnego. Popiół ten, pomimo że jest wymieniany w normie PN-EN 197-1 jako dodatek pucolanowo-hydrauliczny do cementu, nie był praktycznie dotychczas stosowany w przemyśle cementowym, w Polsce. Główną tego przyczyną było małe poznanie właściwości tego popiołu, co wiązało się z obawą jego niekorzystnego wpływu, przede wszystkim na stałość objętości cementu.

Zagadnienie dobrego poznania właściwości popiołów lotnych wapiennych i oceny ich przydatności do produkcji cementu było podstawowym celem Projektu Strukturalnego „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”. Wyniki prac prowadzonych w ramach tego projektu od 2009 obalają szereg negatywnych opinii, co do możliwości i warunków wykorzystania popiołów lotnych wapiennych W w przemyśle cementowym. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że popiół lotny wapienny z Elektrowni Bełchatów jest popiołem glinokrzemianowo-wapiennym, o składzie chemicznym zbliżonym do żu-

#### **1. Introduction**

The limitation of CO<sub>2</sub> emission, connected with cement production, has fundamental impact on cement production development on the basis blended cement with high content of mineral additives (1, 2). The main factor assuring the grow of such cements production is the availability to the good mineral additives, which are included in cement Standard PN-EN 197-1, as main constituents of common cements. Siliceous fly ash V and granulated blastfurnace slag S, which have pozzolanic and hydraulic properties respectively which advantageously influence on cement properties, are traditionally used in production of cement in Poland. However, limited constituents of these resources obliged cement industry to search for other additions, consequently to develop new blended cement types. Simultaneously increasing quantities of limestone for production of Portland-limestone cement CEM II/A-LL, B-LL and Portland-composite cements: CEM II/A-M (V-LL), B-M (V-LL) and CEM II/A-M (S-LL), B-M (S-LL) are used. Recently, cement manufacturers focus on possibilities to use calcareous fly ashes as a mineral addition, which huge amounts are generated as by-products of lignite combustion process. This fly ash was not used in cement industry in Poland so far, despite of that it is classified in PN-EN 197-1 standard as a pozzolanic-hydraulic constituent of cement. The main reason of that was little knowledge about properties of this fly ash and was connected with fear of disadvantageous influence, especially soundness of cement.

The general aim of Structural Project „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”, was to study precisely the properties of calcareous fly ash and to define the usability of this material as an addition to cement. Results of the research under this project since 2009, bring down several negative opinions about the possibilities to use of calcareous fly ash in cement industry. Results of this study has shown that the calcareous fly ash from Bełchatów Power Plant is a calcium aluminosilicate fly ash, with chemical composition similar to blastfurnace slag, with good pozzolanic-hydraulic properties (3, 4). Moreover, several years of the Bełchatów calcareous fly ash properties monitoring has proved that the chemical composition variations successively

li wielkopieczowych, a tym samym wykazujący dobre właściwości pucolanowo-hydrauliczne (3, 4). Ponadto prowadzony od kilku lat monitoring ich właściwości w Elektrowni Bełchatów wykazał, że zmienność składu chemicznego sukcesywnie maleje. Współczynnik zmienności podstawowych właściwości popiołów spada poniżej 20% w okresie rocznym, natomiast partie w ilości kilku tysięcy ton, odbierane w sposób ciągły do prób wielkoprzemysłowych, wykazywały zmienność mniejszą od 10% (5, 6).

W niniejszym artykule podsumowano wyniki badań podstawowych właściwości cementów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego W. Omówiono właściwości cementów portlandzkich popiołowych CEM II i pucolanowych CEM IV oraz cementów portlandzkich wieloskładnikowych CEM II/A-M, B-M, zawierających obok popiołu lotnego wapiennego inne stosowane w przemyśle cementowym dodatki mineralne, to jest żużel granulowany S, popiół krzemionkowy V oraz kamień wapienny LL. Zbadane właściwości normowe tych cementów uzupełniono dodatkowymi właściwościami technicznymi kształtującymi trwałość betonu, a mianowicie ciepła hydratacji, odporności na siarczany i na reakcję alkaliów z kruszywem.

Wytyczne technologiczne i warunki stosowania cementów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego W, uwzględniające kompleksowe badania przydatności tych cementów do produkcji betonu, będą przedstawione na najbliższej konferencji Dni Betonu 2012.

## 2. Materiały i zakres badań

Zakres badań obejmował dwie grupy cementów: pierwszą stanowiły cementy wytworzone w skali laboratoryjnej, drugą cement pucolanowy CEM IV/B-W wyprodukowany w skali przemysłowej w jednym z zakładów cementowych, w ilości 300 ton. Do produkcji cementów zastosowano partię popiołu, która miała przeciętne właściwości fizykochemiczne, typowe dla popiołów z elektrowni Bełchatów (tablice 1, 2) (3, 4).

Składy cementów objętych badaniami zestawiono w tablicy 3. Cementy laboratoryjne produkowano w kulowym młynku laboratoryjnym wspólnie mieląc klinkier portlandzki, wstępnie zmielony do powierzchni właściwej 250 m<sup>2</sup>/kg, z dodatkami mineralnymi oraz z gipsem, do powierzchni 420 m<sup>2</sup>/kg. Dodatek gipsu dobierano w ten sposób aby uzyskać stałą zawartość SO<sub>3</sub> 3,15% masy cementu. Do produkcji zastosowano klinkier zawierający około 60% C<sub>3</sub>S, 16% C<sub>2</sub>S, 9% C<sub>3</sub>A oraz 9% C<sub>4</sub>AF. W próbniej produkcji przemysłowej zastosowano również wspólny przemiał składników cementu.

Uzyskane cementy zbadano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 197-1:2002/A3:2007 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”. Oznaczenia te obejmowały:

- wodożądność, czas wiązania i stałość objętości według PN-EN 196-3+A1:2009;
- wytrzymałość na zginanie i ściskanie zgodnie z PN-EN 196-1:2006.

decreases. The coefficient of these variations decreases under 20% in the last year and for huge batches, collected for industrial trials, these variations were even below 10% (5, 6).

In this paper the standard properties of cements produced with the properties of calcareous fly ash addition are summarized. The properties of Portland-fly ash cement CEM II, Pozzolanic cement CEM IV, as well as Portland-composite cements CEM II/A-M, B-M, containing besides calcareous fly ash W also different mineral additions used in cement industry, i.e. granulated blastfurnace slag S, siliceous fly ash V and limestone LL, are discussed. The examination of basic properties of these cements were extended by others studies, which could influence the durability of concrete, normally heat of hydration, sulphate resistance and alkali-silica-reaction.

Technological guidelines and application conditions of cements containing calcareous fly ash, including comprehensive research of these cements applicabilities in concrete production, will be presented during next Conference Dni Betonu 2012.

## 2. Materials and methods

Two groups of cements were studied. Cements produced in the laboratory scale and in the industry, where in one of cement plant, 300 tons were produced. For the production of cement batches the calcareous fly ash was used with average properties typical for Bełchatów Power Plant (tables 1, 2) (3, 4).

The composition of cements are given in table 3. Laboratory cements were produced in laboratory ball mill by intergrinding of initially ground to 250 m<sup>2</sup>/kg specific surface Portland clinker with mineral additions and gypsum to 420 m<sup>2</sup>/kg specific surface. Gypsum addition was calculated to ensure the constant SO<sub>3</sub> content, equal 3.15% of cement mass. The phase composition of Portland clinker for these laboratory trials was, as follows: 60% C<sub>3</sub>S, 16% C<sub>2</sub>S, 9% C<sub>3</sub>A and 9% C<sub>4</sub>AF. Cement obtained during industrial trial was produced also by intergrinding of cement constituents in closed circuit ball mills.

Obtained cements were tested according to requirements of PN-EN 197-1:2002/A3:2007 „Cement. Part 1: Composition, requirements and conformity criteria for common cements”. These tests scope included the following determinations:

- water demand, setting time and soundness according to PN-EN 196-3+A1:2009;
- compressive and flexural strength according to PN-EN 196-1:2006.

Moreover, the following examinations of cements properties were performed:

- consistency according to PN-EN 1015-3:2000, table test;
- heat of hydration by semi-adiabatic method according to PN-EN 196-9:2010;
- sulphate resistance according to PN-B 19707:2003/Az1:2006;
- alkali-silica-reaction resistance according to ASTM C1567-08.

Tablica 1 / Table 1. SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁU Z ELEKTROWNI BEŁCHATÓW / CHEMICAL COMPOSITION OF FLY ASH FROM BEŁCHATÓW POWER PLANT

Strata prażenia Loss on ignition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>wolny/ CaO<sub>free</sub></sub>	SiO <sub>2</sub> reaktywny SiO <sub>2</sub> reactive	CaO reaktywny CaO reactive
% masy / % mass,									
2,67	45,2	20,8	4,58	20,6	1,49	2,96	1,18	34,6	19,2

Tablica 2 / Table 2. AKTYWNOŚĆ POPIOŁU / ACTIVITY OF FLY ASH

Pozostałość na sicie 0,045 mm/ Residue on 0,045 mm sieve, % masy/ mass	Wytrzymałość na ściskanie R <sub>28</sub> zaprawy popiołowej <sup>1)</sup> / Fly ash mortar compressive strength R <sub>28</sub> <sup>1)</sup> , MPa	Wskaźnik aktywności <sup>2)</sup> / Activity index <sup>2)</sup> , %	
		K <sub>28</sub>	K <sub>90</sub>
57,2	4,3	92 <sup>3)</sup>	97 <sup>3)</sup>
		105 <sup>4)</sup>	112 <sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>według normy / according to PN-EN 197-1  
<sup>2)</sup>według normy / according to PN-EN 450-1  
<sup>3)</sup>popiół w stanie dostawy / fly ash as delivered  
<sup>4)</sup>popiół zmielony do pozostałości 21% na sicie 0,040 mm / fly ash ground to 21% residue on 0,040 mm sieve

Ponadto wykonano następujące oznaczenia właściwości cementów:

- rozptyły zaprawy według PN-EN 1015-3:2000;
- ciepło hydratacji metodą semi-adiabatyczną według PN-EN 196-9:2010;
- odporność na siarczany według PN-B 19707:2003/Az1:2006 Załącznik A;
- odporność na korozję alkaliczną według normy ASTM C1567-08.

### 3. Wyniki badań i dyskusja

W tablicach 4 i 5 zestawiono wyniki badań właściwości fizycznych oraz wytrzymałość cementów z popiołem lotnym wapiennym W. Przy wzrastającej zawartości popiołu W w cemencie, wynoszącej kolejno 15%, 30% i 50% występuje typowy dla cementów popiołowych wzrost wodożądności, oraz zwiększenie czasu wiązania (tablica 4.). Wyniki pomiarów wykazują jednak, że nawet cement puzolanowy CEM IV/B-W, zawierający 50% popiołu lotnego wapiennego, ma zbliżoną wodożądność i czas wiązania do cementu CEM IV/B-V. Komentarza wymaga zwiększona wodożądność cementów zawierających dodatek tylko popiołu i wykazujących mały rozptył. Należy zauważyć, że pomimo tego małego rozptywu nie napotkano na trudności w prawidłowym zagęszczeniu zaprawy, w trakcie formowania beleczek. Równoczesny dodatek popiołu V, żuźla S lub kamienia wapiennego LL, obok popiołu W, do cementu powoduje zmniejszenie wodożądności oraz znaczną poprawę rozptyłu (tablica 4.). W żadnym z badanych cementów nie stwierdzono braku stałości objętości.

Stwierdzony (tablica 2) korzystny wskaźnik aktywności popiołów lotnych wapiennych W wpłynął na dobry przyrost wytrzymałości cementów. Wyniki wytrzymałości po 90 dniach twardnienia

### 3. Results and discussion

Physical properties and strength results of cements with calcareous fly ash addition are given in Tables 4 and 5. The water demand and setting time drastic increase, in the case of cement with high content of calcareous fly ash W, was found (Table 4). However, according to data presented in Table 4 water demand and setting time of Pozzolanic cement CM IV/B-W, containing 50% of calcareous fly ash W, are similar to observed for industrial CEM IV/B-V cement. Increased water demand of cements with fly ash W influences on lowering the consistency. However, it must be underlined that despite of that low consistency no difficulties in the proper mortar compacting during bars molding were observed. Fly ash V, blastfurnace slag S or limestone LL, simultaneously added with fly ash W to blended cement ensures good water demand, setting time and consistency of cement paste (Table 4). There were no problems with soundness of all tested cements.

The results proved, as shown in Table 2, very good pozzolanic activity indexes K<sub>28</sub> and K<sub>90</sub> of calcareous fly ash W which explain advantageous influence on strength development of blended cements, with this kind of fly ash addition. The compressive strength of cements CEM II with fly ash W addition, after 90 days of hardening, are higher than reference cement CEM I (Table 5). Especially high compressive strength of CEM II/B-M (S-W) cement, with fly ash W and blastfurnace slag was found. Cement CEM II/B-M (S-W) achieved reference cement CEM I strength already after 28 days of hardening as it is shown in Figure 1 and in Table 5. It is typical for simultaneous pozzolanic and latent hydraulic activity additions. Despite of the almost highest content of additions, fixed by PN-EN 197-1 standard, all Portland-composite cements achieved 32.5 R class, and CEM II/A-W cement 42.5 R class. The 2 days compressive strength of CEM II/B-W cement proved the possibility to achieve 42.5 R class, by this cement too, only by

Tablica 3 / Table 3. SKŁAD CEMENTÓW / COMPOSITION OF CEMENTS

Cement	Udział składnika odniesiony do sumy składników głównych cementu Constituent percentage related to sum of main constituents % masy / mass				
	Klinkier Clinker*	Popiół Fly ash		Żużel Slag S	Wapień Limestone LL
		V	W		
CEM II/A-W	85	-	15	-	-
CEM II/B-W	70	-	30	-	-
CEM IV/B-W	50	-	50	-	-
CEM II/B-M (V-W)	70	15	15	-	-
CEM II/B-M (LL-W)	70	-	15	-	15
CEM II/B-M (S-W)	70	-	15	15	-
CEM IV/B (V-W)	50	25	25	-	-
CEM IV/B-W 32,5N (cement przemysłowy / industrial cement)	58	-	42	-	-

\*dodatek gipsu zapewniający 3,15 SO<sub>3</sub> / gypsum addition ensuring 3.15% SO<sub>3</sub>

wszystkich cementów CEM II z popiołem W są lepsze od cementu odniesienia CEM I (tablica 5). Szczególnie wysoką wytrzymałość osiągnął cement CEM II/B-M (S-W) zawierający popiół W i żużel S. Jak wynika z rysunku 1 i tablicy 5 cement CEM II/B-M (S-W) osiągnął wytrzymałość cementu odniesienia CEM I już po 28 dniach twardnienia. Jest to charakterystyczne dla dodatków o aktywności puzolanowej i/lub utajonej hydraulicznej. Pomimo dużych zawartości dodatków mineralnych, bliskich do maksymalnych, wszystkie cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEM II/B-M osiągnęły klasę 32,5 R, a cement CEM II/A-W klasę 42,5 R. Wytrzymałość cementu CEM II/B-W, zawierającego 30% popiołu W, po dwóch dniach wskazuje na łatwą możliwość osiągnięcia przez ten cement również klasy 42,5 R, przy nieznacznym zwiększeniu powierzchni właściwej. Cement puzolanowy CEM IV/B-W, zawierający aż 50% popiołu W osiągnął klasę 32,5 N. Wytrzyma-

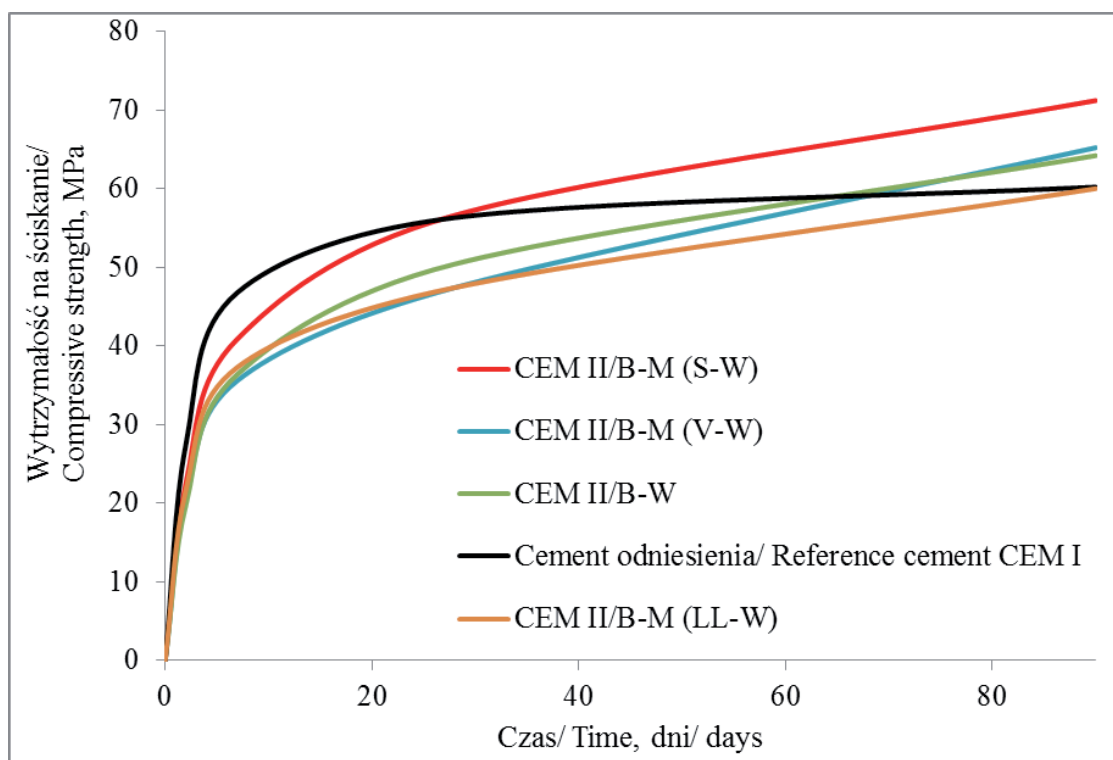
low increase of its specific surface area. Pozzolanic cement CEM IV/B-W, containing 50% of calcareous fly ash achieved 32.5 N class. Compressive strength of Pozzolanic cement CEM IV/B-W produced in industrial scale met the requirements for early 7 days and standard 28 days strength of class (Table 5).

Good hydraulic activity of cements with calcareous fly ash addition (Table 6) is confirmed by heat of hydration. Cements CEM II/B-W and CEM IV/B-W, containing 30% and 50% of fly ash W respectively, have relatively high heat of hydration. Heat of hydration of CEM IV/B-W is equal 254 J/g, after 41 hours of hydration.

Sulphate resistance of cements with calcareous fly ash addition, examined according to PN-B 19707:2003/Az1:2006 standard shows that cements containing from 15% to 50% of fly ash W are sulphate resistant. Expansion of mortars of these cements was

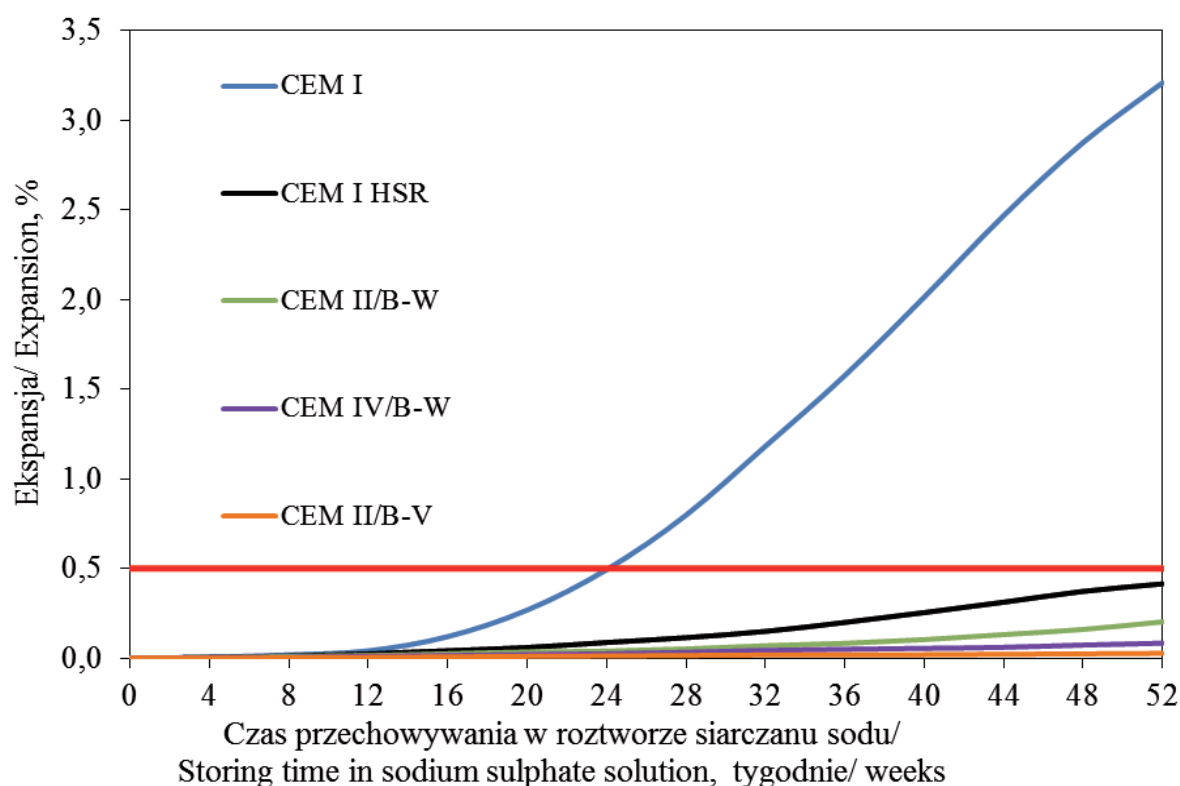
Tablica 4 / Table 4. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTÓW / PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENTS

Cement	Powierzchnia właściwa Specific surface, cm <sup>2</sup> /g	Wodożądność Water demand, %	Rozpliw Consistency, cm	Czas wiązania Setting time, min		Stalność objętości Soundness, mm
				Początek Initial	Koniec Final	
Cement odniesienia / Reference cement CEM I 42,5R	3800	26,5	18,0	152	252	0
CEM II/A-W	4200	30,8	17,3	191	311	0
CEM II/B-W	4200	33,0	15,9	198	358	0
CEM IV/B-W	4200	34,6	14,7	280	420	0
CEM II/B-M (V-W)	4200	29,4	18,2	184	359	0
CEM II/B-M (LL-W)	4500	29,4	17,9	201	331	0
CEM II/B-M (S-W)	4300	29,2	17,7	177	387	0
CEM IV/B (V-W)	4100	30,8	18,6	274	449	0
CEM IV/B-W 32,5N (cement przemysłowy / industrial cement)	5000	31,0	14,8	225	315	0



Rysunek 1. Krzywe przyrostu wytrzymałości w czasie wybranych cementów z dodatkiem popiołu W

Figure 1. Curves of compressive strength development of chosen cements with calcareous fly ash addition



Rysunek 2. Ekspansja zapraw cementowych w roztworze  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (16 g/l jonów  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Pozioma linia oznacza kryterium odporności po 52 tygodniach oddziaływania roztworu siarczanu sodu na zaprawę cementową

Figure 2. Expansion of cement mortars in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution (16 g/l  $\text{SO}_4^{2-}$  ions). Horizontal line stands for resistance criteria after 52 weeks of cement mortar exposition on sodium sulphate solution

łości cementu CEM IV/B-W, wyprodukowanego w skali przemysłowej spełniają z dużą rezerwą wymagania wytrzymałości wcześniejszej po 7 dniach i normowej po 28 dniach.

lower than 0,5% after 52 weeks of immersion in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution, at 80°C (Figure 2), i.e. lower than the threshold value for sulphate resistant cement SR.



Tablica 5 / Table 5. WYTRZYMAŁOŚĆ CEMENTÓW / STRENGTH OF CEMENTS

Cement	Wytrzymałość / Strength, MPa							
	na ściskanie/ compressive				na zginanie/ flexural			
	po dniach / after days							
	2	7	28	90	2	7	28	90
Cement odniesienia / Reference cement CEM I 42,5R	27,5	46,8	56,3	60,2	5,5	6,6	7,6	8,0
CEM II/A-W	25,8	45,9	57,6	69,0	5,2	6,9	8,2	8,1
CEM II/B-W	19,8	36,4	50,4	64,2	4,3	6,2	8,2	8,5
CEM IV/B-W	12,8	24,0	39,3	52,8	3,2	4,8	6,9	7,8
CEM II/B-M (V-W)	20,4	35,6	47,4	65,2	4,4	6,1	7,3	8,6
CEM II/B-M (LL-W)	21,7	37,3	47,4	60,0	4,4	6,5	8,1	8,7
CEM II/B-M (S-W)	22,5	40,9	56,6	71,2	4,3	6,7	8,4	9,6
CEM IV/B (V-W)	12,3	23,2	36,4	51,9	3,2	4,7	6,6	7,6
CEM IV/B-W 32,5N (cement przemysłowy / industrial cement)	14,2	24,6	39,7	53,4	3,5	4,9	6,9	7,8

Tablica 6 / Table 6. CIEPŁO HYDRATACJI CEMENTÓW / HEAT OF HYDRATION OF CEMENTS

Cement	Ciepło / Heat, J/g					
	po godzinach hydratacji / after hours of hydration					
	12	24	36	41	48	72
Cement odniesienia / Reference cement CEM I 42,5R	205	299	342	354	368	395
CEM II/A-W	184	285	325	336	350	377
CEM II/B-W	160	251	296	308	322	352
CEM IV/B-W	127	199	242	254	268	296

Dobrą aktywność hydrauliczną cementów z dodatkiem popiołu W potwierdzają wyniki badań ciepła hydratacji zamieszczone w tablicy 6. Cementy CEM II/B-W i CEM IV/B-W, zawierające odpowiednio 30% i 50% popiołu W, wykazują stosunkowo duże ciepło hydratacji. Ciepło hydratacji cementu CEM IV/B-W wynosi 254 J/g po 41 godzinach twardnienia.

Zbadano odporność na siarczany wybranych cementów z dodatkiem popiołu W. Według normy PN-B 19707:2003/Az1:2006 uzyskane wyniki pokazują, że cementy zawierające od 15% do 50% popiołu lotnego wapiennego W są odporne na działanie siarczanów. Ekspansja zapraw z tych cementów była mniejsza od 0,5% po 52 tygodniach oddziaływania roztworu Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (rysunek 2).

Jak już wspomniano w punkcie 2 zbadano również wpływ cementu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego na przebieg reakcji alkaliów z kruszywem według normy ASTM C1567. Badania objęto między innymi cementy zawierające 30% i 50% popiołu W oraz cement portlandzki wieloskładnikowy z udziałem 15% popiołu W i 15% popiołu V. Wyniki badań potwierdzają korzystny wpływ popiołu W w zmniejszaniu ekspansji wywołanej korozją alkaliczną zaprawy (8). Badania długoterminowe potwierdzające uzyskane wyniki są w toku.

Horizontal line represents the threshold value of expansion after 52 weeks of cement mortar immersion in sodium sulphate solution at 80°C for sulphate resistant cement.

As it was already mentioned the influence of cement with calcareous fly ash addition on alkali-silica-reaction was determined according to ASTM C1567. The test embraced cements, among others, containing 30% and 50% of fly ash W and Portland-composite cement with 15% of fly ash W and 15% of fly ash V addition. The results confirm advantageous influence of fly ash W on decrease of mortar expansion due to ASR (7). Long term examinations of fly ash W effect are in progress.

#### 4. Conclusions

Presented results of cements with calcareous fly ash addition examination, being small part of almost 3 years research, confirm the suitability of calcareous fly ash from Bełchatów Power Plant for cement production.

Calcareous fly ashes from Bełchatów Power Plant have good activity indexes and allow the production of cement with better properties comparing to siliceous fly ashes V, traditionally used

## 4. Wnioski

Przedstawione wyniki badań cementów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego W, stanowiąc niewielką część już blisko trzy letniego programu badawczego, potwierdzają przydatność stosowania popiołu lotnego wapiennego z Elektrowni Bełchatów do produkcji cementów.

Popioły lotne wapienne z Elektrowni Bełchatów mają dobry wskaźnik aktywności i pozwalają na uzyskanie cementów o lepszych właściwościach od tradycyjnie stosowanych w przemyśle cementowym popiołów lotnych krzemionkowych V. Cementy wieloskładnikowe z dodatkiem popiołu W, dla udziału składników podanych w tablicy 3, zgodnych z normą PN-EN 197-1, spełniają wszystkie wymagania dla cementów powszechnego użytku.

Wykazano, że szczególnie korzystne właściwości cementów z popiołem lotnym wapiennym W uzyskiwane są przy równoczesnym stosowaniu dwóch dodatków mineralnych; popiołu W z żużlem S lub popiołu W z popiołem V lub popiołu W z kamieniem wapiennym LL. Efekt synergii związany z równoczesnym stosowaniem dwóch dodatków mineralnych był dokumentowany przez autorów, jako szczególnie efektywny dla układu składnik pucolanowy i żużel wielkopieczowy (9).

Wyniki badań wieloskładnikowych cementów powszechnego użytku z popiołem W, właściwości normowych i dodatkowych cech gwarantujących trwałość betonu, pozwalają zakładać przydatność takich cementów w technologii betonu.

Niniejszy artykuł opracowano w ramach projektu strukturalnego nr PO IG 01.01.02.-24-005/09 „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”.

## Literatura / References

1. Stowarzyszenie Producentów Cementu: Informator 2011 - Przemysł Cementowy w liczbach, <http://www.polskicement.com.pl/index.php?s=3/3/0&baza=pokaz&nid=16>.
2. Cembureau synthesis data. 2006-2009, publikacja w posiadaniu autorów.
3. A. Garbacik, Raport z zadania 2 Projektu Strukturalnego PO IG 01.01.02.-24-005/09 „Zmienność jakości popiołów i ich przydatności z uwagi na wymagania technologii cementu i betonu”, Kraków, 2010, <http://www.smconcrete.polsl.pl/raporty>.
4. Z. Giergiczny, D. Dziuk, P. Miera, K. Hawrot, A. Żak, A. Garbacik, T. Baran, G. Adamski, W. Drożdż, H. Krztoń, J. Gazdowicz, Raport z zadania 3 Projektu Strukturalnego PO IG 01.01.02.-24-005/09 „Możliwości aktywności fizykochemicznej właściwości pucolanowo-hydraulicznych popiołów lotnych wapiennych”, Gliwice-Kraków, 2011, <http://www.smconcrete.polsl.pl/raporty>.
5. Z. Giergiczny, A. Garbacik, T. Baran, Popioły lotne wapienne jako składnik pucolanowo-hydrauliczny cementów i aktywny dodatek do betonu. Energia i środowisko w technologiach materiałów budowlanych, ceramicznych, szklarskich i ogniotrwałych. Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., Rozdział 14, s. 186-200, Warszawa-Opole 2010.

in cement industry. Portland composite cements and Pozzolanitic cements with the fly ash W addition, of composition according to table 3 and fulfilling the requirements of Standard PN-EN 197-1, meet the normative requirements for common cements.

It was interesting that specially advantageous properties of Portland composite cements with calcareous fly ash addition are achieved for cements containing two mineral additives; fly ash W and slag S, or fly ash V as well as the limestone LL. The synergy effect connected with simultaneous use of two mineral additions, found by authors, is especially effective for fly ash W and blast-furnace slag S composition. (9).

The standard properties and additional characteristics, which guarantee durability of concrete, indicated for composite cements with calcareous fly ash allow to summarise the suitability of these cements in the technology of concrete.

## Acknowledgments

The financial support under Structural Project No PO IG 01.01.02.-24-005/09 is gratefully acknowledged by the authors.

6. A. Garbacik, T. Baran, P. Pichniarczyk, Charakterystyka krajowych popiołów lotnych wapiennych ze spalania węgla brunatnego. Energia i środowisko w technologiach materiałów budowlanych, ceramicznych, szklarskich i ogniotrwałych. Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., Rozdział 15, s. 201-214, Warszawa-Opole 2010.
7. E. Giergiczny, Z. Giergiczny, Cement Wapno Beton, **77**, 157 (2010).
8. W. Drożdż, Z. Giergiczny, Wpływ popiołu lotnego wapiennego W na przebieg korozji alkalicznej w betonie. XVIII Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, s. 143, Zakopane, 2011.
9. Z. Giergiczny, A. Garbacik, W. Drożdż, Synergic effect of non-clinker constituents in Portland composite cements. 13<sup>th</sup> ICCI, s. 49, Madryt, 2011.