

Wpływ rodzaju cementu na właściwości betonu komórkowego

Effect of cement type on the properties of cellular concrete

1. Wprowadzenie

Budownictwo współczesne – rozumiane globalnie jako produkcja budowlana i eksploatacja obiektów budowlanych - jest nazywane „sektorem 40”, bowiem ocenia się w przybliżeniu, że zużywa 40 % energii, emituje 40% CO₂ i produkuje 40% odpadów. Tak w przemyśle materiałów budowlanych, jak i w realizacji obiektów budowlanych podejmowane są liczne działania zmierzające do obniżenia tych liczb. Zrównoważone budownictwo sprowadza się w pewnym uproszczeniu do zmniejszenia zużycia energii i surowców w całym procesie powstania i istnienia obiektów budowlanych oraz do minimalizacji wpływu tego działu gospodarki na środowisko naturalne.

Proces wytwarzania autoklawizowanych betonów komórkowych – ABK, uzyskiwanych wyrobów, oraz ich zastosowanie w budownictwie wykazuje, że procesy te spełniają dobrze zasady zrównoważonego rozwoju (3). Wytwarzanie ABK jest procesem przyjaznym dla środowiska gdyż w jej toku nie powstają szkodliwe materiały lub substancje, nie występuje emisja pyłów albo toksycznych gazów. Równocześnie masowe stosowanie popiołu lotnego jest działaniem, które trzeba zaliczyć do ochrony środowiska naturalnego. Podkreślić należy, że Polska jest, obok Wielkiej Brytanii, produkującym krajem, który w produkcji betonu komórkowego stosuje popiół lotny. Ponadto, wytwórnice ABK, stosujące technologię popiołową wykorzystują w procesie autoklawizacji odpadową parę z elektrowni. Proces technologiczny wytwarzania betonu komórkowego nie powoduje powstawania odpadów, a pewne ilości świeżej masy betonowej pozostające po obciążeniu wyrobów są bezpośrednio wykorzystywane w produkcji, w postaci szlamu. Tę samą metodę stosuje się w stosunku do odpadów z uszkodzonych wyrobów gotowych. Warto podkreślić, że niektóre wytwórnice, eksploatujące własne kotłownie zużywają także odpady świeżej masy jako sorbentu do odsiarczania spalin. Duże znaczenie ma przede wszystkim małe zużycie energii i surowców w produkcji betonu komórkowego w porównaniu do innych materiałów budowlanych (tablica 1). Dzięki temu małe jest również zużycie paliw kopalnianych i towarzysząca im emisja SO₂, NO_x i pyłów.

Wyroby z ABK wykazują wysoką izolacyjność cieplną co ma bardzo korzystny wpływ na oszczędność energii do ogrzewania obiektów mieszkalnych w celu zapewnienia w nich zdrowego mikroklimatu. Zastosowanie betonu komórkowego pozwala na wznosze-

1. Introduction

Modern building engineering, that means building technology and exploitation of building objects is considered as “sector 40” because it consumes approximately 40% energy, as well as provides 40% CO₂ emission and 40% wastes. Considerable efforts are concentrated on the reduction of these indexes both in the building materials technology and realization of building structures. Therefore the so-called sustainable building focuses generally on the energy consumption and raw materials lowering and reduction of the impact of this branch on the natural environment.

The production of autoclaved cellular concretes and their implementation in building engineering reveal that these processes comply well with the principles of sustainable development (3). The cellular concrete technology is environmental friendly because it is neither involved in hazardous or toxic materials generation nor in the toxic gases emission. Simultaneously, the wide use of fly ash is highly advantageous from the natural environment protection point of view. One should underline that the fly ash is consumed on a large scale in cellular concrete technology in Poland and in Great Britain. Moreover, the cellular concrete producers utilize not only the fly ash but also the waste steam from power plants. The cellular concrete technology is waste free and some amount of fresh concrete mass generated during shaping of concrete elements are re-used in the production. The same procedure is applied in case of damaged end products. One should mention that in some cellular concrete plants, having their own steam generating installations, the waste concrete mass is used as a sorbent in the flue gas desulphurization. The low energy and raw materials consumption in the production of cellular concretes, as compared with the other building materials is of significant importance (Table 1). As a consequence, the consumption of fuel and accompanying the SO₂, NO_x and dust emission is low too.

Cellular concrete products reveal high thermal insulation ability and this has an advantageous impact on the heat economy in order to ensure a good, healthy conditioning in housing. Therefore the low energy consuming building objects can be erected. For this reason the cellular concrete elements are commonly used in wall structures (constitute about 41% of the wall elements market).

nie budynków o małym zużyciu energii. Nie bez powodu ABK stał się w kraju jednym z najczęściej wykorzystywanych materiałów do budowy ścian w budynkach (około 41%).

Przemysł cementowy w celu zmniejszenia zużycia energii oraz emisji CO₂ zwiększa udział cementów z dodatkami mineralnymi. Ważne znaczenie będzie więc miało zastosowanie tych cementów w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego. Przyczyni się to bowiem może do dalszej korzystnej zmiany technologii wytwarzania ABK, polegającej na stosowaniu surowców o mniejszym niekorzystnym wpływie na środowisko naturalne. Prace w tym kierunku zostały już podjęte w Centrum Badań Betonów Instytutu Szkła i Ceramiki i ustalono korzystne wymagania odnośnie do właściwości tych cementów (6).

2. Próby technologiczne wytwarzania ABK z zastosowaniem cementów wieloskładnikowych

2.1. Wybór cementów do prób i ich właściwości

Doboru cementów do badań, wspólnie z Oddziałem Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, dokonano na podstawie analizy krajowego rynku cementowego (6, 10-12).

Do prób wytypowano następujące cementy:

Cementy wzorcowe:

1. Cement portlandzki **CEM I 32,5R** z cementowni 1,
2. Cement portlandzki **CEM I 42,5 R** z cementowni 2.
3. Cementy z dodatkami mineralnymi:
4. Cement portlandzki popiołowy **CEM II/A-V 42,5R** z cementowni 1.
5. Cement portlandzki popiołowy **CEM II/A-V 42,5R** z cementowni 2.
6. Cement portlandzki popiołowy **CEM II/B-V 32,5R** z cementowni 1.
7. Cement portlandzki popiołowy **CEM II/B-V 42,5N** z cementowni 2.
8. Cement portlandzki wapienny **CEM II/A-LL 42,5R** z cementowni 3.
9. Cement portlandzki wieloskładnikowy **CEM II/B-M (V-LL) 32,5R** z cementowni 3.
10. Cement wieloskładnikowy **CEM V/A (S-V) 32,5 R** z cementowni 4.

Zakres badań wytypowanych cementów obejmował następujące oznaczenia:

- powierzchnia właściwa Blaine'a,
- właściwości fizyczne zaczynów i zapraw cementowych: wodochłonność i czas wiązania według PN-EN 196-3, wytrzymałość zapraw po 2, 7 i 28 dniach według PN-EN 196-1, konsystencja według PN-EN 1015-3.

In order to reduce the energy consumption and CO₂ emission in cement industry, the ratio of blended cements, with mineral additives, has become higher and higher. Their application in the cellular concrete production is of growing interest. Therefore some changes in the cellular concretes technology, contributing to the more environmental friendly raw material policy, are needed. The research projects concerned with this problem have been carried out in the Center of Concrete Research, Institute of Glass and Ceramics and the requirements dealing with the properties of cements used in the cellular concrete technology have been approved (6).

2. Technical scale experiments of cellular concrete production from blended cements

2.1. The properties of cements selected for the technical scale experiments

The cements were selected in cooperation with the Department of Glass and Ceramics in Kraków, based on the analysis of data provided by cement producers in Poland (6, 10-12).

The following types of cements have been taken into account:

Reference cements:

1. Portland cement **CEM I 32.5R** from cement plant 1,
2. Portland cement **CEM I 42.5 R** from cement plant 2.
3. Cements with mineral additives:
4. Portland fly ash cements **CEM II/A-V 42.5R** from cement plant 1.
5. Portland fly ash cements **CEM II/A-V 42.5R** from cement plant 2.
6. Portland fly ash cements **CEM II/B-V 32.5R** from cement plant 1.
7. Portland fly ash cements **CEM II/B-V 42.5N** from cement plant 2.
8. Portland limestone cements **CEM II/A-LL 42.5R** from cement plant 3.
9. Portland blended cement **CEM II/B-M (V-LL) 32.5R** from cement plant 3.
10. Blended cement **CEM V/A (S-V) 32.5 R** from cement plant 4.

The following properties of cements were determined:

- Blaine specific surface,
- physical properties of pastes and mortars: water demand and setting time according to PN-EN 196-3, strength of mortars after 2, 7 and 28 days according to PN-EN 196-1, consistency according to PN-EN 1015-3.

The physical properties of cements are given in Table 2.

As it results from the data presented above, the good quality of portland fly ash cements CEM II/A-V, with the fly ash content not exceeding 20%, produced both in cement plant 1 and 2, was proved. The early and final strength, after 2- and 28-day hardening

Tablica 1 / Table 1

ZUŻYCIE SUROWCÓW I ENERGII PRZY PRODUKCJI RÓŻNYCH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH (1)

RAW MATERIALS AND ENERGY CONSUMPTION IN THE PRODUCTION OF VARIOUS BUILDING MATERIALS (1)

	Gęstość w stanie suchym (średnia), Density at dry state (mean), kg/m ³	Zużycie surowców, Raw materials, kg/m ³	Zużycie energii Energy consumption, kWh/m ³
Beton zwykły General concrete	2300	2250	640
Cegła ceramiczna Ceramic brick	1200	1400	880
Ceramika poryzowana Porous ceramic	800	800	610
Cegły wapienno-piaskowe Lime-sand brick	1400	1100	280
Autoklawizowany beton komórkowy Autoclaved cellular concrete	500	500	210

W tablicy 2 przedstawiono właściwości fizyczne cementów.

Uzyskane wyniki wskazują na bardzo dobrą jakość cementów portlandzkich popiołowych CEM II/A-V, zarówno z cementowni 2, jak i cementowni 1, o zawartości popiołu nie przekraczającej 20%. Wytrzymałość tego cementu, wczesna po 2 dniach i końcowa po 28 dniach twardnienia jest zbliżona do cementu portlandzkiego CEM I. Również cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V, w którym zawartość popiołu może sięgać 35% ma bardzo dobrą

respectively was close to the values for Portland cement CEM I. The portland fly ash cement CEM II/B-V, in which the fly ash content can attain the 35% level, shows very high early and standard strength. The blended, slag – fly ash cement CEM V/A (S-V), with maximum 50% mineral additives exhibits, at low early strength, fairly good 28-day strength value. One should mention that the CEM II/A-LL cement shows both the early and final strength similar to those for Portland cement type CEM I.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE CEMENTÓW (7)

PHYSICAL PROPERTIES OF CEMENTS (7)

Rodzaj cementu Type of cement	Powierzchnia właściwa cm ² /g Specific surface cm ² /g	Wytrzymałość / Strength, MPa						Czas wiązania Setting time h ^{min}		Wodożądność Water demand H ₂ O %	Rozpływ Flow diameter cm
		Na zginanie			Na ścisnienie			początek initial	koniec final		
		2 dni/ days	7 dni/ days	28 dni/ days	2 dni/ days	7 dni/ days	28 dni/ days				
CEM I 42,5R – cementownia/cement plant 2	3420	5,2	6,5	7,1	30,0	46,2	54,8	2 ⁰⁵	3 ⁰⁰	29,2	18,1
CEM II/A-V 42,5R - cementownia/cement plant 2	3830	4,6	5,9	6,9	26,6	42,1	51,2	2 ¹⁰	3 ⁰⁰	29,0	18,6
CEM II/B-V 42,5N - cementownia/cement plant 2	4640	4,3	5,5	7,3	26,3	40,3	51,1	3 ⁰⁰	3 ⁵⁰	28,0	17,8
CEM I 32,5R - cementownia 1	3300	4,2	6,0	6,8	24,1	38,1	46,8	2 ²⁰	3 ²⁵	26,1	19,0
CEM II/A-V 42,5R - cementownia/cement plant 1	4300	4,2	6,2	7,2	26,0	39,5	51,9	3 ²⁰	4 ²⁵	27,5	17,4
CEM II/B-V 32,5R - cementownia/cement plant 1	3820	3,6	4,9	6,4	19,1	30,3	45,9	2 ¹⁰	3 ¹⁰	31,1	18,9
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH- - ce- mentowniacement plant 4	3680	2,6	4,6	7,0	13,7	25,7	45,4	3 ³⁰	5 ¹⁵	29,4	17,5
CEM II/A-LL 42,5R - cementownia/cement plant 3	5100	4,6	6,1	7,2	25,5	42,0	50,9	3 ¹⁰	3 ⁵⁰	31,1	16,4
CEM II/B-M (V-LL) 32,5R – ce- mentownia/cement plant 3	5650	4,2	4,5	5,8	14,2	26,5	38,3	2 ²⁰	3 ²⁰	27,5	17,1

wytrzymałość wczesną i końcową. Cement wieloskładnikowy popiołowo-żużłowy CEM V/A (S-V), zawierający maksymalnie 50% dodatków mineralnych wykazuje, przy małej wytrzymałości wczesnej, stosunkowo dużą wytrzymałość końcową, po 28 dniach. Na uwagę zasługuje również cement CEM II/A-LL którego wytrzymałość zarówno wczesna jak i końcowa jest wysoka i zbliżona do cementu portlandzkiego CEM I.

Znaczna szybkość narastania wytrzymałości badanych cementów portlandzkich popiołowych wynika z ich bardzo dużego rozdrobnienia. Pewne znaczenie może także mieć reakcja pucolanowa popiołu z wodorotlenkiem wapnia po 28 dniach twardnienia. Reakcja ta może być ważnym czynnikiem określającym przydatność cementów popiołowych do produkcji ABK. Pod tym kątem należy przeanalizować wyniki badań betonów po autoklawizacji, bowiem reakcja pucolanowa spowoduje spadek zawartości niezwiązanego $(\text{CaOH})_2$, w stosunku do betonów z cementu CEM I.

2.2. Próby technologiczne

Część doświadczalną wytwarzania ABK przeprowadzono w halach doświadczalnych Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych - CBB CEBET w Warszawie. Do próbnej produkcji ABK zastosowano technologię SW, przy czym skład betonu odpowiadał gęstości $600 \text{ kg/m}^3 (\pm 50 \text{ kg/m}^3)$.

W technologii SW wapno palone i cement, stanowiące spoiwo betonu komórkowego stosowane są bez dodatkowej obróbki. Natomiast kruszywem jest szlam piaskowy, uzyskany przez przemiał piasku z wodą w młynie kulowym (11).

Do mieszaniny surowcowej dodaje się proszek glinowy i środek powierzchniowo czynny, oraz uzupełnia ilość wody. Mieszaninę tych składników, zwaną mieszanką zarobową, wlewa się do formy, w której wyrasta, zwiększając znacznie porowatość, a następnie ulega stwardnieniu. Rozproszony w masie proszek aluminium, w alkalicznym środowisku mieszanki betonowej reaguje z $\text{Ca}(\text{OH})_2$ z wydzielaniem wodoru, który tworzy pory. Powstawanie struktury porowatej powinno być zsynchronizowane z przyrostem wytrzymałości betonu. Synchronizacja ta jest bardzo ważnym czynnikiem w produkcji betonu komórkowego, gdyż wydzielanie gazowego wodoru znacznie wyprzedzające proces twardnienia, spowodować może ucieczkę tego gazu ze świeżej masy mieszanki, uszkadzając jej budowę. Opóźnione powstawanie porów powoduje niedostateczny wzrost objętości betonu, który ma również nieprawidłową budowę (11).

W prowadzonych próbach laboratoryjnych założono, że dominującym składnikiem spoiwa będzie cement (6, 7), przy czym zmiennym czynnikiem był rodzaj cementu, a ilościowy skład mieszanki betonowej był stały. Odlewy betonu komórkowego wykonywano w formach $24 \times 24 \times 49 \text{ cm}$. Podczas prób określano za pomocą aparatu Gardnera rozlewność masy zarobowej. Na tej podstawie korygowano zawartość wody w mieszance, tak aby rozlewność utrzymywała się w granicach $100\text{-}105 \text{ mm}$. Mierzono również temperaturę wylewanej do formy masy (temperatura początkowa). Formy z masą zarobową umieszczano w podgrzewanej komorze, w któ-

A significant strength development observed in the case of portland fly ash cements is the consequence of the high fineness. The pozzolanic reaction of fly ash with the calcium hydroxide after 28-day hardening is surely of importance. This reaction can be an important factor determining the applicability of portland fly ash cements in the autoclaved cellular concrete technology. The properties of autoclaved concrete should be analyzed taking into account this process, since the pozzolanic reaction is involved in the reduction of unbound $(\text{CaOH})_2$ content with respect to the material produced from CEM I.

2.2. Technical scale experiments

The production of autoclaved cellular concrete was performed in the experimental division of the Institute of Ceramics and Building Materials – Concrete Research Center in Warsaw. The SW technology was applied in this experimental production; the composition of concrete mixture corresponded to the density $600 \text{ kg/m}^3 (\pm 50 \text{ kg/m}^3)$.

In the SW technology lime and cement, used to produce a binder in cellular concrete, are not subjected to any additional treatment. The sand slime, obtained by sand grinding with water in the ball mill, plays a role of aggregate (11).

The aluminum powder and a surfactant are added to the raw mix, together with some water supplement. The initial process mixture is cast in the moulds and subsequently the growing occurs, when the porosity of material increases, followed by hardening. The aluminum powder, spread throughout the mass, enters the reaction with $(\text{CaOH})_2$ in alkaline environment of concrete mixture, with release hydrogen producing the pores. The formation of porous structures should be compatible with the strength development of concrete. The time aspect is very important in the cellular concrete production because the release of hydrogen before hardening would result in the loss of gaseous product and the destruction of material. On the other side the retarded formation of pores means that the volume increase is insufficient and the structure of concrete element is not well developed too (11).

In the laboratory experiments a dominating role of cement, as the cellular concrete constituent was assumed (6, 7) and at constant mix proportions the type of cement was different for particular batches. The cellular concrete was cast in the $24 \times 24 \times 49 \text{ cm}$ moulds. The flow of concrete mixtures was determined by means of Gardner apparatus and the water content was corrected to keep the flow diameter in the range $100 - 105 \text{ mm}$. The temperature of suspension poured to the mould was measured too (initial temperature). The moulds were placed in a heated chamber for 4h maturing at temperature about 55°C . The growing, setting, strength development and temperature of matured cellular concrete mixtures was monitored.

In the second series of samples the CaO/SiO_2 (C/S) ratio was taken into account. CEM I 32,5R from cement plant 1 was used as a reference; CaO/SiO_2 ration in concrete was assumed as 0,46, based on the chemical composition of this cement. In the other

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE ABK – PIERWSZA SERIA PRÓB

PHYSICAL PROPERTIES OF AUTOCLAVED CELLULAR CONCRETES – FIRST SERIES OF EXPERIMENTS

Rodzaj cementu Type of cement	w/s	ρ_{sr}	$R_{k,sr}$	λ_{sr}	Skurcz Shrinkage	
					30-6%	całkowity total
					mm/m	
CEM I 32,5 R – cementownia/cement plant 1	0,53	560	3,8	0,1180	0,13	1,13
CEM I 42,5 R – cementownia/cement plant 2	0,53	560	3,9	0,1190	0,13	0,73
CEM II/A-V 42,5 R – cementownia/cement plant 1	0,53	530	3,8	0,1210	0,05	0,49
CEM II/A-V 42,5 R – cementownia/cement plant 2	0,54	540	4,0	0,1180	0,06	0,51
CEM II/B-V 32,5 R – cementownia/cement plant 1	0,53	535	3,9	0,1239	0,05	0,45
CEM II/B-V 42,5 N – cementownia/cement plant 2	0,53	545	4,3	0,1273	0,06	0,46
CEM II/A-LL 42,5 R – cementownia/cement plant 3	0,53	600	4,8	0,1297	0,04	0,93
CEM II/B-M(V-LL) 32,5R – cementownia/cement plant 3	0,53	575	4,5	0,1346	*	0,40
CEM V/A (S-V) 32,5R – cementownia/cement plant 4	0,53	550	4,4	0,1274	0,06	0,45

* Przy zmniejszeniu wilgotności z 30% do 6% suchej masy nastąpił wzrost wyników liniowych

* At reduction of water content from 30% to 6% with respect to the dry mass the increase of linear dimensions was observed

rej dojrzewały przez 4 h, w temperaturze około 55°C. W tym okresie prowadzono monitoring procesu wyrastania i wiązania masy, jej wytrzymałości i temperatury.

W drugiej serii prób w składzie mieszanki uwzględniono stosunek CaO/SiO₂ (C/S), a jako cement wzorcowy stosowano cement portlandzki CEM I 32,5R z cementowni 1. W oparciu o skład chemiczny tego cementu ustalono stosunek CaO/SiO₂ w betonie, wynoszący 0,46. Przy zastosowaniu kolejnych cementów tak przeliczono ilość cementu i wapna, aby stosunek C/S wynosił zawsze 0,46. Próby technologiczne prowadzono analogicznie jak poprzednio. Próby technologiczne wytwarzania ABK z zastosowaniem zarówno wzorcowych cementów portlandzkich CEM I, jak i cementów z dodatkami mineralnymi, wykazał brak zasadniczych różnic w procesie wyrastania i wiązania masy, z wyjątkiem szybszego przyrostu wytrzymałości masy zarobowej betonu komórkowego w przypadku cementu portlandzkiego CEM I 42,5R (cementownia 2) oraz cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 42,5N (cementownia 2). Po stwardnieniu masę betonu komórkowego poddano autoklawizacji. Długość cyklu wynosiła 12 h, a maksymalne ciśnienie 1,0 MPa. Po procesie autoklawizacji elementy betonowe rozformowano i wstępnie oceniono wizualnie, stwierdzając ich prawidłowy wygląd. Następnie przeprowadzono badania wybranych właściwości fizycznych otrzymanych betonów.

3. Właściwości betonu komórkowego

Zbadano następujące właściwości betonów:

- gęstość - według PN-EN 772-13:2001,
- wytrzymałość na ściskanie - według PN-EN 772-1:2001,
- skurcz - według PN-EN 680:2008,
- odporność na mróz - według PN-89/B-06258 p. 5.10,
- współczynnik przewodzenia ciepła - według PN ISO 8301:1998.

mixtures the cement and lime contents were calculated to attain this constant C/S value. The production of autoclaved cellular concretes was performed analogously as in the case of the first series of experiments. The control of the autoclaved cellular concrete manufacturing process did not reveal any significant changes as the growing, setting, strength development and temperature of matured materials was concerned, except of the more intense strength development in the case cellular concrete produced from CEM I 42,5R (cement plant 2) and CEM II/B-V 42,5N (cement plant 2). The hardened products were subjected to autoclaving during 12h cycle at maximum pressure 1,0 MPa. The autoclaved elements were de-mould and assessed visually; the samples were shaped correctly. Then the physical properties of concretes thus produced were determined.

3. Properties of autoclaved cellular concrete

The following properties of autoclaved cellular concretes were determined:

- density - according to PN-EN 772-13:2001 standard,
- compressive strength - according to PN-EN 772-1:2001 standard,
- shrinkage - according to PN-EN 680:2008 standard,
- freeze - thaw resistance - according to PN-89/B-06258 standard p. 5.10,
- thermal conductivity factor - according to PN ISO 8301:1998 standard.

In Table 3 the mean values of features found for the autoclaved cellular concretes in the first series of experiments are shown and in Table 4 - the results from the second series of experiments respectively.

Tablica 4 / Table 4

Właściwości fizyczne ABK – druga seria prób

Physical properties of autoclaved cellular concretes – second series of experiments

Rodzaj Cementu Type of cement	w/s	ρ kg/m ³	$R_{k\perp}$ MPa	λ W/m·K	Odporność na mróz Freeze - thaw resistance		Skurcz Shrinkage	
					Zmiana R_k Change of R_k	Zmiana masy Change of mass	30-6%	całkowity total
					%	%	mm/m	
CEM I 32,5 R - cementownia/cement plant 1	0,53	575	3,8	0,1264	-	-	0,09	1,15
CEM I 42,5 R - cementownia/cement plant 2	0,53	595	4,7	0,1301	-	-	0,09	0,94
CEM II/A-V 42,5 R - cementownia/cement plant 1	0,53	605	4,9	-	-	-	*	0,45
CEM II/A-V 42,5 R - cementownia/cement 2	0,53	580	4,7	0,1276	-7	-1,2	0,01	0,44
CEM II/B-V 32,5 R - cementownia/cement plant 1	0,53	580	4,3	0,1308	-4	-1,1	*	0,35
CEM II/B-V 42,5 N - cementownia/cement plant 2	0,53	595	5,3	0,1363	-14	-1,0	0,01	0,38
CEM II/A-LL 42,5 R - cementownia/cement plant 3	0,53	610	5,4	0,1371	-18	-1,2	0,01	0,77
CEM II/B-M(V-LL) 32,5R - cementownia/cement plant 3	0,53	615	5,1	0,1392	-7	-2,0	*	0,35
	0,50	605	4,9	0,1411	-29	-2,7	0,01	0,42
CEM V/A (S-V) 32,5R - cementownia/cement plant 4	0,53	630	4,4	0,1481	-9	-0,5	0,01	0,43

* Przy zmniejszeniu wilgotności z 30% do 6% suchej masy nastąpił wzrost wyników liniowych

* At reduction of water content from 30% to 6% with respect to the dry mass the increase of linear dimensions was observed

W tablicy 3 przedstawiono wartości średnie uzyskanych właściwości ABK uzyskanego w pierwszej serii prób, a w tablicy 4 wyniki dla drugiej serii.

4. Wnioski

Uzyskane wyniki badań właściwości betonu komórkowego pozwalają na dokonanie następującego podsumowania:

- wytrzymałość na ściskanie betonów komórkowych wykonanych z cementów portlandzkich popiołowych CEM II/A-V oraz CEM II/B-V, były wyższe o około 8% (przy sprowadzeniu do tej samej gęstości) niż uzyskanych wzorcowych cementów portlandzkich CEM I. Również wytrzymałość ABK z cementu wieloskładnikowego żużlowo-popiołowego CEM V/A(S-V) była większa od tych ostatnich o około 14%,
- skurcz ABK (zarówno przy spadku wilgotności z 30% do 6% jak i skurcz całkowity) wytworzony z wszystkich badanych cementów z dodatkami mineralnymi był mniejszy niż w elementach z wzorcowych cementów portlandzkich CEM I. Natomiast w przypadku ABK wykonanego z cementu portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL i wieloskładnikowego popiołowo-wapiennego CEM II/B-M(V-LL) skurcz przy spadku wilgotności z 30 % do 6% masy następowało zwiększenie wymiarów liniowych próbek.

4. Conclusions

The following conclusions can be drawn from the results presented above:

- the compressive strength of cellular concrete produced from portland fly ash cement CEM II/A-V and CEM II/B-V is about 8% higher (for the same density) than the strength of concrete produced from reference portland cement type CEM I. The compressive strength of cellular concrete produced from blended slag - fly ash cement type CEM V/A(S-V) is about 14% higher
- the shrinkage of autoclaved cellular concretes (both at reduction of water content from 30% to 6% with respect to the dry mass and the total shrinkage) was lower in the case of all the concretes produced from cements with mineral additives, with respect to the reference portland cement CEM I. On the other side, in the case of concretes produced from the portland limestone cement CEM II/A-LL and blended, limestone - fly ash cement CEM II/B-M(V-LL) the shrinkage, at reduction of water content from 30% to 6% with respect to the dry mass, the expansion was observed instead of the shrinkage
- the frost resistance of cellular concrete produced from portland fly ash cement CEM II/A-V and CEM II/B-V is very similar to that observed in case of reference concrete produced from reference portland cement type CEM I. The cellular concrete

- odporność na mróz betonów komórkowych wykonanych z cementów portlandzkich popiołowych CEM II/A-V i CEM II/B-V była na takim samym poziomie jak w przypadku betonów wzorcowych z cementów portlandzkich CEM I. Dobrą mrozoodporność miał ABK z cementu wieloskładnikowego żużlowo – popiołowego,
- największy spadek wytrzymałości po cyklach zamrażania wykazał beton z cementu portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL. Również ubytki masy tego betonu były w zasadzie największe,
- wszystkie próbki ABK miały współczynnik przewodzenia ciepła λ w stanie suchym, spełniający wymagania normowe, które dla gęstości od 500 do 600 kg/m³ stawiają wymaganie aby nie był on wyższy niż 0,15 W/m·K. Zaznacza się jednak tendencja do występowania nieco większych wartości λ w przypadku ABK z cementów z dodatkami mineralnymi. W tej grupie betonów najkorzystniejsze wartości λ mają betony z cementów portlandzkich popiołowych CEM II/A-V i CEM II/B-V. Potwierdzenie tego zjawiska wymaga jednak przeprowadzenia badań na większej ilości próbek ABK.

produced from blended slag - fly ash cement type CEM V/A(S-V) exhibits very good frost resistance. The highest strength decrease is found for the concrete produced from portland limestone cement CEMII/A-LL; the loss of mass is the highest in this case too.

- the thermal conductivity factor λ at dry state for all the samples complies with the requirements. At the density from 500 to 600 kg/m³ it should not exceed 0,15 W/m·K. There are, however, a little higher values in the case of concretes produced from the cements with mineral additives. The lowest values are found for of cellular concrete produced from portland fly ash cement CEM II/A-V and CEM II/B-V; these results should be verified on a larger part of cellular concrete samples.

Literatura / References

1. G. Zapotoczna-Sytek, J. Małolepszy, *Zrównoważony rozwój a proces wytwarzania i stosowania elementów z betonu komórkowego*, Materiały Konferencji Dni Betonu – tradycja i Nowoczesność, Wisła, s. 867-878.
2. L. Czarniecki, M. Kaproń, M. Piasecki, S. Wal, *Budownictwo zrównoważone budownictwem przyszłości*. Inżynieria i Budownictwo, 1 (2012).
3. G. Zapotoczna-Sytek, *AAC based on fly Ash in the strategy of sustainable development*, 4th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete. Innovation and Development, Ed M. C. Limbachiya, J. J. Roberts. London, p. 257-264.
4. G. Zapotoczna-Sytek, *60 lat betonu komórkowego w Polsce*. Konferencja Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność 11-13 października 2010 Wisła, s. 609-621, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010.
5. G. Zapotoczna-Sytek, M. Soboń, *60 lat betonu komórkowego w Polsce. Historia i przyszłość*. 5. Międzynarodowa Konferencja dotycząca Autoklawizowanego Betonu Komórkowego „Zapewnienie zrównoważonego rozwoju”, s. 27-42, Bydgoszcz, 14-17 września 2011.
6. M. Skorniewska, G. Zapotoczna-Sytek, *Zastosowanie cementów CEM II i CEM V do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK)*, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, nr 7, s. 163-182, Warszawa – Opole 2011.
7. G. Zapotoczna-Sytek, M. Skorniewska, K. Łaskawiec, A. Michalik, A. Garbacik, *Zastosowanie cementów wieloskładnikowych do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK)* Sprawozdanie, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Betonów – CEBET, Warszawa 2010.
8. Materiały Cementowni Góraźdże: *Cement portlandzki wieloskładnikowy CEMII/B-M(S-V) 32,5R i wieloskładnikowy CEMV/A(S-V)32,5R-LH. Właściwości i zastosowanie*.
9. A. Garbacik, Z. Giergiczny, *Efekt synergii dodatków mineralnych w składzie cementów wieloskładnikowych*. XII Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cement-właściwości i zastosowanie”, Reologia w technologii betonu, Gliwice 2010.
10. A. Garbacik, S. Chłędzyński, *Cementy wieloskładnikowe w budownictwie*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2008.
11. H. Jatymowicz, J. Siejko, G. Zapotoczna-Sytek, *Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego*. Arkady, Warszawa 1980.
12. PN-EN 197-1 *Cement. Część 1: Skład wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku*.
13. W. Kurdowski, *Chemia cementu i betonu*. Stowarzyszenie Producentów Cementu Kraków 2010, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2010.