

MARTA SKORNIIEWSKA\*  
GENOWEFA ZAPOTOCZNA-SYTEK\*\*

## Zastosowanie cementów CEM II i CEM V do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK)

W artykule przedstawiono możliwości stosowania cementów wieloskładnikowych do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK). W zakresie technologii ABK praca ma charakter nowatorski. Obok rozwiązań praktyczno-technologicznych przedstawiono wyniki badań składu fazowego i mikrostruktury ABK, produkowanego przy stosowaniu różnych cementów wieloskładnikowych, zawierających duże ilości dodatków mineralnych. Wyniki pracy stanowią istotny wkład wiedzy w zakresie technologii ABK. Realizacja tematu stwarza przesłanki wdrożenia w technologii betonu komórkowego stosowania cementów wieloskładnikowych w miejsce obecnych rozwiązań z wykorzystaniem cementu portlandzkiego CEM I.

### 1. Wstęp

Rozwój produkcji i stosowania cementów z dodatkami mineralnymi w Polsce i na świecie jest bardzo intensywny. W krajach Unii Europejskiej wielkość produkcji takich cementów osiąga poziom 70%. Celowość rozwijania produkcji cementów z dodatkami mineralnymi leży przede wszystkim w znacznym zmniejszeniu emisji CO<sub>2</sub>. Wielkość produkcji cementu musi być realizowana z uwzględnieniem limitów emisji CO<sub>2</sub>.

Zwiększenie udziału dodatków mineralnych w składzie cementu, a co za tym idzie ograniczenie udziału klinkieru jest podstawowym rozwiązaniem stwarzającym możliwość znacznego obniżenia emisji dwutlenku węgla przez przemysł cementowy [1]. Porównanie zużycia energii wypada zdecydowanie na korzyść produkcji cementu z dodatkami [2]. Szeroka dostępność cementów z dodatkami

---

\* Mgr inż. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie.

\*\* Prof. ICiMB dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Centrum Badań Betonów CEBET w Warszawie.

oraz ich właściwości powodują, że są to coraz częściej stosowane spoiwa w produkcji betonu towarowego, produkcji prefabrykatów drobno- i wielkogabarytowych, obiektów inżynierskich oraz w produkcji betonów nowej generacji [3].

Cementy z dodatkami mineralnymi [9–10] są produkowane zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 197-1:2002 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”, która obejmuje szeroką grupę cementów wieloskładnikowych zawierających obok klinkieru portlandzkiego jeden lub więcej dodatków [4]. Norma ta wymienia osiem innych niż klinkier portlandzki składników głównych cementów powszechnego użytku: granulowany żużel wielkopiecowy „S”, pucolanę naturalną „P”, pucolanę naturalną wypalaną „Q”, popiół lotny krzemionkowy „V”, popiół lotny wapienny „W”, lupek palony „T”, kamień wapienny (L, LL), oraz pył krzemionkowy „D”. Do najczęściej stosowanych dodatków mineralnych w Polsce należą krzemionkowy popiół lotny, granulowany żużel wielkopiecowy oraz kamień wapienny.

Tabela 1

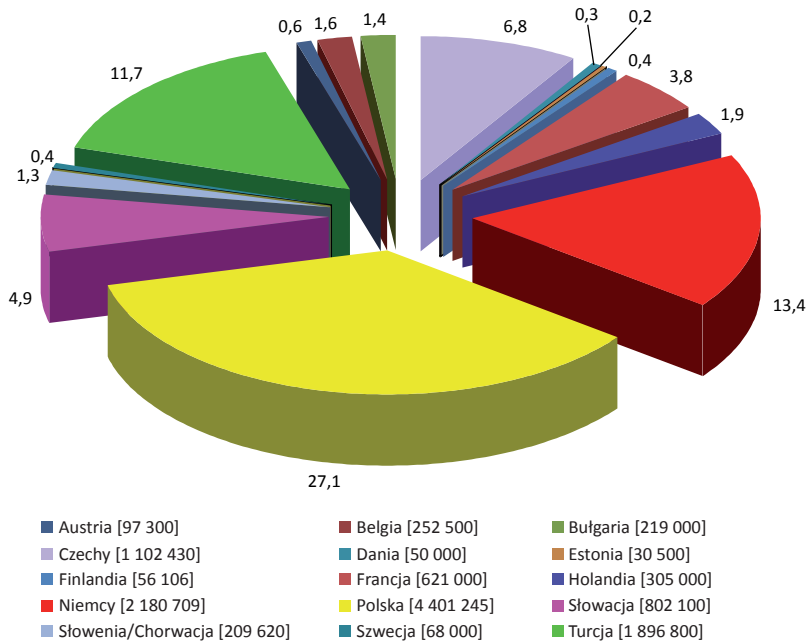
*Asortyment cementów wieloskładnikowych wytwarzanych w Polsce (dane SPC za 2009 r.)*

Rodzaj cementu		Odmiana – klasa wytrzymałości
Cementy portlandzkie CEM II	cement portlandzki popiołowy CEM II/V	CEM II/A-V 32,5R CEM II/A-V 42,5R CEM II/B-V 32,5R CEM II/B-V 32,5R HSR
	cement portlandzki żużłowy CEM II/S	CEM II/A-S 42,5N CEM II/B-S 32,5R CEM II/B-S 42,5N CEM II/B-S 42,5 N-NA CEM II/B-S 42,5R CEM II/B-S 52,5N
	cement portlandzki wapienny CEM II/LL	CEM II/A-LL 42,5R
	cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/M	CEM II/B-M(V-LL) 32,5R CEM II/B-M(S-V) 32,5R CEM II/A-M(S-LL)52,5N
Cement wieloskładnikowy CEM V	cement wieloskładnikowy CEM V/S-V	CEM V/A (S-V) 32,5N-LH

W tabeli 1 przedstawiono asortyment cementów wieloskładnikowych produkowanych przez krajowy przemysł cementowy

Polska jest największym producentem autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) w Europie (ryc. 1). Dzięki prowadzonym pracom badawczo-wdrożeniowym opracowano i wdrożono wiele polskich technologii wytwarza-

nia ABK zarówno w kraju, jak i za granicą [7]. Chcąc utrzymać wysoki poziom technologii ABK, konieczna jest kontynuacja prac badawczych w zakresie zaawansowanych technologii. Jednym z ważnych wyzwań jest wykorzystanie cementów wieloskładnikowych w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego. Zastosowanie takich cementów pozwoliłoby na dalszy rozwój technologii ABK, a w ujęciu rachunku ciągnionego analizy efektywności prowadziłyby przemysł cementowy – przemysł betonu komórkowego do ograniczenia emisji CO<sub>2</sub> na jednostkę produktu finalnego ABK.



Ryc. 1. Produkcja ABK w Europie w 2009 r. [6]

## 2. Badanie właściwości fizykochemicznych cementów wieloskładnikowych

W artykule zaprezentowano właściwości fizykochemiczne wytypowanych cementów wieloskładnikowych wg PN-EN 197-1:2002. Wyniki badań właściwości cementów, w połączeniu z danymi z prób wytwarzania ABK w hali doświadczalnej Oddziału Betonów CEBET, będą stanowić podstawę doboru cementów wieloskładnikowych do dalszych prób i badań wdrożeniowych z zastosowaniem tych cementów w technologii ABK.

Doboru cementów do badań, wspólnie z Oddziałem Szklą i Materiałom Budowlanych w Krakowie, dokonano na podstawie analizy krajowego rynku ce-

mentowego. Analiza ta obejmowała wszystkich producentów cementu w Polsce oraz produkowane przez przemysł cementowy rodzaje, odmiany i klasy wytrzymałości cementów. W doborze cementów uwzględniono również wiedzę o cementach stosowanych obecnie w wytwórniach betonu komórkowego [8].

Do prób badawczych wytypowano następujące cementy:

#### **Cementy odniesienia:**

1. Cement portlandzki CEM I 32,5R – cementownia 1,
2. Cement portlandzki CEM I 42,5R – cementownia 2.

#### **Cementy do prób badawczych:**

1. Cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V 42,5R – cementownia 1,
2. Cement portlandzki popiołowy CEM II/A-V 42,5R – cementownia 2,
3. Cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 32,5R – cementownia 1,
4. Cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2,
5. Cement portlandzki wapienny CEM II/A-LL 42,5R – cementownia 3,
6. Cement portlandzki wieloskładnikowy CEM II/B-M (V-LL) 32,5R – cementownia 3,
7. Cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5R – cementownia 4.

Zakres badań wytypowanych cementów obejmował następujące oznaczenia:

- uziarnienie – powierzchnia właściwa wg Blaine’a;
- właściwości fizyczne zaczynów i zapraw cementowych: wodożądność i czas wiązania według PN-EN 196-3, wytrzymałości zapraw po 2, 7 i 28 dniach według PN-EN 196-1, konsystencja według PN-EN 1015-3;
- wytrzymałości na ściskanie zaczynów po procesie autoklawizacji w temperaturze 216°C, pod ciśnieniem 2 MPa oraz określenie zawartości wolnego CaO;
- badania składu chemicznego cementów.

Wyniki wymienionych badań zamieszczono w tabelach 2–4. Na rycinie 2 przedstawiono wytrzymałości zapraw cementowych po 2, 7 i 28 dniach twardnienia.

Tabela 2

Właściwości fizyczne cementów [8]

Rodzaj cementu	Powierzchnia właściwa [cm <sup>2</sup> /g]	Wytrzymałość [MPa]						Czas wiązania [h <sup>min</sup> ]		H <sub>2</sub> O [%]	Rozpływ [cm]
		na zginanie			na ściskanie			początek	koniec		
		2 dni	7 dni	28 dni	2 dni	7 dni	28 dni				
<b>CEM I 42,5R</b> – cementownia 2	3 420	5,2	6,5	7,1	30,0	46,2	54,8	2 <sup>05</sup>	3 <sup>00</sup>	29,2	18,1
CEM II/A-V 42,5R – cementownia 2	3 830	4,6	5,9	6,9	26,6	42,1	51,2	2 <sup>10</sup>	3 <sup>00</sup>	29,0	18,6
CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2	4 640	4,3	5,5	7,3	26,3	40,3	51,1	3 <sup>00</sup>	3 <sup>50</sup>	28,0	17,8
<b>CEM I 32,5R</b> – cementownia 1	3 300	4,2	6,0	6,8	24,1	38,1	46,8	2 <sup>20</sup>	3 <sup>25</sup>	26,1	19,0
CEM II/A-V 42,5R – cementownia 1	4 300	4,2	6,2	7,2	26,0	39,5	51,9	3 <sup>20</sup>	4 <sup>25</sup>	27,5	17,4
CEM II/B-V 32,5R – cementownia 1	3 820	3,6	4,9	6,4	19,1	30,3	45,9	2 <sup>10</sup>	3 <sup>10</sup>	31,1	18,9
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH – cementownia 4	3 680	2,6	4,6	7,0	13,7	25,7	45,4	3 <sup>30</sup>	5 <sup>15</sup>	29,4	17,5
CEM II/A-LL 42,5R – cementownia 3	5 100	4,6	6,1	7,2	25,5	42,0	50,9	3 <sup>10</sup>	3 <sup>50</sup>	31,1	16,4
CEM II/B-M (V-LL) 32,5R – cementownia 3	5 650	4,2	4,5	5,8	14,2	26,5	38,3	2 <sup>20</sup>	3 <sup>20</sup>	27,5	17,1

T a b e l a 3

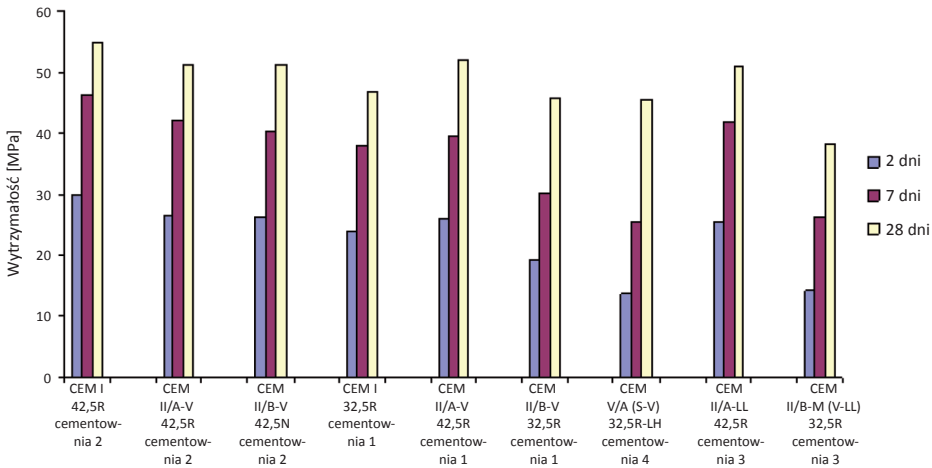
Wytrzymałość i zawartość wodorotlenku wapnia oznaczone  
w zaczynach cementowych po autoklawizacji [8]

Rodzaj cementu	Wytrzymałość zaczynu na ściskanie po autoklawizacji* [MPa]	Zawartość wodorotlenku wapniowego** [%]
<b>CEM I 42,5R</b> – cementownia 2	<b>50,5</b>	<b>10,71</b>
CEM II/A-V 42,5R – cementownia 2	42,9	5,43
CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2	34,7	2,83
<b>CEM I 32,5R</b> – cementownia 1	<b>40,9</b>	<b>8,05</b>
CEM II/A-V 42,5R – cementownia 1	47,3	4,20
CEM II/B-V 32,5R – cementownia 1	42,3	2,70
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH – cementownia 4	54,5	1,74
CEM II/A-LL 42,5R – cementownia 3	14,8	8,01
CEM II/B-M (V-LL) 32,5R – cementownia 3	25,5	6,20

\* Wykonano beleczki o wymiarach 4 x 4 x 16 cm z zaczynów cementowych, które po 24 godzinach przechowywania w szafie klimatycznej są rozformowywane i umieszczane w autoklawie, przy ciśnieniu 2 MPa. Następnie ma miejsce nagrzewanie ok. 1 h do temperatury 216°C, w której próbka przebywa 3 h. Po tym czasie autoklaw jest wyłączany i próbka się chłodzi w autoklawie ok. 1 h do temperatury ok. 100°C. Potem próbka jest wyjmowana i chłodzona wodą 15 min do temperatury ok. 23°C. Następnie próbka przebywa jeszcze 15 min w tej temperaturze i wówczas poddawana jest badaniom wytrzymałościowym.

\*\* Oznaczenie metodą glikolową.

Przedstawione w tabelach wyniki badań wskazują na bardzo wysoką jakość cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/A-V, zarówno z cementowni 2, jak i z cementowni 1, o zawartości popiołu do 20%. Wytrzymałość tego cementu, wczesna po 2 i końcowa po 28 dniach twardnienia jest zbliżona lub wyższa niż cementu portlandzkiego (odniesienia) CEM I z cementowni 1. Również cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V o zawartości popiołu do 35% charakteryzuje



Ryc. 2. Wytrzymałość zapraw cementowych [8]

się bardzo dobrą wytrzymałością wczesną i końcową. Cement wieloskładnikowy popiołowo-żużłowy CEM V/A, zawierający do 50/% dodatków, przy niskiej wytrzymałości wczesnej, wykazuje stosunkowo dużą wytrzymałością 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 dużego rozdrobnienia cementów i reakcji pucolanowej popiołu z wodorotlenkiem wapnia będącego produktem reakcji hydratacji minerałów klinkierowych (alitu i belitu). Wydajność reakcji pucolanowej może być ważnym czynnikiem kształtującym przydatność cementów popiołowych w technologii ABK. Pod tym kątem należy przeanalizować wyniki badań zaczynów po autoklawizacji. Miarą wydajności reakcji pucolanowej w procesie twardnienia jest spadek zawartości niezwiązanego  $\text{Ca(OH)}_2$  w stosunku do zaczynów przygotowanych z cementu odniesienia CEM I.

Badania cementów portlandzkich – wapiennego i popiołowo-wapiennego, uwzględniając badania zaczynów po autoklawizacji – nie wykazują korzystnego wpływu wapienia na procesy twardnienia w warunkach podwyższonych temperatur i ciśnienia.

Tabela 4

Skład chemiczny cementów i udział w nich poszczególnych składników [8]

Składnik	CEM I 42,5R cementowania 2	CEM II/A-V 42,5R cementowania 2	CEM II/B-V 42,5N cementowania 2	CEM I 32,5R cementowania 1	CEM II/A-V 42,5R cementowania 1	CEM II/B-V 32,5R cementowania 1	CEM V/A (S-V) 32,5R-LH cementowania 4	CEM II/A-LL 42,5R cementowania 3	CEM II/B-M (V-LL) 32,5R cementowania 3
Strata prażenia	3,22	4,05	4,08	2,91	3,31	3,48	1,27	6,88	11,17
Części nierozpuszczalne	-	12,25	17,57	-	12,18	20,78	14,70	-	7,10
SiO <sub>2</sub>	17,75	21,90	24,24	18,85	26,47	27,03	30,44	17,26	17,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,89	7,57	9,49	4,57	7,75	10,29	9,07	4,78	5,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,22	3,54	3,76	2,24	2,81	3,32	3,09	2,88	2,80
CaO	64,49	56,08	50,70	65,13	54,64	48,08	48,34	60,58	55,81
MgO	1,70	1,72	1,97	1,70	2,68	2,00	2,79	2,75	2,29
SO <sub>3</sub>	3,28	3,07	3,10	2,93	3,72	3,07	2,76	3,54	2,93
K <sub>2</sub> O	0,66	0,97	1,28	0,98	1,25	1,43	1,05	0,35	0,65
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,37	0,41	0,16	0,28	0,36	0,43	0,24	0,26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,27	0,35	0,22	0,29	0,31	0,11	0,18	0,17
TiO <sub>2</sub>	0,25	0,37	0,45	0,22	0,36	0,48	0,45	0,26	0,26
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,07	0,07	0,03	0,04	0,05	0,12	0,07	0,19
CaO <sub>w</sub>	1,65	2,22	1,78	2,36	1,82	2,04	1,18	1,93	1,97
Zawartość wapienia	4,50	4,50	4,50	3,00	4,50	4,00	-	15,00	20,90
Zawartość popiołu	-	17,68	20,48	-	15,60	26,60	18,80	-	9,10
Zawartość żuźla	-	-	-	-	-	-	34,00	-	-
Zawartość CaSO <sub>4</sub>	5,00	5,50	5,30	4,80	5,10	4,20	4,00	5,80	4,20



### 3. Próby technologiczne wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego z zastosowaniem wytypowanych cementów

Część doświadczalną wytwarzania ABK przeprowadzono w halach doświadczalnych Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych Oddział Betonów – CEBET w Warszawie.

Próby technologiczne wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego z zastosowaniem cementów z dodatkami mineralnymi rozpoczęto od opracowania odpowiednich receptur dla betonu komórkowego o gęstości  $600(\pm 50)$  kg/m<sup>3</sup>. We wszystkich próbach laboratoryjnych przyjęto technologię SW. W technologii SW wapno palone i cement, stanowiące spoiwo betonu komórkowego, stosowane są do produkcji bez dodatkowej obróbki. Jako kruszywo wykorzystany jest szlam piaskowy, uzyskany przez wspólny przemiał piasku z wodą w młynie kulowo-rurowym.

W skład mieszaniny surowcowej wchodzi dodatkowo: środek porotwórczy, woda korekcyjna oraz środek powierzchniowoczynny. Mieszanina tych składników, zwana mieszanką zarobową, wlana do formy wyrasta, ulegając spulchnieniu, a następnie twardnieniu. Rozproszony w masie środek porotwórczy, aluminium, w alkalicznym środowisku zarobu wydziela wodór, który tworzy pory. Tworzenie się mikrostruktury porowatej musi być zsynchronizowane w czasie z przyrostem sztywności szkieletu. Synchronizacja ta jest bardzo istotnym problemem produkcji betonu komórkowego, gdyż gazowanie zdecydowanie wyprzedzające twardnienie spowodować może ucieczkę wytworzonego gazu z wnętrza świeżej masy, uszkadzając jej mikrostrukturę. Gazowanie opóźnione powoduje niedostateczny wyrost i również nieprawidłową mikrostrukturę materiału [7].

W przeprowadzonych próbach laboratoryjnych założono, że dominującym składnikiem w spoiwie będzie cement. W pierwszych próbach laboratoryjnych zmienną był rodzaj cementu, a stosunki ilościowe poszczególnych składników mieszanki pozostawały bez zmian. Odlewy betonu komórkowego wykonywano w formach 24 x 24 x 49 cm. Podczas wykonywania prób określano za pomocą aparatu Gardnera rozlewność wylewanej do form masy zarobowej. Na tej podstawie wprowadzano ewentualnie korektę zawartości wody w recepturze, starając się utrzymać rozlewność w granicach 100–105 mm. Określano również temperaturę wylewanej do formy masy (temperatura początkowa). Odlewy z masą zarobową wprowadzane były do podgrzewanej komory, gdzie przebywały przez ok. 4 h w temperaturze ok. 55°C (ryc. 3). W tym czasie prowadzony był monitoring procesu wyrastania i wiązania masy (wyrost masy, temperatura końcowa i twardość).



Ryc. 3. Odlewy betonu komórkowego wg pierwszego wariantu recepturowego dojrzewające w komorze

W kolejnej serii prób w opracowanych recepturach uwzględniono stosunek masy  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  (C/S). Cementem odniesienia był cement portlandzki CEM I 32,5R z cementowni 1. Na podstawie składu chemicznego tego cementu określono stosunek  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,46$ . Przy zastosowaniu kolejnych cementów tak przeliczano ilość cementu i wapna, aby stosunek C/S wynosił zawsze 0,46. Sposób prowadzenia prób technologicznych był analogiczny jak poprzednio.

Przebieg prób technologicznych wytwarzania ABK z zastosowaniem zarówno cementów portlandzkich (odniesienia), jak i cementów z dodatkami mineralnym wykazał brak zasadniczych różnic w procesie wyrastania i wiązania masy, z wyjątkiem szybszego przyrostu twardości masy zarobowej betonu komórkowego z zastosowaniem cementu portlandzkiego CEM I 42,5R (cementownia 2) oraz cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 42,5N (cementownia 2).

#### 4. Właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK)

Po stwardnieniu masę betonu komórkowego poddano autoklawizacji. Jej warunki były następujące:

- przedmuchi (0,1–0,12 MPa) – 15 min,
- podniesienie ciśnienia do ok. 0,98–1,0 MPa – 120 min,
- utrzymanie ciśnienia 1,0 MPa ( $t_{\text{max}} = 190^\circ\text{C}$ ) – 480 min,
- spadek ciśnienia do atmosferycznego do ok. 0,1 MPa – 105 min.

Po procesie autoklawizacji nastąpiło rozformowanie i wstępna ocena mikrostruktury betonów komórkowych. Następnie przeprowadzono badania wybranych własności fizykotechnicznych oraz mikrostruktury i składu fazowego ABK.

#### 4.1. Własności fizykotechniczne

Dla wytypowanych betonów przeprowadzono następujące badania:

- gęstość – według PN-EN 772-13:2001 „Metody badań elementów murowych – Część 13: Określenie gęstości netto i gęstości brutto elementów murowych w stanie suchym”;
- wytrzymałość na ściskanie – według PN-EN 772-1:2001 „Metody badań elementów murowych – Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie”;
- skurcz – według PN-EN 680:2008 „Oznaczanie skurczu przy wysychaniu autoklawizowanego betonu komórkowego”;
- mrozoodporność – według PN-89/B-06258 p 5.10 „Autoklawizowany beton komórkowy”;
- współczynnik przewodzenia ciepła – według PN ISO 8301:1998 „Izolacja cieplna – Określanie oporu cieplnego i właściwości z nim związanych w stanie ustalonym – Aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego”.

W tabeli 5 przedstawiono wartości średnie oznaczonych właściwości fizykotechnicznych ABK według I wariantu recepturowego, a w tabeli 6 wyniki dla II wariantu recepturowego.

Tabela 5

Właściwości fizykotechniczne ABK (pierwszy wariant recepturowy) – wartości średnie [8]

Lp.	Rodzaj cementów	w/s	Parametry betonu komórkowego				
			$\rho_{sr}$	$R_{k+sr}$	$\lambda_{sr}$	skurcz	
						30-6%	całkowity
						mm/m	
<b>1</b>	<b>CEM I 32,5R – cementownia 1</b>	<b>0,53</b>	<b>560</b>	<b>3,8</b>	<b>0,1180</b>	<b>0,13</b>	<b>1,13</b>
<b>2</b>	<b>CEM I 42,5R – cementownia 2</b>	<b>0,53</b>	<b>560</b>	<b>3,9</b>	<b>0,1190</b>	<b>0,13</b>	<b>0,73</b>
3	CEM II/A-V 42,5R – cementownia 1	0,53	530	3,8	0,1210	0,05	0,49
4	CEM II/A-V 42,5R – cementownia 2	0,54	540	4,0	0,1180	0,06	0,51
5	CEM II/B-V 32,5R – cementownia 1	0,53	535	3,9	0,1239	0,05	0,45
6	CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2	0,53	545	4,3	0,1273	0,06	0,46
7	CEM II/A-LL 42,5R – cementownia 3	0,53	600	4,8	0,1297	0,04	0,93
8	CEM II/B-M(V-LL) 32,5R – cementownia 3	0,53	575	4,5	0,1346	*	0,40
9	CEM V/A (S-V) 32,5R – cementownia 4	0,53	550	4,4	0,1274	0,06	0,45

\* Pomiędzy zawartością wilgoci 30% a 6% suchej masy nastąpiło wydłużenie.

Tabela 6

Właściwości fizykotechniczne ABK (drugi wariant recepturowy z uwzględnieniem C/S) [8]

Lp.	Rodzaj cementu	w/s	Parametry betonu komórkowego						
			$\rho$	$R_{k\perp}$	$\lambda$	mrozoodporność		skurcz	
						zmiana $R_{k\perp}$	zmiana masy	30-6%	całkowity
kg/m <sup>3</sup>	MPa	W/m·K							
1	CEM I 32,5R – cementownia 1	0,53	575	3,8	0,1264	–	–	0,09	1,15
2	CEM I 42,5R – cementownia 2	0,53	595	4,7	0,1301	–	–	0,09	0,94
3	CEM II/A-V 42,5R – cementownia 1	0,53	605	4,9	–	–	–	*	0,45
4	CEM II/A-V 42,5R – cementownia 2	0,53	580	4,7	0,1276	-7	-1,2	0,01	0,44
5	CEM II/B-V 32,5R – cementownia 1	0,53	580	4,3	0,1308	-4	-1,1	*	0,35
6	CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2	0,53	595	5,3	0,1363	-14	-1,0	0,01	0,38
7	CEM II/A-LL 42,5R – cementownia 3	0,53	610	5,4	0,1371	-18	-1,2	0,01	0,77
8	CEM II/B-M(V-LL)	0,53	615	5,1	0,1392	-7	-2,0	*	0,35
9	32,5R – cementownia 3	0,50	605	4,9	0,1411	-29	-2,7	0,01	0,42
10	CEM V/A (S-V) 32,5R – cementownia 4	0,53	630	4,4	0,1481	-9	-0,5	0,01	0,43

\* Pomiędzy zawartością wilgoci 30% a 6% suchej masy nastąpiło wydłużenie.

Badania właściwości betonu komórkowego wykazały ich zróżnicowanie w zależności od zastosowanych cementów, i tak:

– wytrzymałości na ściskanie  $R_{k\perp}$  betonów komórkowych wykonanych z zastosowaniem cementów portlandzkich popiołowych CEM II/A-V oraz CEM II/B-V były wyższe o ok. 8% (przy sprowadzeniu do tej samej gęstości) w stosunku do ABK z zastosowaniem cementów portlandzkich (odniesienia) CEM I. Również wytrzymałości ABK z zastosowaniem cementu wieloskładnikowego żużlowo-popiołowego CEM V/A(S-V) były wyższe od ABK na cementach portlandzkich o ok. 14%;

– skurcz ABK (zarówno przy zmianie wilgotności od 30% do 6%, jak i skurcz całkowity) na wszystkich badanych cementach z dodatkami mineralnymi był korzystnie niższy aniżeli ABK na cementach portlandzkich CEM I. Dla ABK wykonanego z zastosowaniem cementu portlandzkiego wapiennego CEMII/A-LL i cementu portlandzkiego wieloskładnikowego popiołowo-wapiennego CEM

II/B-M(V-LL) skurcz był nieciągły przy zmianie wilgotności w zakresie od 30% do 6% masy – występowało chwilowe wydłużenie;

- mrozoodporność betonów komórkowych wykonanych z zastosowaniem cementów portlandzkich popiołowych CEM II/A-V oraz CEM II/B-V była na poziomie ABK z zastosowaniem cementów portlandzkich CEM I. Zadowolającą mrozoodporność miał ABK na cemencie wieloskładnikowym żuźlowo-popiołowym. Największym spadkiem wytrzymałości po badaniu mrozoodporności charakteryzował się ABK z zastosowaniem cementu portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL. Również ubytki masy tego betonu były w zasadzie największe;
- współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$  oznaczony w stanie suchym, we wszystkich próbach ABK, spełniał wymagania normowe, które określają, że dla gęstości ABK od 500 do 600 kg/m<sup>3</sup> nie powinien być on wyższy niż 0,15 W/m·K. Zarysowany jest trend, iż nieco wyższe (mniej korzystne) wartości  $\lambda$  mają ABK z zastosowaniem dodatków mineralnych. Wśród tej grupy betonów najbardziej korzystne wartości  $\lambda$  osiągają betony z zastosowaniem cementów portlandzkich popiołowych CEM II/A-V i CEM II/B-V. Stwierdzenie to wymaga jednak przeprowadzenie badań na większej ilości próbek ABK.

## 4.2. Określenie składu fazowego i mikrostruktury ABK

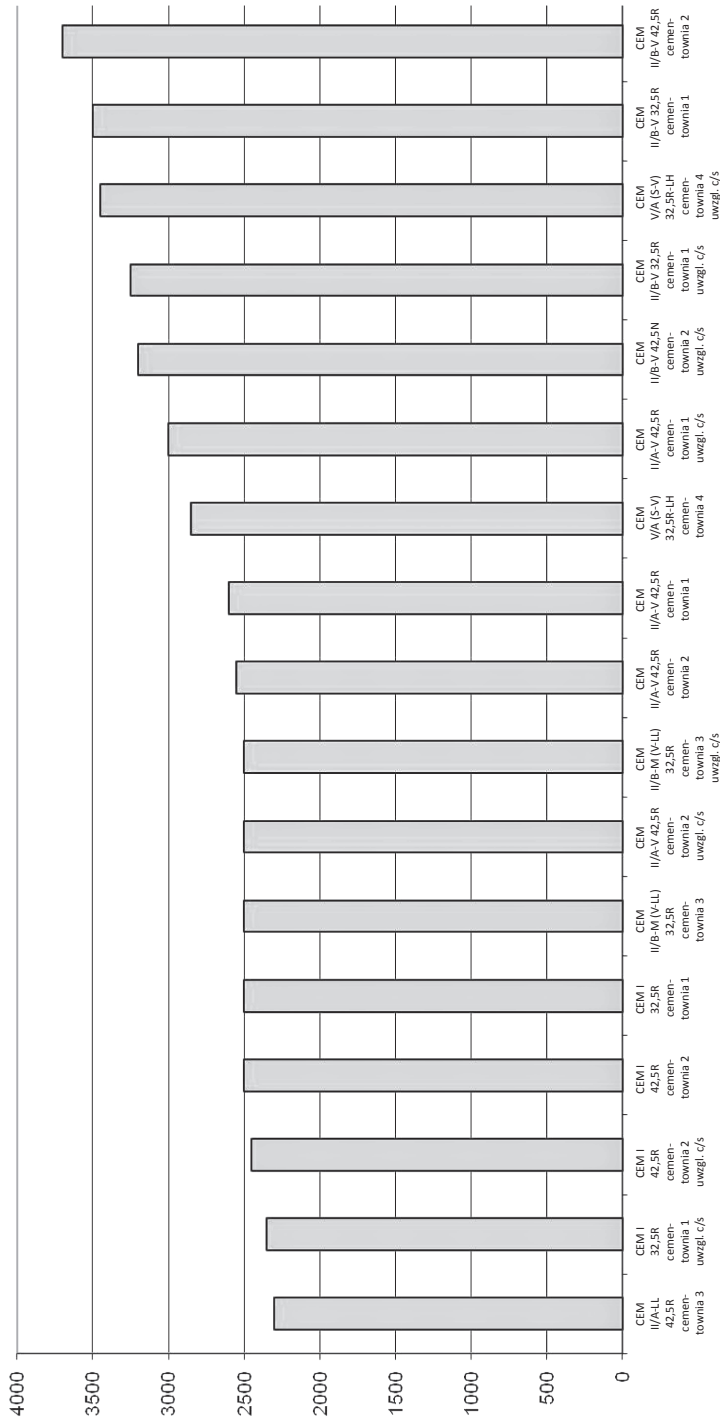
Dla wybranych, na podstawie poprzednich badań, próbek wykonano następujące badania:

- badanie składu fazowego metodą XRD,
- kompleksowa analiza termiczna,
- badania mikroskopowe SEM.

### Badanie składu fazowego metodą XRD

Wyniki badań XRD potwierdzają znaczenie reakcji pucolanowej w kształtowaniu składu fazowego ABK z cementów popiołowych i popiołowo-żuźlowych. Znaczna liczba wykonanych dyfraktogramów wskazuje na zależność udziału fazy C-S-H i hydrogranatów w badanym materiale od rodzaju użytego cementu i wzrost ich zawartości w ABK wytwarzanych z udziałem cementów popiołowych. Stwierdzono duże zróżnicowanie faz tobermorytopodobnych. Zwraca uwagę dominacja amorficznych form C-S-H w produktach hydratacji cementu CEM V o dużej zawartości popiołu i żuźla. Ustalono również występowanie w badanych próbkach faz krystalicznych, tj. kwarcu i kalcytu.

Na podstawie pomiaru intensywności piku odpowiadającego odległości międzypłaszczyznowej  $d = 11,3895 \text{ \AA}$  oszacowano zawartość faz tobermorytopochodnych w próbkach ABK. Na rycinie 4 przedstawiono histogram zależności zawartości tych faz od rodzaju użytego cementu.



Ryc. 4 Histogram zawartości fazy tobermorytopochodnej w próbkach ABK w zależności od użytego rodzaju cementu [8]

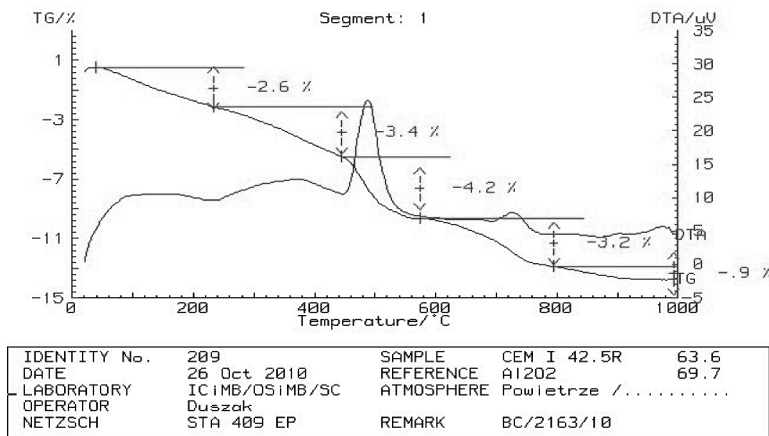
### Analiza termiczna ABK

Badania XRD zostały uzupełnione badaniami ABK wykonanymi metodami termicznej analizy różnicowej (DTA) oraz badaniami termogravimetrycznymi (TG).

Na kolejnych rycinach 5–7 przedstawiono termogramy ABK, do wytworzenia których użyte zostały następujące cementy: cement odniesienia CEM I 42,5R – cementownia 2, cement portlandzki popiołowy CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2 oraz cement wieloskładnikowy żuźlowo-popiołowy CEM V/A (S-V) 32,5N – cementownia 4.

W trakcie badań zaobserwowano następujące efekty:

- endotermiczny efekt związany z rozkładem faz tobermorytopochodnych,
- endotermiczny efekt związany z rozkładem portlandytu,
- egzotermiczny efekt, występujący w cementach zawierających w swoim składzie popiół lotny, związany ze spalaniem węgla wprowadzanym z popiołem z cementu,
- endotermiczny efekt związany z rozkładem kalcytu – produktu karbonatyzacji  $\text{Ca(OH)}_2$  i wapienia obecnego w cemencie.

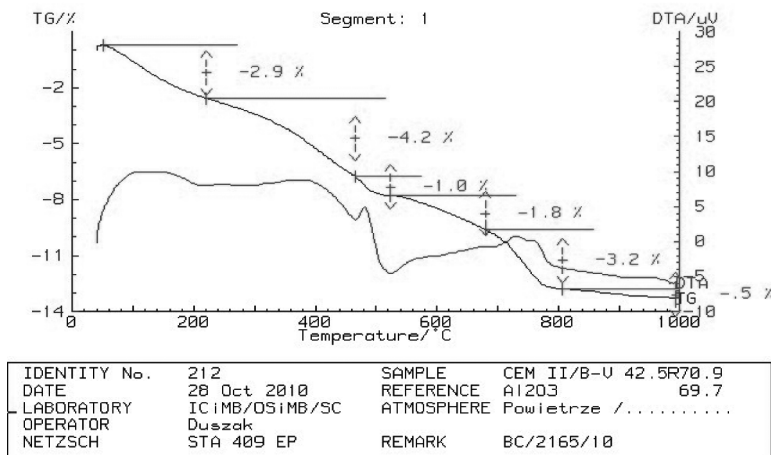


Ryc. 5. Termogram zaczynu po autoklawizacji z cementu CEM I 42,5R – cementownia 2 [8]

Zaznaczone na termogramie (ryc. 5) ubytki masy 2,6% oraz 3,4% związane są głównie z rozkładem faz tobermorytopodobnych. Odpowiada im zaznaczone na krzywej DTA maksimum w temperaturze ok. 240°C. Kolejny ubytek masy próbki (4,2%) jest rezultatem dehydroksylacji portlandytu, którego zawartość w badanym materiale można oszacować na 17,3%. Procesowi temu należy



przyporządkować endotermiczny efekt DTA o maksimum w temperaturze ok. 500°C. Końcowy ubytek masy badanego materiału (3,2%) spowodowany jest rozkładem węglanu wapnia, utworzonego w wyniku karbonatyzacji portlandytu oraz stanowiącego jeden ze składników cementu. Zawartość  $\text{CaCO}_3$  w badanym materiale wynosi 7,3%.

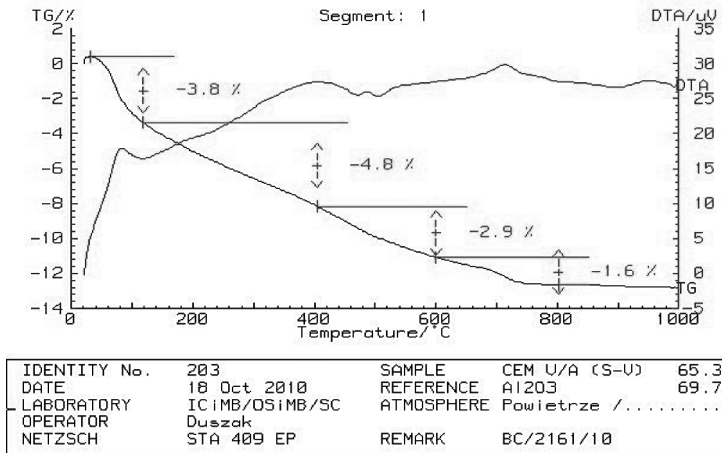


Rys. 6. Termogram zaczynu po autoklawizacji z cementu CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2 [8]

Zaznaczone na rycinie 6 ubytki masy 2,9% oraz 4,2% związane są głównie z rozkładem faz tobermorytopodobnych. Kolejny ubytek masy próbki 1,0% jest rezultatem dehydroksylacji portlandytu. Procesowi temu należy przyporządkować endotermiczny efekt DTA o maksimum w temperaturze ok. 500°C. Wraz z efektem egzotermicznym z maksimum w temperaturze 530°C obserwowany jest następny ubytek masy o 1,8%, który odpowiada spalaniu węgla wprowadzonego z popiołem do cementu. Końcowy ubytek masy badanego materiału (3,2%) spowodowany jest rozkładem węglanu wapnia, utworzonego w wyniku karbonatyzacji portlandytu oraz kalcytu z wapienia z cementu (dodatek drugorzędny w cemencie).

Zaznaczone na termogramie (ryc. 7) ubytki masy 3,8% oraz 4,8% związane są głównie z rozkładem faz tobermorytopodobnych. Wyraźny efekt egzotermicznym z dwoma maksimumami, obserwowany wraz z ubytkiem masy o 2,9%, odpowiada spalaniu węgla wprowadzonego z popiołem do cementu. Końcowy ubytek masy badanego materiału (1,6%) spowodowany jest rozkładem węglanu wapnia, utworzonego w wyniku karbonatyzacji portlandytu oraz kalcytu z wapienia z cementu. Zawartość  $\text{CaCO}_3$  w badanym materiale wynosi 3,6%.



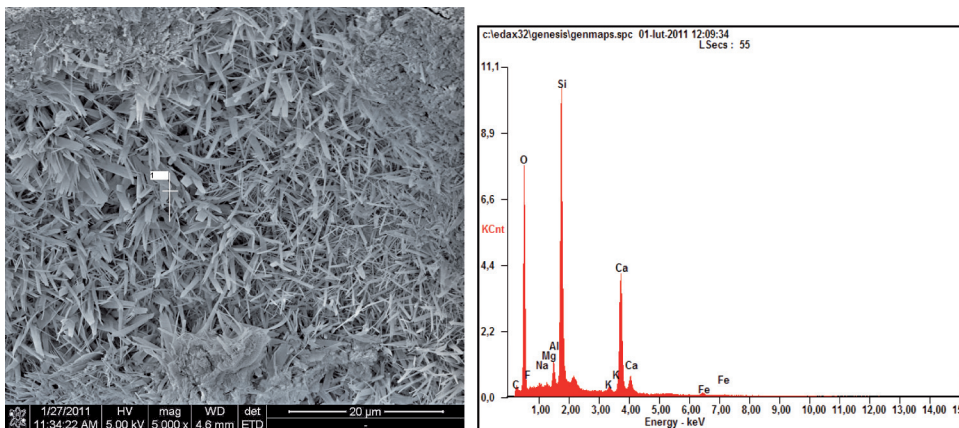


Ryc. 7. Termogram zaczynu po autoklawizacji z cementu CEM V/A (S-V) 32,5N – cementownia 4 [8]

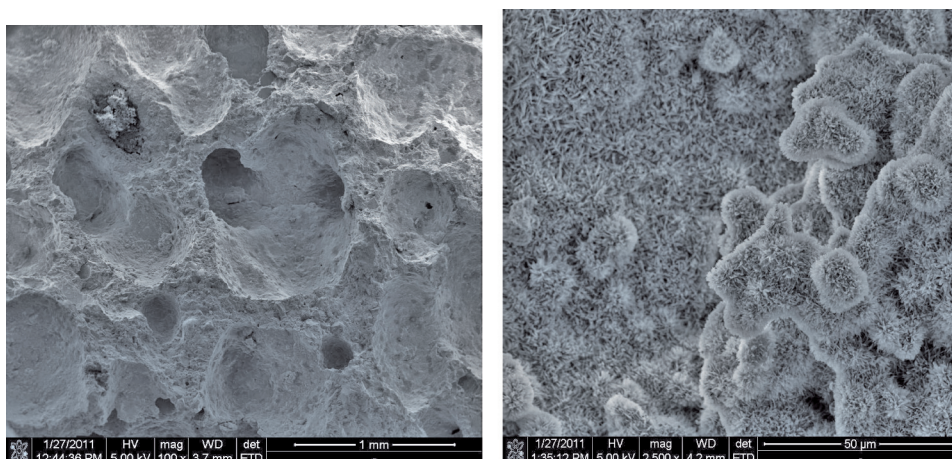
### Obserwacje mikroskopowe ABK

Badania mikroskopowe ABK wykonane zostały przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) wyposażonego w analizator rentgenowski mikroobszarów EDS. Obserwacje przeprowadzono na wysokiej jakości sprzęcie w Zakładzie Nanotechnologii ICiMB Warszawa.

Analiza uzyskanych obrazów wskazuje na obecność dobrze wykształconych form tobermorytopochodnych (formy włókniste i płytkowe), tworzące skupienia o różnych zagęszczeniu. Zaobserwowano również obecność C-S-H typu plaster pszczeli.



Ryc. 8. SEM/EDS. CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2 – płytkowe formy tobermorytu tworzące skupienia o różnym zagęszczeniu [8]



Ryc. 9. CEM V/A (S-V) 32,5R-LH – cementownia 4 z uwzględnieniem c/s  
– widoczny produkt tobermorytu na bazie fazy C-S-H [8]

Badania składu fazowego ABK przyczyniły się do rozszerzenia wiedzy o złożoności procesów zachodzących w czasie produkcji ABK z zastosowaniem cementów z różnymi dodatkami mineralnymi. W zależności od rodzaju stosowanego cementu zmieniała się ilość faz tobermorytopochodnych. W składzie fazowym zaobserwowano obecność włóknistych, płytkowych form tobermorytu. Taka budowa korzystnie wpływa na właściwości betonu komórkowego: wytrzymałość na ściskanie, skurcz, mrozoodporność. Największa ilość faz tobermorytopochodnych występowała w cementach portlandzkich popiołowych CEM II/B-V. Ponadto w ABK z zastosowaniem cementu wieloskładnikowego żużlowo-popiołowego CEM V/A (S-V) stwierdzono dominację amorficznych faz C-S-H typu „plastra pszczelego”. Powyższe wyniki badań składu fazowego ABK przekładają się na uzyskane wysokie wytrzymałości ABK z zastosowaniem cementów portlandzkich popiołowych i cementów wieloskładnikowych żużlowo-popiołowych.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania cementów oraz betonów komórkowych wykonanych w skali laboratoryjnej potwierdziły możliwość zastosowania cementów wieloskładnikowych do wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego.

Zasadne jest przeprowadzenie prób w skali przemysłowej w wytwórni betonu komórkowego z zastosowaniem cementów wybranych na podstawie omawianych badań.

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań, najbardziej obiecującymi wydają się cementy:

- CEM II/A-V 42,5R – cementownia 1,
- CEM II/B-V 42,5N – cementownia 2,
- CEM V/A (S-V) 32,5R – cementownia 4.

Wyniki pracy stanowią podstawę do realizacji projektu celowego z wybraną wytwórnią betonu komórkowego.

## Literatura

- [1] Garbaciak A., Giergiczny Z., *Efekt synergii dodatków mineralnych w składzie cementów wieloskładnikowych*, [w:] *Reologia w technologii betonu. XII Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cement – właściwości i zastosowanie”*, Góraźdże Cement S.A., Wydział Budownictwa Politechniki Gliwickiej, Gliwice 2010.
- [2] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wydawnictwa Naukowe PWN, Kraków-Warszawa 2010.
- [3] 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.
- [4] Giergiczny Z., Garbaciak A., Pużak T., Sokołowski M., *Cementy portlandzkie wieloskładnikowe CEMII/B-M(V-LL)32,5R i CEMII/B-M(S-V) 32,5R – właściwości i zastosowanie*, [w:] *Konferencja Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność 11–13 października 2010 Wisła*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010.
- [5] PN-EN 197-1 „Cement. Część 1: Skład wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”.
- [6] Zapotoczna-Sytek G., *60 lat betonu komórkowego w Polsce*, [w:] *Konferencja Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność, 11–13 października 2010 Wisła*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010.
- [7] Jatyłowicz H., Siejko J., Zapotoczna-Sytek G., *Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego*, Arkady, Warszawa 1980.
- [8] Zapotoczna-Sytek G., Skorniewska M., Łaskawiec K., Michalik A., Garbaciak A., *Zastosowanie cementów wieloskładnikowych do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK). Sprawozdanie*. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Betonów CEBET, Warszawa 2010.
- [9] *Materiały budowlane. Podstawy technologii i metody badań*, red. J. Małolepszy, wyd. 2, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2008.
- [10] Garbaciak A., Chładzyński S., *Cementy wieloskładnikowe w budownictwie*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2008.

*MARTA SKORNIIEWSKA  
GENOWEFA ZAPOTOCZNA-SYTEK*

EXPLOITATION CEMENTS CEM II AND CEM V  
IN PRODUCING AUTOCLAVED AERATED CONCRETE (AAC)

In the article was presented a possibility of applying multicomponent cements for the production of autoclaved aerated concrete (AAC). In the AAC this work have innovative character. Besides solutions practical and technological in article we can find research of the phase composition and microstructures of AAC, produced at applying different multicomponent cements, containing lot of mineral supplements. Results of the work constitute the essential contribution of the knowledge in the ABK technology. Realization of this work is creating reasons to implementation use multicomponent cements in the AAC technology, in place present technical solution with using portland cement CEM I.