
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 11

ISSN 1899-3230

Rok V

Warszawa–Opole 2012

MARTA SKORNIIEWSKA*
GENOWEFA ZAPOTOCZNA-SYTEK**

Autoklawizowany beton komórkowy a zrównoważony rozwój

Słowa kluczowe: zrównoważony rozwój, autoklawizowany beton komórkowy, cement portlandzki wieloskładnikowy, cement wieloskładnikowy, stosunek CaO/SiO_2 , tobermoryt.

Współczesne technologie wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) charakteryzują się małym zużyciem surowców oraz energii w stosunku do wytwarzania innych materiałów budowlanych. Wynika to z małej gęstości ABK oraz odpowiednio prowadzonego procesu wytwarzania. Jest to proces bezodpadowy, przyjazny dla środowiska. Ponadto do wytwarzania betonu komórkowego stosuje się jako surowce materiały odpadowe z energetyki (popioły lotne, surowce siarczanowe).

Wyroby z ABK charakteryzują się relatywnie korzystną wytrzymałością, przy niskiej gęstości i wysokiej izolacyjności cieplnej, a tym samym znacząco wpływają na oszczędność energii potrzebnej na ogrzewanie obiektów, przy zapewnieniu w nich zdrowego mikroklimatu.

Współczesne technologie wytwarzania ABK, charakterystyka wyrobów i związane z tym efekty wskazują, że zarówno proces produkcji, jak i zastosowanie ABK wpisują się w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju.

Dla utrzymania wysokiego poziomu technologii ABK prowadzone są prace badawcze w zakresie zaawansowanych technologii. Wyzwaniom takim odpowiada zastosowanie surowców ograniczających emisję CO_2 i zużycie energii. Jednym z takich surowców mogą być cementy wieloskładnikowe. Uzyskane wyniki z przeprowadzonych prób laboratoryjnych wytwarzania ABK z zastosowaniem tych cementów w miejscu cementu portlandzkiego CEM I mogą być przesłanką do ich wykorzystania w technologii ABK. Wyniki przeprowadzonych przez nas badań zostały przedstawione i szeroko omówione w pracy [7] i artykule [6]. Badania będą kontynuowane łącznie z próbami w skali przemysłowej. Wdrożenie rozwiązania skutkować będzie znacznym ograniczeniem emisji CO_2 i NO_x do atmosfery.

* 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.

1. Wprowadzenie

„Zrównoważony rozwój oznacza rozwój zaspokajający potrzeby dzisiejszej generacji bez konieczności ograniczania możliwości zaspokojenia potrzeb przyszłych pokoleń”.

G.H. Brundtland, ONZ, 1983

Problematyka zrównoważonego rozwoju dotyczy także budownictwa. Budownictwo współczesne – rozumiane szeroko jako obejmujące produkcję budowlaną i obiekty budowlane – jest nazywane „sektorem 40”, bowiem ocenia się w przybliżeniu, że zużywa 40% energii, emituje 40% CO₂ i produkuje 40% odpadów. Coraz intensywniejsze działania w całym obszarze zrównoważonego budownictwa zmierzają do obniżenia wielkości tych parametrów. Zrównoważone budownictwo sprowadza się w pewnym uproszczeniu do minimalizacji zużycia energii i surowców w całym procesie powstawania i eksploatacji obiektów budowlanych oraz do minimalizacji oddziaływań na środowisko naturalne.

Trzeba pamiętać, że budownictwo według zasad zrównoważonego rozwoju i tym samym jego przyszłość musi uwzględniać cele ekologiczne, ekonomiczne, społeczne i kulturowe [1].

W dążeniu do realizacji idei zrównoważonego budownictwa przełomowym okazał się rok 2011, czyli po 25 latach od sformułowania koncepcji zrównoważonego rozwoju, wówczas to rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej (305/2011 z 9 marca 2011 r.) została wprowadzona nowa wersja wymagań podstawowych dotyczących obiektów budowlanych. Wśród nich wprowadzono nowe wymaganie 7. zatytułowane: „Zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych”. Nowe sformułowania związane z ochroną zasobów naturalnych pojawiły się również w wymaganiu podstawowym 3. – „Higiena, zdrowie i środowisko” oraz w 6. – „Oszczędność energii i izolacyjność cieplna” [2].

2. Zrównoważony rozwój a proces wytwarzania i stosowania betonu komórkowego

Analiza procesu wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) oraz uzyskiwanych w tym procesie wyrobów wskazuje, że zarówno sama produkcja ABK, jak i jego zastosowanie w budownictwie wpisują się w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju [3]. Wniosek ten oparty jest na wielu istotnych przesłankach związanych z wytwarzaniem ABK i z jego właściwościami.

Proces wytwarzania ABK jest przyjaznym dla środowiska ze względu na to, że [3]:

– produkcja ABK jest nieuciążliwa dla otoczenia, w jej toku nie powstają żadne materiały i substancje, które mogą być szkodliwe dla organizmu żywego lub środowiska;

- podstawowe surowce są ogólnie dostępne w przyrodzie. Tereny eksploatacji piasku są programowo rekultywowane, a stosując jako kruszywo popiół lotny eliminuje się hałdy, na które trafiałby popiół – jest to więc bardzo skuteczny sposób ochrony środowiska naturalnego. Podkreślić należy, że Polska (350 tys. t/r) jest obok Wielkiej Brytanii (360 tys. t/r), znaczącym producentem betonu komórkowego z zastosowaniem popiołów lotnych;
- objętość surowców w procesie produkcji ulega zdecydowanemu powiększeniu (z 1 m³ surowców otrzymujemy do 5 m³ gotowego wyrobu);
- proces obróbki hydrotermalnej betonu komórkowego w autoklawach w parze wodnej nasyconej odbywa się z zastosowaniem przerzutów pary pomiędzy autoklawami w celu zaoszczędzenia energii. Dodać należy, że wytwórnie produkujące beton według technologii popiołowej wykorzystują w procesie autoklawizacji odpadową parę z elektrowni;
- proces technologiczny wytwarzania betonu komórkowego jest bezodpadowy, nadatki świeżej masy betonu ponad założony wymiar kierowane są w postaci szlamu z powrotem do produkcji. W cykl produkcyjny kierowane są również z powrotem odpady z wyrobów gotowych. Są one także używane do wytwarzania nowych produktów, np. ciepłochronnych zapraw murarskich, a ponadto na podsypki ocieplające we wznoszonych obiektach. Mogą być wykorzystywane również w drogownictwie do dolnych warstw podbudów. Woda z procesu autoklawizacji jest używana jako woda zarobowa. Warto podkreślić, że niektóre wytwórnie posiadające własne kotłownie używają wymienione wcześniej odpady świeżej masy jako sorbentu do odsiarczania spalin;
- produkcja betonu komórkowego jest procesem o niskim zużyciu energii i surowców w porównaniu z procesami wytwarzania innych materiałów budowlanych (tab. 1). Wynika to z małej gęstości autoklawizowanego betonu komórkowego w stosunku do innych materiałów budowlanych, dzięki temu jest mniejsze zużycie paliwa kopalnego i towarzysząca temu emisja SO₂, NO_x i pyłów.

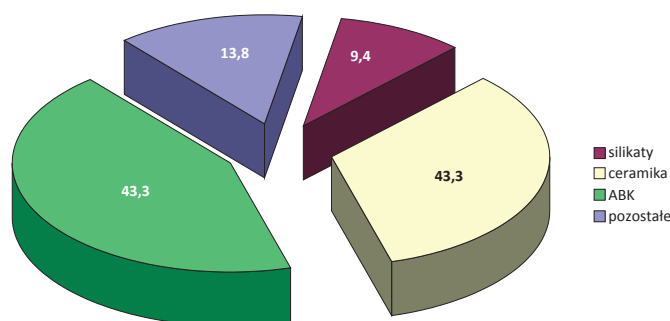
T a b e l a 1

Zużycie surowców i energii przy produkcji różnych materiałów budowlanych [1]

Materiały budowlane	Gęstość w stanie suchym (średnia) [kg/m ³]	Zużycie surowców [kg/m ³]	Zużycie energii [kWh/m ³]
Beton zwykły	2 300	2 250	640
Cegła ceramiczna	1 200	1 400	880
Ceramika poryzowana	800	800	610
Cegły wapienno-piaskowe	1 400	1 100	280
Autoklawizowany beton komórkowy	500	500	210

Aktualnie w Polsce z betonu komórkowego produkowany jest szeroki asortyment elementów drobnowymiarowych, głównie ściennych. Są to wyroby nowej generacji, charakteryzują się wysoką jakością na skutek systematycznego udoskonalania procesu ich wytwarzania [4–5]. Wykonanie obiektów z takich wyrobów daje możliwość stosowania nowych technik łączenia elementów w murze na tzw. cienkie spoiny, co pozwala zminimalizować zużycie materiałów. Wyroby z ABK charakteryzują się relatywnie korzystną wytrzymałością, wysoką izolacyjnością cieplną i znacząco wpływają na oszczędność energii potrzebnej na ogrzewanie obiektów przy zapewnieniu w nich zdrowego mikroklimatu. Z zastosowaniem betonu komórkowego można realizować budynki energooszczędne jak również pasywne. Nie bez powodu ABK stał się w kraju jednym z najczęściej wykorzystywanych materiałów do budowy ścian (ok. 43%) – rycina 1;

- wyroby z ABK doskonale nadają się do przebudowy i rozbudowy obiektów ze względu na lekkość oraz łatwość docięcia;
- w przypadku rozbiórki obiektów z ABK materiał ten może być użyty ponownie w procesie produkcyjnym oraz jako kruszywo do budowy dróg. Możliwe jest również jego ponowne wykorzystanie w obiektach budowlanych.



Ź r ó d ł o: Stowarzyszenie Producentów Betonów.

Ryc. 1. Udział w rynku poszczególnych materiałów ściennych w Polsce

3. Przestanki zastosowania w technologii betonu komórkowego cementów wieloskładnikowych

Polska jest największym producentem autoklawizowanego betonu komórkowego w Europie. Dzięki krajowym pracom badawczo-wdrożeniowym opracowano i wdrożono wiele polskich technologii wytwarzania ABK (zarówno w kraju, jak i za granicą). Chcąc utrzymać wysoki poziom technologii ABK, konieczne jest prowadzenie ciągłych prac badawczych z zakresu zaawansowanych technologii. Jednym z kierunków tych prac badawczych jest zastosowanie cementów wieloskładnikowych w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego. Wykorzystanie tych cementów pozwoliłoby na rozwój technologii ABK,

a w ujęciu rachunku ciągnionego analizy efektywności: przemysł cementowy – przemysł betonu komórkowego przyczyniłby się do ograniczenia emisji CO₂ na jednostkę produktu finalnego ABK.

Nie bez znaczenia będzie w przyszłości możliwość dostaw do wytwórni ABK wyraźnie tańszego spoiwa (cementy wieloskładnikowe są tańsze o ok. 40 zł/tonę niż CEM I) – cementu o określonych w wyniku badań parametrach. Trzeba podkreślić, że przemysł cementowy (szczególnie europejski) podjął wysiłki zmierzające do ograniczenia emisji CO₂ [10]. Kierunek ten realizowany jest poprzez stosowanie biopaliw i alternatywnych surowców, wprowadzanie klinkieru o niskiej energii spiekania oraz cementów z niską zawartością klinkieru. Godnym podkreślenia jest możliwość ograniczenia emisji CO₂ w przemyśle cementowym poprzez produkcję cementów z dużą ilością dodatków mineralnych, zastępujących w cementach energochłonny klinkier portlandzki [1]. W najbliższych latach kierunek ten powinien być szerzej rozwijany w polskim przemyśle cementowym.

4. Próby technologiczne wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego z zastosowaniem cementów wieloskładnikowych

Do prób badawczych wytypowano następujące cementy [7]:

– cementy odniesienia:

- 1) cement portlandzki CEM I 32,5 R – cementownia 1;
- 2) cement portlandzki CEM I 42,5 R – cementownia 2;

– cementy wieloskładnikowe:

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

Przed przystąpieniem do wytwarzania ABK z zastosowaniem wyżej wymienionych cementów, określono ich właściwości fizykochemiczne, tj. powierzchnię właściwą, wodożądność, czas wiązania, konsystencję, wytrzymałość zapraw na zginanie i ściskanie po 2, 7, 28 dniach, skład chemiczny [9]. Wyniki badań zostały przedstawione i omówione w pracy [7] i artykule [6].

Część doświadczalną wytwarzania ABK z zastosowaniem wymienionych cementów przeprowadzono w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych – CBB CEBET w Warszawie.

Próby technologiczne wytwarzania ABK prowadzono zgodnie z opracowaną recepturą otrzymywania betonu o gęstości 600 kg/m^3 ($\pm 50 \text{ kg/m}^3$) według technologii SW. W technologii SW wapno palone i cement stanowiące spoiwo betonu komórkowego stosowane są do produkcji bez dodatkowej obróbki. Jako kruszywo wykorzystywany jest szlam piaskowy, uzyskany przez wspólny przemiał piasku z wodą w młynie kulowo-rurowym [8]. W skład mieszaniny surowcowej wchodzi dodatkowo środek porotwórczy, woda korekcyjna oraz środek powierzchniowo czynny.

W przeprowadzonych próbach laboratoryjnych założono, że w spoiwie dominującym składnikiem będzie cement. Recepty mieszanek betonowych przedstawiono w pracy [7]. W pierwszych próbach laboratoryjnych zmieniano rodzaj cementu, a proporcje ilościowe poszczególnych składników mieszanki pozostawały bez zmian. W drugiej serii prób w opracowanych recepturach założono stały stosunek CaO/SiO_2 (C/S) w mieszance betonowej wykonywanej albo na cemencie odniesienia CEM I 42,5R (cementownia 1), albo na cementach wieloskładnikowych. Aby zachować stały stosunek $\text{C/S} = 0,46$, w recepturach zmieniano ilości składników, tj. wapna, piasku i cementu (uwzględniając ich skład chemiczny).

Przebieg prób technologicznych wytwarzania ABK z zastosowaniem zarówno cementów portlandzkich (odniesienia), jak i cementów wieloskładnikowych, wykazał brak zasadniczych różnic w procesie wyrastania i wiązania masy. Wyjątek stanowiła masa betonu z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R (cementownia 2) oraz z cementem portlandzkim popiołowym CEM II/B-V 42,5 N (cementownia 2), gdzie zaobserwowano szybszy przyrost twardości masy zarobowej.

Po stwardnieniu masę betonu komórkowego poddano autoklawizacji. Stosowano długość cyklu – 12 h, maksymalne ciśnienie – 1,0 MPa. Po procesie autoklawizacji nastąpiło rozformowanie i wstępna ocena wizualna betonów komórkowych, która wykazała prawidłowy wygląd zewnętrzny betonu dla obu wariantów składów recepturowych. Następnie przeprowadzono badania wybranych właściwości fizykotechnicznych oraz mikrostruktury i struktury ABK.

5. Właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego

5.1. Właściwości fizykotechniczne

Dla wytypowanych betonów przeprowadzono następujące badania:

- gęstość – wg PN-EN 772-13,
- wytrzymałość na ściskanie – wg PN-EN 772-1,
- kurczliwość – wg PN-EN 680 (w normie używane jest nazewnictwo skurcz),
- mrozoodporność – wg PN-89/B-06258 p 5.10,
- współczynnik przewodzenia ciepła – wg PN-ISO 8301.

W tabeli 2 przedstawiono wartości średnie właściwości fizykotechnicznych ABK według pierwszego wariantu recepturowego, a w tabeli 3 wyniki dla drugiego wariantu recepturowego.

T a b e l a 2

Właściwości fizykotechniczne ABK (pierwszy wariant recepturowy)

Lp.	Rodzaj cementów	w/s	Parametry betonu komórkowego						
			ρ_{sr}	$R_{k\perp sr}$	λ_{sr}	mrozoodporność		kurczliwość	
						zmiana $R_{k\perp sr}$	zmiana masy	30-6%	całkowity
			kg/m ³	MPa	W/m·K	%	%	mm/m	
1	CEM I 32,5 R - cementownia 1	0,53	560	3,8	0,1180	-1,7	-1,5	0,13	1,13
2	CEM I 42,5 R - cementownia 2	0,53	560	3,9	0,1190	-5	-0,3	0,13	0,73
3	CEM II/A-V 42,5 R - cementownia 1	0,53	530	3,8	0,1210	-16	-0,1	0,05	0,49
4	CEM II/A-V 42,5 R - cementownia 2	0,54	540	4,0	0,1180	4	0	0,06	0,51
5	CEM II/B-V 32,5 R - cementownia 1	0,53	535	3,9	0,1239	-17	-0,1	0,05	0,45
6	CEM II/B-V 42,5 N - cementownia 2	0,53	545	4,3	0,1273	-9	-0,2	0,06	0,46
7	CEM II/A-LL 42,5 R - cementownia 3	0,53	600	4,8	0,1297	-30	-4,9	0,04	0,93
8	CEM II/B-M(V-LL) 32,5 R - cementownia 3	0,53	575	4,5	0,1346	-14	-4,0	*	0,40
9	CEM V/A (S-V) 32,5 R - cementownia 4	0,53	550	4,4	0,1274	-6	0,5	0,06	0,45

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

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

T a b e l a 3

Właściwości fizykotechniczne ABK (drugi wariant recepturowy)

Lp.	Rodzaj cementu	w/s	Parametry betonu komórkowego						
			ρ	$R_{k\perp\acute{s}r}$	$\lambda_{\acute{s}r}$	mrozoodporność		kurczliwość	
						zmiana $R_{k\perp\acute{s}r}$	zmiana masy	30-6%	całkowity
kg/m ³	MPa	W/m·K	%	%	mm/m				
1	CEM I 32,5 R - cementownia 1	0,53	575	3,8	0,1264	-	-	0,09	1,15
2	CEM I 42,5 R - cementownia 2	0,53	595	4,7	0,1301	-	-	0,09	0,94
3	CEM II/A-V 42,5 R - cementownia 1	0,53	605	4,9	-	-	-	*	0,45
4	CEM II/A-V 42,5 R - cementownia 2	0,53	580	4,7	0,1276	-7	-1,2	0,01	0,44
5	CEM II/B-V 32,5 R - cementownia 1	0,53	580	4,3	0,1308	-4	-1,1	*	0,35
6	CEM II/B-V 42,5 N - cementownia 2	0,53	595	5,3	0,1363	-14	-1,0	0,01	0,38
7	CEM II/A-LL 42,5 R - 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	32,5 R - cementownia 3	0,50	605	4,9	0,1411	-29	-2,7	0,01	0,42
10	CEM V/A (S-V) 32,5 R - 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.

Ź r ó d ł o: Jak w tab. 2.

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

- Porównując uzyskaną wytrzymałość betonów komórkowych wykonanych z zastosowaniem cementów portlandzkich popiołowych do cementów odniesienia, najwyższy wzrost wytrzymałości osiągnięto dla betonu komórkowego wykonanego z zastosowaniem cementu:
 - CEM II/B-V 42,5 N (cementownia 2) - 12% wzrost wytrzymałości w stosunku do betonu wykonanego z cementem odniesienia CEM I 42 N dla obu wariantów recepturowych;
 - CEM II B-V 32,5 R (cementownia 1), gdzie w pierwszym wariantcie recepturowym wzrost wytrzymałości wynosił 8%, a w drugim wariantcie recepturowym 13% - w porównaniu do betonu wykonanego z cementem odniesienia CEM I 32,5 R (cementownia 1).

Wzrost wytrzymałości betonu komórkowego uzyskano również podczas stosowania pozostałych cementów. Dla betonu komórkowego z zastosowaniem cementu portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL 42,5 R (cementownia 3) wytrzymałość wzrosła o 21% w pierwszym wariantcie recepturowym i 13% w drugim wariantcie recepturowym. Wytrzymałość betonu komórkowego porównywano z wytrzymałością betonu kontrolnego wykonanego z zastosowaniem cementu odniesienia CEM I 42,5 R (cementownia 2).

Dla betonu komórkowego z zastosowaniem cementu portlandzkiego wieloskładnikowego popiołowo-wapiennego CEM II/B-M (V-LL) 32,5 R (cementownia 3) wzrost wytrzymałości dla pierwszego wariantu recepturowego wyniósł 16%, a dla drugiego wariantu 25% – w porównaniu z wytrzymałością betonu kontrolnego z zastosowaniem cementu odniesienia CEM I 32,5 R (cementownia 1).

Również wytrzymałość ABK z zastosowaniem cementu wieloskładnikowego żużlowo-popiołowego CEM V/A(S-V) 32,5 R była wyższa od ABK na cemencie odniesienia CEM I 32,5 R (cementownia 1) o ok. 18% dla wariantu pierwszego oraz 5% dla wariantu drugiego.

- Korzystną mrozoodporność miał ABK na cemencie portlandzkim popiołowym CEM II/A-V 42,5 R (cementownia 2) oraz na cemencie wieloskładnikowym żużlowo-popiołowym CEM V/A(S-V) 32,5 R. 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.

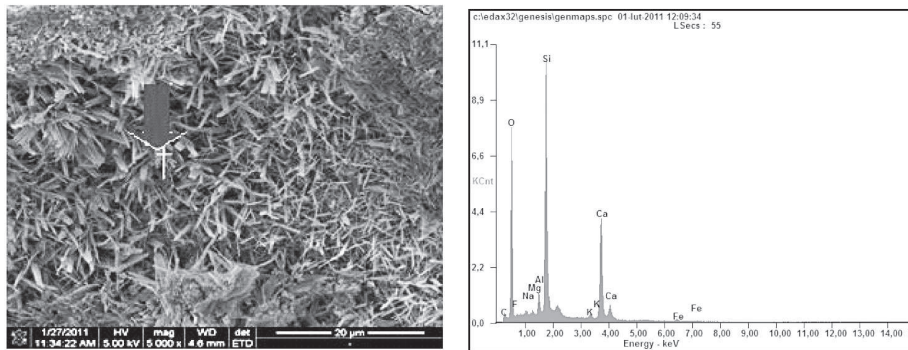
- Kurczliwość ABK (zarówno przy zmianie wilgotności od 30% do 6%, jak i kurczliwość całkowita) na wszystkich badanych cementach wieloskładnikowych była korzystnie niższa niżeli ABK na cementach portlandzkich CEM I.

ABK wykonany z zastosowaniem cementu portlandzkiego wapiennego CEM II/A-LL i cementu portlandzkiego wieloskładnikowego popiołowo-wapiennego CEM II/B-M (V-LL) wykazywał kurczliwość nieciągłą przy zmianie wilgotności w zakresie od 30 % do 6% masy – występowało chwilowe wydłużenie.

- Współczynnik przewodzenia ciepła λ , oznaczony w stanie suchym, we wszystkich próbach ABK, spełniał wymagania normowe, które określają, że dla gęstości ABK od 500 do 600 kg/m³ nie powinien być on wyższy niż 0,15 W/m·K. Zaobserwowano, że nieco wyższe (mniej korzystne) wartości λ mają ABK z zastosowaniem cementów wieloskładnikowych. Wśród tej grupy betonów najbardziej korzystne wartości λ 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.

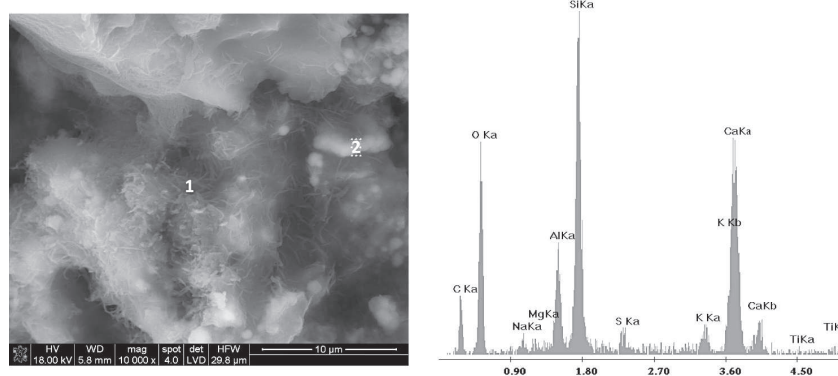
5.2. Mikroskopia skaningowa z analizatorem rentgenowskim w mikroobszarach SEM-EDS

Badania mikroskopowe ABK wykonane zostały przy użyciu mikroskopu skaningowego (SEM) wyposażonego w analizator rentgenowski mikroobszarów EDS. Badania wykonano dla 4 wytypowanych próbek betonu – dokumentacja znajduje się w pracy [7]. W artykule przedstawiono wybrane mikrografie SEM charakterystycznych punktów mikrostruktury próbek ABK wraz z analizą pierwiastkową EDS. Analiza uzyskanych obrazów wskazuje na obecność dobrze wykształconych uwodnionych krzemianów wapnia (formy włókniste i płytkowe), tworzące skupienia o różnym zagęszczeniu (ryc. 2). Ponadto, zaobserwowano również obecność C-S-H typu plaster pszczeli (ABK z zastosowaniem CEM V/A (S-V) 32,5 R-LH – cementownia 4 z uwzględnieniem C/S – ryc. 3).



Źródło: Opracowanie własne.

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



Źródło: Jak w ryc. 2.

Ryc. 3. ABK z zastosowaniem CEM V/A (S-V) 32,5 R-LH – cementownia 4 z uwzględnieniem C/S – widoczny produkt C-S-H typu plaster pszczeli [1]

Badania składu fazowego ABK wykazały, że w zależności od rodzaju stosowanego cementu zmieniała się ilość uwodnionych krzemianów wapnia. W składzie fazowym zaobserwowano obecność włóknistych oraz płytkowych form tobermorytu. Taka budowa korzystnie wpływa na właściwości betonu komórkowego: wytrzymałość na ściskanie, kurczliwość, mrozoodporność. Największa ilość uwodnionych krzemianów wapnia 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 wyższe wytrzymałości ABK z zastosowaniem cementów portlandzkich popiołowych i cementów wieloskładnikowych żużlowo-popiołowych w porównaniu do cementów portlandzkich CEM I.

Wyniki obserwacji mikroskopowych metodą SEM potwierdzono i uzupełniono badaniami składu fazowego metodą XRD oraz kompleksową analizą termiczną. Wyniki tych badań przedstawiono w artykule [6] i pracy [7], potwierdzają one znaczenie reakcji pucolanowej w kształtowaniu składu fazowego ABK z cementów popiołowych i popiołowo-żużlowych. 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, wytwarzanym z udziałem cementów popiołowych. Stwierdzono duże zróżnicowanie uwodnionych krzemianów wapnia. Zwraca uwagę dominacja amorficznych form C-S-H w produktach hydratacji cementu CEM V/A(S-V)32,5 R (zawartość popiołu 18,8%, zawartość żużla 34% [7]). Ustalono również występowanie w badanych próbkach faz krystalicznych kwarcu i kalcytu.

6. Podsumowanie

1. Współczesne technologie wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego i właściwości otrzymanych z niego wyrobów wskazują, że zarówno proces produkcji, jak i zastosowanie betonu komórkowego wpisują się w uwarunkowania zrównoważonego rozwoju. Ten fakt uzasadnia m.in. dalszy rozwój produkcji i stosowania tego materiału.
2. Przeprowadzone badania nad zastosowaniem cementów wieloskładnikowych w technologii wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego (skala laboratoryjna) uzasadniają celowość kontynuacji prac w tym zakresie, łącznie z przeprowadzeniem prób w skali przemysłowej.
3. Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań (wytrzymałość, mrozoodporność, kurczliwość, współczynnik przewodzenia ciepła), najbardziej obiecującymi cementami do zastosowania w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego wydają się cementy:

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

4. Wdrożenie do wytwarzania ABK cementów wieloskładnikowych z dodatkami mineralnymi, a co za tym idzie ograniczenie ilości stosowanego klinkieru, w miejsce obecnych rozwiązań z wykorzystaniem cementu portlandzkiego CEM I, jest rozwiązaniem stwarzającym możliwość dalszego obniżenia emisji CO₂ przez przemysł cementowy. W ujęciu rachunku ciągnionego analizy efektywności: przemysł cementowy – przemysł betonu komórkowego pozwoli to na ograniczenie emisji CO₂ na jednostkę finalną ABK.

Literatura

- [1] Zapotoczna-Sytek G., Małolepszy J., *Zrównoważony rozwój a proces wytwarzania i stosowania elementów z betonu komórkowego*, [w:] *Konferencja Dni Betonu – tradycja i nowoczesność*, red. P. Kijowski, J. Deja, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2008, s. 867–878.
- [2] Czarniecki L., Kaproń M., Piasecki M., Wal S., *Budownictwo zrównoważone budownictwem przyszłości*, „Inżynieria i Budownictwo” 2012, nr 1, s. 18–21.
- [3] Zapotoczna-Sytek G., *AAC based on fly Ash in the strategy of sustainable development*, [w:] *Autoclaved Aerated Concrete. Innovation and Development*, ed. M.C. Limbachiya, J.J. Roberts, Taylor a. Francis Group, London 2005, s. 257–264.
- [4] Zapotoczna-Sytek G., *60 lat betonu komórkowego w Polsce*, [w:] *Konferencja Dni Betonu – tradycja i nowoczesność*, red. P. Kijowski, J. Deja, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2010, s. 609–621.
- [5] Zapotoczna-Sytek G., Soboń M., *60 years of aerated concrete in Poland – the past and the future*, [w:] *5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete Securing a sustainable future to be held at Bydgoszcz to celebrate 60 years of AAC experience in Poland*, ed. J. Prusiński, University of Technology and Life Sciences Press, Bydgoszcz 2011, s. 27–42.
- [6] Skorniewska M., Zapotoczna-Sytek G., *Zastosowanie cementów CEM II i CEM V do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK)*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2011, nr 7, s. 163–182.
- [7] 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.
- [8] Jatymowicz H., Siejko J., Zapotoczna-Sytek G., *Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego*, Arkady, Warszawa 1980.
- [9] PN-EN 197-1:2002 – Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [10] Kurdowski W., *Chemia cementu i betonu*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wydawnictwa Naukowe PWN, Kraków–Warszawa 2010.

MARTA SKORNIIEWSKA
GENOWEFA ZAPOTOCZNA-SYTEK

AUTOCLAVED AERATED CONCRETE (AAC)
AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Keywords: sustainable development, autoclaved aerated concrete, portland-composite cement, composite cement, chemical composition CaO/SiO₂, tobermorite.

The modern technologies of manufacturing autoclaved aerated concrete (AAC) are characterized by small consumption of raw materials and energy in comparison to production of other building materials. It comes from small density AAC and proper production process. It's waste-free process, friendly to environment. Moreover to AAC production we can use raw materials such as waste materials from energy sector.

AAC products are characterized by relatively beneficial compressive strength at low density and high thermal insulation and thus significantly affect the saving of the energy need for heating buildings, ensuring them a healthy microclimate.

The modern technologies of manufacturing autoclaved aerated concrete AAC, characteristic of AAC products and effects relating with them show that above production of AAC blocs and applying them to building industry meets the requirements of sustainable development.

There are conducting researches in high technologies scope for keeping high development of AAC technology for example using raw materials which reduces CO₂ and energy consumption. One of this kind of raw materials could be a cements with mineral additives. Research results from laboratory tests production of AAC with use this kind of cements in place portland cement CEM I, show possibility to use the cement with mineral additives in AAC technology. The results of our research have been presented in [7] and the article [6]. The researches will be continue in laboratory scale and in production plant. Implementation of this project will permit to reduce CO₂ and NO_x emission to the air.