

Wykorzystanie cementów o obniżonym śladzie węglowym w autoklawizowanym betonie komórkowym

Use of low-carbon-footprint cements in autoclaved aerated concrete

Anna Skawińska^{1,*}

¹Cement Ożarów S.A.

*corresponding author: A. Skawińska, e-mail: anna.skawinska@ozarow.com.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę możliwości zastosowania cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/A-S 52,5 R w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego. Badania modelowe potwierdziły, że cement żużlowy może być stosowany podczas syntezy tobermorytu w warunkach hydrotermalnych. W badaniach przemysłowych wykazano, że procesy technologiczne, takie jak wyrastanie i dojrzewanie mieszanki betonowej, przebiegają porównywalnie dla cementów CEM I i CEM II/A-S. Uzyskane wyniki potwierdziły również brak istotnych różnic w wytrzymałości, składzie fazowym oraz mikrostrukturze betonu komórkowego, co wskazuje na pełną przydatność cementów portlandzkich żużlowych w produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego.

Słowa kluczowe: autoklawizowany beton komórkowy, cement portlandzki żużlowy

Summary

The paper presents an analysis of the applicability of Portland-slag cement CEM II/A-S 52.5 R in the production of autoclaved aerated concrete. Model studies confirmed that slag cement can be used for the synthesis of tobermorite under hydrothermal conditions. Industrial-scale investigations demonstrated that technological processes, such as the rising and hardening of the concrete mixture, proceed in a comparable manner for CEM I and CEM II/A-S cements. The results also confirmed the absence of significant differences in the strength, phase composition, and microstructure of autoclaved aerated concrete, indicating the full suitability of Portland slag cements for the production of autoclaved aerated concrete.

Keywords: autoclaved aerated concrete, Portland-slag cement

1. Wprowadzenie

Autoklawizowany beton komórkowy [ABK] jest materiałem stosowanym w budownictwie od ponad 100 lat, a początki jego przemysłowej produkcji sięgają 1923 roku. Do jego wytwarzania wykorzystuje się piasek kwarcowy oraz spoiwo w postaci cementu, wapna i gipsu, przy dodatku niewielkich ilości proszku aluminiowego. Ze względu na złożony charakter procesów zachodzących podczas produkcji, wszelkie modyfikacje składu surowcowego wymagają szczegółowej analizy oraz ścisłej kontroli przemian fizyko-chemicznych i fizyko-mechanicznych na każdym etapie wytwarzania. Kluczowe znaczenie ma zapewnienie odpowiednich warunków podczas wyrastania i dojrzewania mieszanki betonowej (1–6).

Na tle europejskim Polska zajmuje pozycję największego producenta autoklawizowanego betonu komórkowego. W związku z dalszym rozwojem tej technologii jednym z istotnych wyzwań staje się możliwość zastosowania cementów z nieklinkierowymi

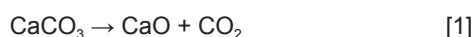
1. Introduction

Autoclaved aerated concrete [AAC] has been used in construction for more than 100 years, with the beginnings of its industrial-scale production dating back to 1923. Its manufacture involves the use of quartz sand and a binder consisting of cement, lime, and gypsum, with the addition of a small amount of aluminium powder. Owing to the complex nature of the processes occurring during production, any modification of the raw material composition requires detailed analysis and strict control of the physicochemical and physico-mechanical transformations at each stage of manufacture. Ensuring appropriate conditions during the rising and hardening of the concrete mixture is of key importance (1–6).

In the European context, Poland is the largest producer of autoclaved aerated concrete. With the continued development of this technology, one of the important challenges is the possibility of using cements containing non-clinker main constituents in AAC

składnikami głównymi w produkcji ABK. Wprowadzenie takich cementów może przyczynić się nie tylko do optymalizacji właściwości materiału, lecz również do ograniczenia emisji CO₂ w przeliczeniu na jednostkę wyrobu (1–7).

Kierunek ten wpisuje się w szerszy trend transformacji sektora cementowego w Unii Europejskiej, gdzie rośnie znaczenie cementów z dodatkami mineralnymi. Wysoki udział cementów portlandzkich wieloskładnikowych w strukturze produkcji jest bezpośrednio związany z realizacją strategii dekarbonizacji, w których ograniczenie udziału klinkieru portlandzkiego, czyli zmniejszenie wskaźnika klinkierowego [ang. clinker-to-cement ratio] stanowi jeden z głównych mechanizmów ograniczania emisji CO₂ (8). Emisje te powstają zarówno bezpośrednio – w wyniku rozkładu węglanu wapnia według reakcji [1]:



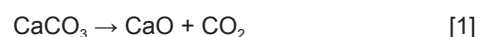
jak i pośrednio – w procesie spalania paliw niezbędnych do wytworzenia wymaganej temperatury w piecu cementowym i dostarczenia odpowiedniej ilości energii potrzebnej do przeprowadzenia reakcji (9). W konsekwencji dąży się do częściowego zastępowania klinkieru portlandzkiego nieklinkierowymi składnikami głównymi, takimi jak granulowany żużel wielkopiecowy [S], popiół lotny krzemionkowy [V] oraz kamień wapienny [L, LL].

Wyniki badań wskazują, że zastosowanie takich dodatków może być korzystne również z punktu widzenia właściwości mechanicznych. Skorniewska (7) wykazała, że cementy portlandzkie popiołowe CEM II/A-V i CEM II/B-V mogą zapewniać wyższe wytrzymałości ABK niż cement portlandzki. Z kolei Rudchenko (10) potwierdził zasadność wykorzystania granulowanego żużla wielkopiecowego jako częściowego zamiennika cementu portlandzkiego w autoklawizowanym betonie komórkowym, wskazując możliwość ograniczenia zużycia spoiwa przy zachowaniu lub nieznacznej poprawie wytrzymałości. Optymalna zawartość tego dodatku w mieszance mieści się w przedziale 15–20%, przy czym już 10–15% zamiany cementu prowadzi do niewielkiego wzrostu wytrzymałości materiału.

W niniejszym artykule skupiono się na możliwości zastosowania cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/A-S 52,5 R w autoklawizowanym betonie komórkowym, ze szczególnym uwzględnieniem jego roli w powstawaniu tobermorytu. W części badawczej przedstawiono syntezę tobermorytu przy stosunku molowym CaO/SiO₂ [C/S] wynoszącym 0,83 z wykorzystaniem cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/A-S 52,5 R. Przyjęte podejście pozwala powiązać zagadnienia technologiczne związane z doбором spoiwa do betonu komórkowego z podstawową analizą mineralogiczną przemian zachodzących podczas autoklawizacji. Uzyskane wyniki będą stanowić podstawę do dalszej oceny przydatności cementów portlandzkich żużlowych w projektowaniu zrównoważonych oraz efektywnych materiałowo autoklawizowanych wyrobów komórkowych. Kolejny etap badań polegał na przedstawieniu możliwości stosowania cementu portlandzkiego żużlowego CEM II/A-S 52,5 R w betonie komórkowym produkowanym według technologii SW (1) w skali przemysłowej.

production. The use of such cements may contribute not only to optimizing the material properties but also to reducing CO₂ emissions per unit of product (1–7).

This approach is part of the broader transformation of the cement sector in the European Union, where the importance of cements containing mineral additions is increasing. The high share of Portland composite cements in the production structure is directly related to the implementation of decarbonization strategies, in which reducing the proportion of Portland clinker, i.e. decreasing the clinker-to-cement ratio, is one of the main mechanisms for reducing CO₂ emissions (8). These emissions are generated both directly, as a result of the decomposition of calcium carbonate according to reaction [1]:



and indirectly, through the combustion of fuels required to attain the temperature necessary in the cement kiln and to supply the amount of energy required for the reactions to proceed (9). Consequently, efforts are being made to partially replace Portland clinker with non-clinker main constituents, such as ground granulated blast-furnace slag [S], siliceous fly ash [V], and limestone [L, LL].

Research results indicate that the use of such additions may also be beneficial in terms of mechanical properties. Skorniewska (7) demonstrated that Portland-fly ash cements CEM II/A-V and CEM II/B-V can provide higher AAC strength than Portland cement. In turn, Rudchenko (10) confirmed the validity of using ground granulated blast-furnace slag as a partial replacement for Portland cement in autoclaved aerated concrete, indicating the possibility of reducing binder consumption while maintaining or slightly improving strength. The optimum content of this addition in the mixture is in the range of 15–20 %, while replacing 10–15 % of the cement already results in a slight increase in material strength.

This paper focuses on the applicability of Portland-slag cement CEM II/A-S 52.5 R in autoclaved aerated concrete, with particular emphasis on its role in tobermorite formation. The experimental part presents the synthesis of tobermorite at a molar CaO/SiO₂ [C/S] ratio of 0.83 using Portland-slag cement CEM II/A-S 52.5 R. This approach makes it possible to link technological issues related to binder selection for aerated concrete with a fundamental mineralogical analysis of the transformations occurring during autoclaving. The results obtained will provide a basis for further assessment of the suitability of Portland slag cements for the design of sustainable and resource-efficient autoclaved aerated concrete products. The next stage of the study involved evaluating the possibility of using Portland slag cement CEM II/A-S 52.5 R in aerated concrete produced according to the SW technology (1) on an industrial scale.

2. Materiały i metody badań

2.1. Materiały

Do otrzymania autoklawizowanego betonu komórkowego użyto cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R, cementu portlandzkiego żuźlowego CEM II/A-S 52,5 R [SZYBK I AS, cementownia Ożarów, Polska], wapna palonego, piasku kwarcowego, proszku glinowego oraz gipsu. Zastosowane surowce spełniały wymagania normowe dla surowców stosowanych do produkcji ABK. W tablicy 1 przedstawiono właściwości cementów istotne, z punktu widzenia produkcji betonu komórkowego.

Stopień czystości R gipsu wynosił 90,5%. Według wymagań stawianych dla gipsu do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego udział $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ powinien wynosić powyżej 80%. Czas gaszenie wapna wyniósł 8 minut. Aktywność wapna palonego wynosiła 89% i spełniała zalecane w produkcji ABK wymagania dla CaO_{akt} wynoszące powyżej 80%.

2.2. Metody badań

Badania wytrzymałości na ściskanie oraz gęstości ABK wykonano zgodnie z normami PN-EN 771-1:2011 oraz PN-EN 772-13:2001. Skład fazowy tobermorytu oraz autoklawizowanego betonu komórkowego metodą dyfrakcji rentgenowskiej stosując aparat EMPYREAN firmy PANalytical. Obserwacje mikrostruktury przeprowadzono na mikroskopie skaningowym ThermoFisher Scientific Apreo 2. Skład chemiczny cementu oznaczono przy użyciu spektrometr WDXRF Axios mAX [PANalytical] z lampą rodową o mocy 4 kW.

3. Badania modelowe oraz przemysłowe

3.1. Badania modelowe

Przed przystąpieniem do prób technologicznych sprawdzono zasadność stosowanie cementu CEM II/A-S 52,5 R w produkcji betonu komórkowego, dlatego zdecydowano o wykonaniu badań modelowych przy stałym stosunku molowym CaO/SiO_2 wynoszącym 0,83, który odpowiada składowi chemicznemu tobermorytu. Czas autoklawizacji wynosił 10

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW.

PROPERTIES OF CEMENTS.

		Cement	
		CEM I 52.5 R	CEM II/A-S 52.5 R
CaO, %		63.46	62.76
MgO, %		1.66	2.04
SO ₃ , %		2.45	2.82
Na ₂ O _{eq} , %		0.69	0.69
C ₃ S, %		57.63	57.46
Stałość objętości / Soundness, mm		0.3	0.4
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	2 dni / 2 days	31.9	35.7
	28 dni / 28 days	63.0	62.8

2. Materials and methods

2.1. Materials

Portland cement CEM I 52.5 R, Portland-slag cement CEM II/A-S 52.5 R [SZYBK I AS, Ożarów Cement Plant, Poland], quicklime, quartz sand, aluminium powder, and gypsum were used to produce autoclaved aerated concrete. The raw materials used complied with the standard requirements for materials intended for AAC production. Table 1 presents the properties of the cements relevant to the production of aerated concrete.

The purity grade R of the gypsum was 90.5 %. According to the requirements for gypsum used in the production of autoclaved aerated concrete, the $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ content should exceed 80 %. The lime slaking time was 8 min. The activity of the quicklime was 89 %, thus meeting the recommended requirement for AAC production, with the CaO_{act} content exceeding 80 %.

2.2. Test methods

The compressive strength and density of AAC were determined in accordance with PN-EN 771-1:2011 and PN-EN 772-13:2001. The phase composition of tobermorite and autoclaved aerated concrete was determined by X-ray diffraction using an EMPYREAN diffractometer [PANalytical]. Microstructural observations were performed using a Thermo Fisher Scientific Apreo 2 scanning electron microscope. The chemical composition of the cement was determined using an Axios mAX WDXRF spectrometer [PANalytical] equipped with a 4 kW rhodium X-ray tube.

3. Model and industrial-scale investigations

3.1. Model investigations

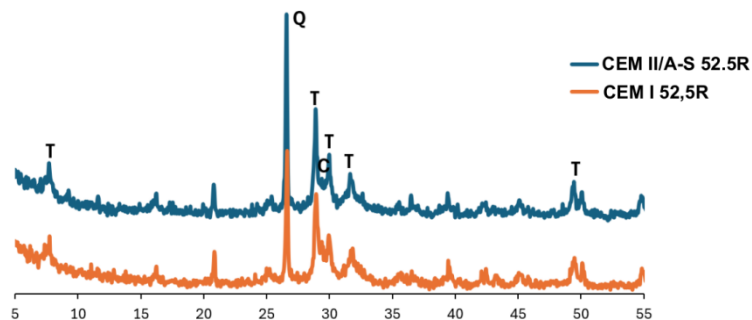
Prior to conducting technological trials, the suitability of CEM II/A-S 52.5 R cement for the production of autoclaved aerated concrete was assessed. Therefore, model investigations were carried out at a constant molar CaO/SiO_2 ratio of 0.83, corresponding to the chemical composition of tobermorite. The autoclaving time was 10 h. The synthesis was carried out at a temperature of 180°C and a saturated steam pressure of 1.2 MPa. The phase composition of the resulting material was determined using X-ray diffraction [XRD].

The XRD patterns of the tobermorite samples produced using CEM I 52.5 R and CEM II/A-S 52.5 R are presented in Fig. 1. The hydrothermal treatment time was 10 h. After cooling, the samples were ground to a particle size below 63 µm. The phase composition was then determined by X-ray diffraction.

Analysis of the XRD patterns showed that the main products of the synthesis were tobermorite and the C-S-H phase. In addition to these phases, unreacted quartz was detected in the samples.

godzin. Syntezę prowadzono w temperaturze 180°C i ciśnieniu nasyconej pary wodnej 1,2 MPa. Należy również zaznaczyć, że bloczki betonu komórkowego, po procesie autoklawizacji nie kleiły się. Zbadano skład fazowy otrzymanego materiału za pomocą analizy XRD. Dyfraktogram próbek tobermorytu na cemencie CEM I oraz CEM II/A-S 52,5 R przedstawiono na rys. 1. Próbki po ostudzeniu zostały rozdrobione do wielkości ziaren poniżej 63 µm. Następnie wykonano badania składu fazowego za pomocą dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego.

Analiza dyfraktogramu wykazała, że podstawowym produktem syntezy jest tobermoryt oraz faza C-S-H. Oprócz



Rys. 1. Dyfraktogram tobermorytu wykonanego z a) CEM I 52,5R b) CEM II/A-S 52,5 R; T- tobermoryt, C-faza C-S-H, Q- kwarc.

Fig. 1. X-ray diffractograms of tobermorite produced using a) CEM I 52.5R and b) CEM II/A-S 52.5 R; T – tobermorite, C – C-S-H phase, Q – quartz.

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANKI BETONU KOMÓRKOWEGO.

COMPOSITION OF AERATED AUTOCLAVED CONCRETE.

Cement	Skład spoiwa / Binder composition, %		Stosunek kruszywo/spoiwo Aggregate to binder ratio, -	Czas dojrzewania Pre-curing time, min
	Cement	Wapno / Burnt lime		
CEM I 52.5R	71.5	28.5	3.05	0.58
CEM II/A-S 52.5 R	72.0	28.0	2.70	0.58

tych faz w próbce stwierdzono obecność nieprzereagowanego kwarcu.

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI TECHNICZNE ŚWIEŻEJ MASY BETONU KOMÓRKOWEGO.

PROPERTIES OF FRESH AAC MIX.

Rodzaj cementu Type of cement	Temp. początkowa Initial temperature, °C	Rozlewność Flowability, cm	Czas dojrzewania (min)
CEM I 52,5 R	48-52	90-110	110-120
CEM II/A-S 52,5 R	48-52	95-125	110-130

3.2. Badania przemysłowe

Wykonano autoklawizowany beton komórkowy o gęstości 500 kg/m³ w skali przemysłowej z dwóch rodzajów cementu: portlandzkiego CEM I 52,5 R [próba referencyjna] oraz CEM II/A-S 52,5 R. Pozostałe surowce były takie same w obu przypadkach tj.: wapno palone, gips, piasek kwarcowy oraz proszek glinowy. Skład mieszanki betonu komórkowego zamieszczono w tablicy 2. Podczas procesów wyrastania i wiązania masy monitorowano parametry techniczne świeżej masy betonu komórkowego, które zestawiono w tablicy 3.

Procesy wyrastania i wiązania masy betonu komórkowego dla cementu odniesienia oraz cementu CEM II/A-S 52,5 R przebiegały podobnie. Różnica w czasie dojrzewania wynosząca do 10 minut mieści się w założonym przez zakład produkcyjny tolerancji.

3.2.1. Właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego

Po osiągnięciu przez masę odpowiedniej twardości forma z masą została przekazana do węzła krojenia. Bloczki po krojeniu zostały poddane obróbce hydrotermalnej. Proces autoklawizacji prowadzono w temperaturze 180°C, przy ciśnieniu nasyconej pary wodnej oraz czasie 1,2 MPa przez 10 godzin. Po zakończeniu procesu autoklawizacji wykonano badania wytrzymałości na ściskanie i gęstości. Średnie wyniki zamieszczono w tabeli 4.

3.2. Industrial-scale investigations

Autoclaved aerated concrete with a density of 500 kg/m³ was produced on an industrial scale using two types of cement: Portland cement CEM I 52.5 R [reference sample] and CEM II/A-S 52.5 R. The remaining raw materials were identical in both cases, i.e. quicklime, gypsum, quartz sand, and aluminium powder. The composition of the AAC mixture is given in Table 2.

During the rising and setting processes, the technological parameters of the fresh AAC mixture were monitored; the results are summarized in Table 3.

The rising and setting processes of the AAC mixture prepared with the reference cement and CEM II/A-S 52.5 R proceeded similarly. The difference in setting time, not exceeding 10 min, was within the tolerance specified by the production plant.

3.2.1. Properties of autoclaved aerated concrete

Once the concrete mixture had reached the required hardness, the mould containing the mixture was transferred to the cutting unit. After cutting, the blocks were subjected to hydrothermal treatment. The autoclaving process was carried out at a temperature of 180°C, a saturated steam pressure of 1.2 MPa, and an autoclaving time of 10 h. It should also be noted that the AAC blocks did not stick

Wyniki badań zestawione w tablicy 4 wskazują, że gęstość oraz wytrzymałość na ściskanie autoklawizowanego betonu komórkowego z obu cementów mieszczą się w tych samych klasach.

3.2.2. Analiza rentgenograficzna betonu komórkowego

Na rysunku 2 przedstawiono skład fazowy autoklawizowanego betonu komórkowego.

Z przedstawionej analizy składu fazowego wynika, że głównymi fazami po obróbce hydrotermalnej jest tobermoryt, faza C-S-H oraz nieprzereagowany kwarc. Nie stwierdzono występowania nieprzereagowanego anhydrytu oraz kalcytu. Wyniki te są zgodne z badaniami modelowymi. W zakresie kątów 2θ 28-31° obserwuje się podniesienie tła, co świadczy o istnieniu amorficznej fazy C-S-H. Z badań Straube i in. (11) wynika, że w autoklawizowanym betonie komórkowym, o dobrym składzie fazowym, udział tobermorytu wyznaczony metodą Rietveld'a wynosi 62%, a zawartość fazy amorficznej C-S-H 16%.

3.2.3. Mikrostruktura betonu komórkowego

Przykładowe obrazy mikrostruktur analizowanych przełamów betonu komórkowego z cementu CEM I 52,5 oraz CEM II/A-S 52,5 R zestawiono na rys. 3 i 4. W oparciu o zamieszczone zdjęcia SEM obserwuje się wydłużone, płaskie kryształy tobermorytu, wzajemnie przerastające się. Zamieszczono również na rysunku fazę C-S-H typową dla technologii piaskowej ABK. Faza C-S-H występuje w postaci form gąbczastych, tworzących zwarty żel.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski.

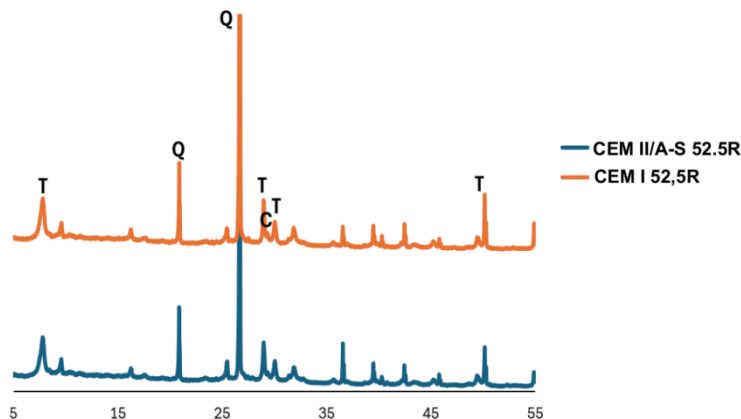
1. Cement portlandzki żuźlowy CEM II/A-S 52,5 R może być z powodzeniem stosowany w procesie syntezy tobermorytu.
2. Przebieg procesu wyrastania oraz wiązania mieszanki betonowej był porównywalny dla betonu komórkowego wykonanego z cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R, użytym jako cement odniesienia oraz cemencie portlandzkim żuźlowym CEM II/A-S 52,5 R [SZYBK I AS], co wskazuje na brak istotnego wpływu zastosowanego spoiwa na kinetykę tych procesów.
3. Nie stwierdzono istotnych różnic w wytrzymałości na ściskanie autoklawizowanego betonu komórkowego w zależności od zastosowanego cementu – zarówno dla CEM I 52,5 R, jak i CEM II/A-S 52,5 R.
4. Analiza składu fazowego próbek po autoklawizacji wykazała obecność tobermorytu oraz fazy C-S-H, niezależnie od rodzaju zastosowanego cementu.
5. Obserwacje mikrostrukturalne potwierdziły współwystępowanie fazy C-S-H oraz tobermorytu w betonie komórkowym wyko-

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI STWARDNIAŁEGO ABK.

PROPERTIES OF HARDENED AAC.

Cement	Klasa gęstości Density class, kg/m ³	Klasa wytrzymałości na ściskanie Compressive strength class, MPa
CEM I 52.5 R	451-500	>2.5
CEM II/A-S 52.5 R	451-500	>2.5



Rys. 2. Dyfraktogramy autoklawizowanego betonu komórkowego; T-tobermoryt, C- faza C-S-H, Q- kwarc.

Fig. 2. XRD patterns of autoclaved aerated concrete: T – tobermorite, C – C-S-H phase, Q – quartz.

together after autoclaving. After completion of the autoclaving process, compressive strength and density were determined. The mean values are presented in Table 4.

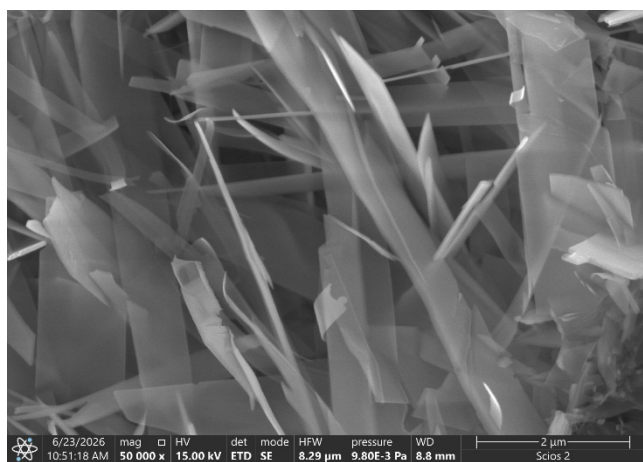
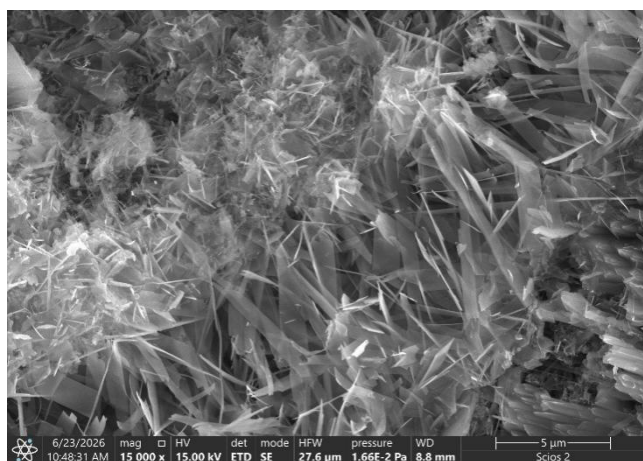
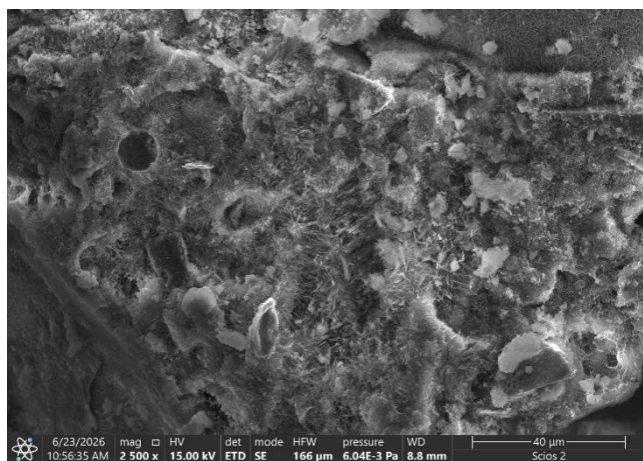
The results presented in Table 4 indicate that the density and compressive strength of the autoclaved aerated concrete produced with both cements fall within the same strength and density classes.

3.2.2. X-ray diffraction analysis of autoclaved aerated concrete

The phase composition of the autoclaved aerated concrete is presented in Fig. 2. The phase composition analysis shows that the main phases formed after hydrothermal treatment are tobermorite, the C-S-H phase, and unreacted quartz. No unreacted anhydrite or calcite was detected. These results are consistent with the model investigations. An increase in the background intensity is observed in the 2θ range of 28–31°, indicating the presence of an amorphous C-S-H phase. According to the studies by Straube (11), the content of tobermorite in autoclaved aerated, with good phase composition, concrete determined by the Rietveld method is 62 %, while the content of the amorphous C-S-H phase is 16 %.

3.2.3. Microstructure of autoclaved aerated concrete

Representative images of the microstructures of the analysed fracture surfaces of aerated concrete produced using CEM I 52.5 R and CEM II/A-S 52.5 R cements are presented in Figs. 3 and 4. The SEM images show elongated, plate-like tobermorite crystals with an intergrown morphology. The C-S-H phase typical of sand-based AAC technology is also shown. The C-S-H phase occurs in the form of sponge-like structures forming a compact gel.

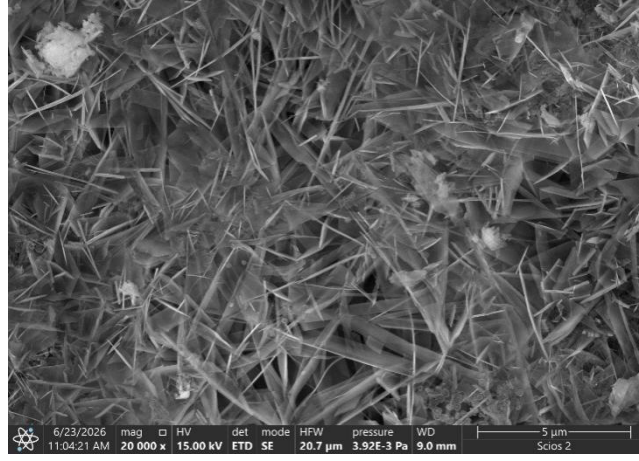
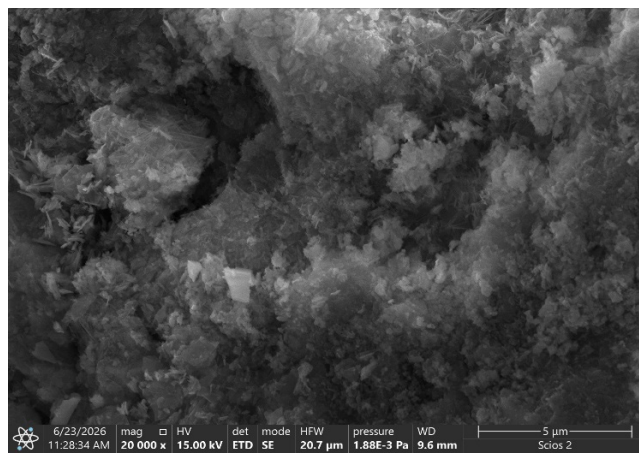


Rys. 3. Mikrostruktura autoklawizowanego betonu komórkowego wykonanego z cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R.

Fig. 3. Microstructure of autoclaved aerated concrete produced using Portland cement CEM I 52.5 R.

nany z obu cementów. Jednocześnie nie zaobserwowano istotnych różnic w morfologii produktów w zależności od rodzaju cementu.

Uzyskane wyniki wskazują, że cement portlandzki żuźłowy CEM II/A-S 52,5 R [SZYBK I AS] może stanowić alternatywę dla cementu portlandzkiego CEM I 52,5 R w technologii produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego, umożliwiając zachowanie porównywalnych właściwości materiałowych przy jednoczesnym ograniczeniu śladu węglowego finalnego produktu.



Rys. 4. Mikrostruktura autoklawizowanego betonu komórkowego wykonanego z cementu portlandzkiego żuźłowego CEM II/A-V 52,5 R.

Fig. 4. Microstructure of autoclaved aerated concrete produced using Portland-slag cement CEM II/A-S 52.5 R.

4. Conclusions

Based on the results of the investigations, the following conclusions were drawn:

1. Portland slag cement CEM II/A-S 52.5 R can be successfully used for the synthesis of tobermorite.
2. The rising and setting processes of the concrete mixture proceeded comparably for autoclaved aerated concrete produced using Portland cement CEM I 52,5 R, used as the reference cement, and Portland slag cement CEM II/A-S 52.5 R [SZYBK I AS]

Literatura / References

1. G. Zapotoczna-Sytek, S. Balakovic, Autoklawizowany beton komórkowy, PWN, Warszawa 2013.
2. European Autoclaved Aerated Concrete Association (EAACA), Materiały informacyjne Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Autoklawizowanego Betonu Komórkowego, 2004–2006.
3. S. Aroni, G.J. de Groot, M.J. Robinson, G. Svanholm, F.H. Wittman, Autoclaved aerated concrete, properties testing and design. E&FN Spon 1993.
4. P. Gębarowski, B. Górka, A. Michalik, G. Zapotoczna-Sytek, M. Gawlicki, Autoclaved aerated concrete – safe for human and environmentally friendly. 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, 601–612, 2011.
5. A. Paprocki, Betony komórkowe, Arkady, Warszawa 1966.
6. H. Jatymowicz, J. Siejko, G. Zapotoczna-Sytek, Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego, Arkady, Warszawa 1980.
7. M. Skorniewska, G. Zapotoczna-Sytek, Wpływ rodzaju cementu na właściwości betonu komórkowego. Cem. Wapno Beton **87**(4) 200–206 (2012).
8. CEMBUREAU, CEMBUREAU position: FAQ on clinker substitution, 2024. <https://www.cementeuropa.eu/media/02hh1sdv/240305-cembureau-position-faq-on-clinker-substitution.pdf> (accessed 24.06.2026).
9. K. Ślusarczyk, W. Jawański, Ł. Duda, M. Pitura, Zastosowanie cementów o obniżonym śladzie węglowym w prefabrykacji wielkogabarytowej, Dni Betonu 2023, pp. 809–825, 2023.
10. D. Rudchenko, N.A. Dyuzhilova, V.R. Serdyuk, The assessment of efficiency of blast-furnace granulated slag used in autoclaved aerated concrete manufacturing. Bull. Odessa State Acad. Civ. Eng. Arch. **79**, 117–125 (2020).
11. B. Straube, T. Schoch, The durability of autoclaved aerated concrete. Mauerwerk **18**(3–4), 239–245 (2014). <https://doi.org/10.1002/dama.201400630>
- AS]. This indicates that the type of binder used has no significant effect on the kinetics of these processes.
3. No significant differences in the compressive strength of autoclaved aerated concrete were observed as a function of the cement used, either for CEM I 52.5 R or CEM II/A-S 52.5 R.
4. Phase composition analysis of the samples after autoclaving revealed the presence of tobermorite and the C-S-H phase, irrespective of the type of cement used.
5. Microstructural observations confirmed the coexistence of the C-S-H phase and tobermorite in the autoclaved aerated concrete produced using both cements. At the same time, no significant differences in the morphology of the reaction products were observed depending on the type of cement.

The results obtained indicate that Portland slag cement CEM II/A-S 52.5 R [SZYBK I AS] can be considered an alternative to Portland cement CEM I 52.5 R in autoclaved aerated concrete production technology, enabling comparable material properties to be maintained while simultaneously reducing the carbon footprint of the final product.