

## Przyjazne środowisku rozwiązania materiałowe w technologii autoklawizowanego betonu komórkowego

## Environmentally friendly material solutions in the technology of autoclaved aerated concrete

**Waldemar Pichór**

AGH University of Science and Technology, Faculty of Materials Science and Ceramics, Department of Building Materials Technology, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

e-mail: [pichor@agh.edu.pl](mailto:pichor@agh.edu.pl)

### Streszczenie

Autoklawizowany beton komórkowy jest materiałem przyjaznym środowisku. Jednak wymogi współczesnego świata, a przede wszystkim troska o przyszłość, wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań minimalizujących negatywne skutki środowiskowe. W pracy przedstawiono wybrane rozwiązania wykorzystania w technologii autoklawizowanego betonu komórkowego materiałów odpadowych i ubocznych produktów z innych technologii, z uwzględnieniem potencjalnych zagrożeń i ograniczeń. Zwrócono również uwagę na zagospodarowanie odpadu z betonu komórkowego w innych technologiach, przede wszystkim jako substytutu cementu lub dodatku do betonu. Praca ma ze względu na swoją objętość wybiórczy zakres, jednak głównym jej celem jest przedstawienie trendów i kierunków poszukiwań nowych rozwiązań materiałowych, w tej technologii.

**Słowa kluczowe:** autoklawizowany beton komórkowy, recykling, wykorzystanie odpadów, rozwiązania przyjazne środowisku

### Summary

Autoclaved aerated concrete is an environmentally friendly material. However, the demands of the modern world and, above all, care for the future, necessitate the search for new solutions to minimise negative environmental effects. This paper presents selected solutions for the use of waste materials and by-products from other techniques in autoclaved aerated concrete production, taking into account potential risks and limitations. Attention was also drawn to the use of aerated concrete waste in other methods, primarily as a cement substitute, or concrete additive. The paper is selective in nature due to its volume, but the main purpose is to present trends and directions in the search for new material solutions in this technology.

**Keywords:** autoclaved aerated concrete, recycling, waste utilization, environmentally friendly solutions

### 1. Wprowadzenie

Autoklawizowany beton komórkowy jest materiałem cieszącym się uznaniem użytkowników, ze względu na swoje walory użytkowe. Korzystna relacja między właściwościami użytkowymi, przede wszystkim bardzo małą wartością współczynnika przewodzenia ciepła w stosunku do innych materiałów konstrukcyjnych, przy akceptowalnej wytrzymałości pozwalającej na swobodne wznoszenie ścian, przyczyniają się do chętnego sięgania po to rozwiązanie. Najlepsze odmiany autoklawizowanego betonu komórkowego bardzo korzystnie wypadają w bilansie materiałowym i zapotrzebowaniem na energię procesową w stosunku do materiałów alternatywnych, szczególnie w przeliczeniu na

### 1. Introduction

Autoclaved aerated concrete [AAC] is a material that is appreciated by users, because of its functional values. The favourable relationship between the operational properties, above all a very low value of the thermal conductivity coefficient in relation to other construction materials, with an acceptable strength allowing for free erection of walls, contribute to the willingness to reach for this solution. The lightest varieties of autoclaved aerated concrete have very favourable results in the material balance and the demand for process energy in relation to alternative materials, especially per cubic meter of the product. Minimizing the use of both process energy and the amount of raw materials used is one of the most

metr sześcienny wyrobu. Minimalizacja użycia zarówno energii procesowej jak i ilości wykorzystywanych surowców jest jednym z najczęściej podnoszonych zalet w ujęciu środowiskowym, wpisującą się w ogólne trendy i założenia zrównoważonego rozwoju, Zielonego Ładu i szeroko rozumianej redukcji emisji CO<sub>2</sub> i ochrony środowiska (1, 2). Również do niedawna często uwypuklaną cechą materiału produkowanego w jednym z wariantów tej technologii był fakt, że jest wytwarzany z „czystych” surowców naturalnych piasek, wapno, co zapewne zachęca odbiorców do wyboru tego materiału. To jak najbardziej zrozumiałe działanie z punktu widzenia przewagi konkurencyjnej, ale powoli przestajemy mieć taki komfort, a wykorzystanie surowców naturalnych nie tylko z uwagi na aspekt środowiskowy, ale ze względu na zmieniający się odbiór społeczny, może nie być już pozytywnie postrzegane. Z punktu widzenia efektu środowiskowego energetyczny proces jakim jest mielenie piasku, a w szczególności wypalanie wapna, może być zmniejszony przez poszukiwanie substytucji materiałowej, najlepiej ubocznymi produktami z innych technologii i procesów. W przypadku tej technologii dzieje się tak od dekad. Najbardziej popularnym rozwiązaniem jest zastosowanie popiołów lotnych z energetyki i rozwinięcie tzw. wariantów popiołowych (3-5). Przegląd aktualnego stanu wiedzy, z zakresu technologii autoklawizowanego betonu komórkowego można znaleźć w pracy (6). Na marginesie warto zaznaczyć, że wykorzystując popioły jako surowiec, można otrzymać beton komórkowy o lepszych właściwościach termoizolacyjnych, w stosunku do tzw. wariantu piaskowego. To oczywiście nie jedyny przykład wykorzystania jako składnika mieszanki surowcowej, ubocznych produktów spalania lub odpadów poprocesowych. Częściowe zastąpienie surowców tradycyjnych, dotyczy również poszukiwania alternatywy dla spoiwa w postaci wapna i zamiennika proszku glinowego, wykorzystywanego do spieniania masy.

Oddziaływanie technologii na środowisko jest zagadnieniem złożonym. Często analiza taka, zawężona jest do oceny wpływu samego procesu produkcji, od wydobycia surowców, [niezbędnego ich przetworzenia, szczególnie przy wykorzystaniu procesów o dużym zużyciu energii: suszenie, wypalanie i mielenie, samą syntezę materiału, po formowanie produktu końcowego. Coraz częściej, analiza ta uwzględnia oprócz fazy produkcji, okres eksploatacji wyrobu, i co ważne, recykling po jego zakończeniu. W tym kontekście wykorzystanie autoklawizowanego betonu komórkowego o małym współczynniku przewodzenia ciepła, osiągającym wartość mniejszą od 0,1 W/(m·K) wpisuje się w strategię ograniczenia zużycia energii, przez redukcję strat ciepła w użytkowanych obiektach. Warto tu dodać, że autoklawizowany beton komórkowy, jako jeden z nielicznych materiałów, pozwala na wznoszenie ścian w systemie jednowarstwowym, spełniających kryteria ochrony cieplnej budynków (7). Beton komórkowy z powodzeniem może być stosowany do wznoszenia budynków zeroenergetycznych, zeroemisyjnych, pasywnych i niezależnie jak jeszcze będą w przyszłości nazwane, tych, o najlepszych właściwościach energetycznych.

Wpływ na środowisko po cyklu życia materiału, to w najprostszym wariacie efekt bezpiecznego składowania, ale bardziej atrak-

frequently raised advantages in terms of the environment, in line with the general trends and assumptions of sustainable development, the Green Deal and the broadly understood reduction of CO<sub>2</sub> emissions and environmental protection (1, 2). Also, until recently, an often emphasized feature of the material produced in one of the variants of this technology was the fact that it is made of “pure” natural raw materials sand and lime, probably encourages clients to choose this material. This is a totally understandable action from the point of view of competitive advantage, however, we are slowly losing this comfort, and the use of natural resources, not only because of the environmental aspect, but because of the changing public perception, may no longer be seen in a positive light. From the point of view of the environmental effect, the high-energy process of grinding sand, and in particular the burning of lime, can be reduced by seeking material substitution, preferably by by-products from other technologies and processes. This technology has been going on for decades. The most popular solution is the use of fly ash from the power industry and the development of the so-called ash variants (3-5). An overview of the current state of the art in autoclaved aerated concrete production can be found in the paper (6). As an aside, it is worth mentioning that, by using ash as a raw material, it is possible to obtain AAC with better thermal insulation properties, in relation to the so-called sand variant. This, of course, is not the only example of using combustion by-products or post-process waste, as a component of the raw material mix. The partial replacement of traditional raw materials, also concerns the search for an alternative to a binder in the form of lime and a replacement for aluminium powder, used to foam the mass.

The impact of technology on the environment is a complex issue. Often, such an analysis is limited to the assessment of the impact of the production process itself, from the extraction of raw materials - including their necessary processing, especially important when using high-energy processes such as drying, burning, milling, the synthesis of the material itself, to the formation of the final product. More and more often, this analysis takes into account, in addition to the production phase, the product life cycle and, the more importantly, recycling after its end. In this context, the use of autoclaved, aerated concrete with a low thermal conductivity coefficient of less than 0.1 W/(m·K) is part of the strategy of reducing energy consumption by reducing the heat losses in the facilities used. It is worth mentioning that autoclaved, aerated concrete, as one of the few materials, allows the construction of walls, that meet the current high thermal insulating criteria, for buildings in a single-layer system (7). Autoclaved aerated concrete can be successfully used for the construction of zero-energy, zero-emission, passive buildings and, regardless of what they will be called in the future, those with the best energy performance.

The environmental impact after the life cycle of the material, is in the simplest variant the effect of safe storage, but a more attractive variant is a second chance for a new “life” of the material, i.e. material recycling. In this case, used products made of autoclaved aerated concrete, can also be seen as a valuable raw material for

cyjnym wariantem jest druga szansa na nowe „życie” materiału, czyli recycling materiałowy. W tym przypadku zużyte wyroby z autoklawizowanego betonu komórkowego, postrzegane mogą być również jako cenny surowiec do ponownego wykorzystania w produkcji różnych materiałów budowlanych lub, po odpowiednim przetworzeniu, jako całkiem nowy materiał np. granulát do zastosowań w agrotechnice - nośnik nawozów lub podłoże do upraw hydroponicznych. Innym przykładem jest wykorzystanie odpowiednio przetworzonego odpadu z betonu komórkowego, jako materiału do sorpcji zanieczyszczeń. Taka forma recyklingu, poza możliwościami samych zakładów produkcyjnych, jest możliwa przy rozwinięciu selektywnego odbioru odpadów budowlanych. Efektywna realizacja tego scenariusza wymaga nie tylko rozwinięcia lub modyfikacji istniejącej infrastruktury pozyskiwania i sortowania odpadów budowlanych, ale również zmian legislacyjnych, np. wyodrębnienia z grupy kruszyw z recyklingu - rodzaj  $R_c$  odrębnej podgrupy kruszywa z betonu komórkowego, oczywiście z dostosowaniem minimalnych wymagań jakościowych, do jego specyfiki.

Odpad z betonu komórkowego niezależnie od miejsca powstawania - odpad z produkcji, selektywny odbiór elementów z rozbiórki obiektów budowlanych może być łatwo - czyli z małym nakładem energii, przetworzony w produkt/materiał, o nowych właściwościach. Najczęściej wykorzystuje się mielenie, a dzięki porowatej mikrostrukturze, i spowodowanej tym dobrej mielności odpadu, wkład energetyczny w proces mielenia jest znacznie mniejszy niż w przypadku popiołu czy piasku. Uzyskany materiał zmielony do odpowiedniego uziarnienia, dzięki czemu w znacznym stopniu jest zredukowana jego porowatość, może być stosowany jako dodatek mineralny do betonu.

W pracy przedstawiono wybrane przykłady wykorzystania w technologii autoklawizowanego betonu komórkowego głównie ubocznych produktów pochodzących z innych technologii, ale również zagadnienie recyklingu materiałowego zużytych elementów betonowych, pochodzących z rozbiórki obiektów budowlanych.

## **2. Przykłady rozwiązań wykorzystania ubocznych produktów i odpadów z innych technologii**

Najbardziej znanym i stosowanym od lat przykładem wykorzystania ubocznych produktów spalania, jest zastosowanie popiołów lotnych z energetyki zawodowej jako nośnika krzemionki (4). Stosowanie popiołów ma długą tradycję, zresztą uwarunkowaną historycznymi względami początkowej lokalizacji zakładów produkcyjnych, blisko elektrowni i elektrociepłowni. Lokalizacja ta miała duże zalety, począwszy od możliwości odbioru pary wodnej o dużym ciśnieniu, w bezpośrednim sąsiedztwie źródła popiołów w dużej ilości, ale też ze względu na rozwiniętą infrastrukturę techniczną elektrowni. Zagadnienie wykorzystania popiołów lotnych jest dobrze udokumentowane w literaturze. Powszechnie są znane właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego zawierającego popioły lotne (4, 5, 8, 9). Wiadomo również, że beton komórkowy wyprodukowany z popiołów lotnych cechuje się niższym współczynnikiem

reuse in the production of various building materials or, after appropriate processing, as a completely new material, e.g., granules for agricultural use - fertilizer carrier or a substrate for hydroponic cultivation. Another example is the use of properly processed aerated, autoclaved concrete waste, with high porosity, as sorbents. This form of recycling, apart from the possibilities of the production plants themselves, is possible with the development of selective collection of construction waste. Effective implementation of this scenario, requires not only the development or modification of the existing infrastructure for collecting and sorting construction waste, but also legislative changes, e.g. excluding a separate subgroup of AAC aggregate, out of the the group of recycled aggregates -  $R_c$  type, of course with the adaptation of the minimum quality requirements to its specifics.

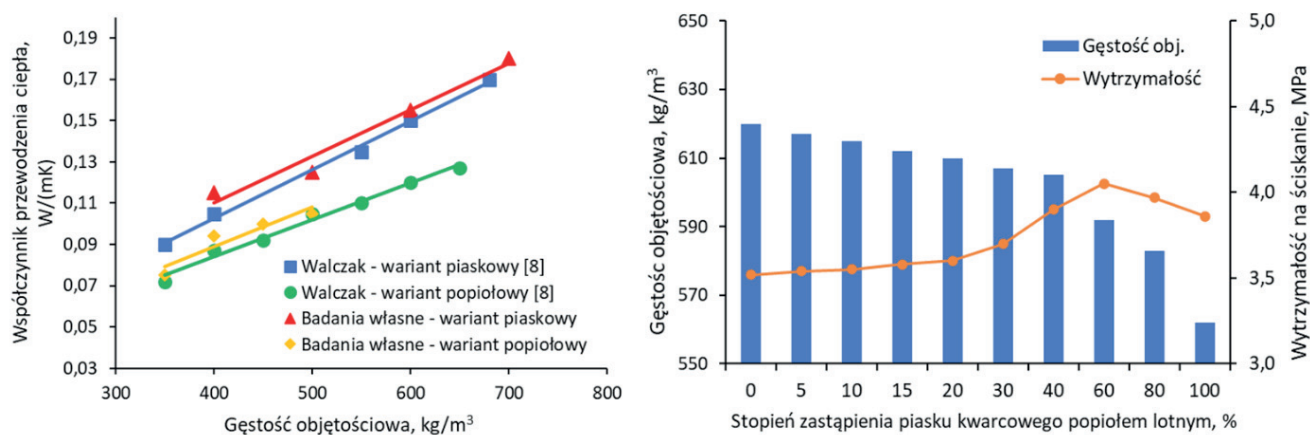
AAC waste, regardless of where it is generated - production waste, selective collection of elements from demolition of buildings can be easily i.e. with little energy expenditure - processed into a product/material, with new properties. Grinding is most often used, and thanks to the porous microstructure and the resulting good grindability of the waste, the energy input in the grinding process is much lower, than for ash or sand. The obtained material, ground to the appropriate grain size, thanks to which its porosity is significantly reduced, can be used as a supplementary cementitious material for concrete.

The paper presents selected examples of the use of alternative raw materials, mainly by-products from other technologies, in manufacturing of autoclaved, aerated concrete, as well as the issue of recycling of used AAC elements, from the demolition of buildings.

## **2. Examples of the use of by-products and waste from other technologies**

An well-recognized and used example of the use of combustion by-products is the application of fly ash from commercial power plants, as the silica carrier (4). The use of the ashes has a long tradition, which is also related to the historical tradition of the location of AAC production plants near power plants and combined heat and power plants. This location had the great advantages, starting from the possibility of receiving high-pressure steam, the immediate vicinity of a large amount of ash, and also due to the well-developed technical infrastructure of the power plant. The issue of using fly ash is well documented in the literature. The properties of autoclaved, aerated concrete containing fly ash, are well known (4, 5, 8, 9). It is also known that AAC made of fly ash is determined by a lower thermal conductivity coefficient compared to AAC based on quartz sand and having the similar volume density.

The value of the thermal conductivity coefficient is influenced by many factors, including, first of all, porosity and pore size distribution, but also the composition and properties of the solid phases. In the pores, convection is the main factor responsible for heat transport, so reducing the size of the pores is a beneficial treatment, reducing its value. The refinement of pores sizes depends of many



Rys. 1. Wpływ rodzaju nośnika krzemionki na współczynnik przewodzenia ciepła autoklawizowanego betonu komórkowego w funkcji gęstości objętościowej, na podstawie (8) oraz wpływ substytucji piasku popiołem lotnym na wytrzymałość i gęstość, na podstawie (9)

Fig. 1. Influence of the type of silica source on the thermal conductivity coefficient of AAC as a function of volumetric density, based on (8) and the effect of sand substitution by fly ash on compressive strength and density, according to (9)

przewodzenia ciepła, przy analogicznej gęstości objętościowej w stosunku do betonu zawierającego piasek kwarcowy.

Na współczynnik przewodzenia ciepła wpływa wiele czynników, w tym przede wszystkim porowatość oraz rozkład wielkości porów, ale również skład i właściwości fazy stałej. W porach głównym czynnikiem odpowiedzialnym za transport ciepła jest konwekcja, a zatem ograniczenie rozmiaru porów jest korzystnym zabiegiem. Uzyskanie efektu zmniejszenia rozmiaru porów zależy od wielu czynników, uziarnienia surowców, dobrego zmieszania masy, właściwości proszku glinowego i warunków wyrastania masy. Są to głównie czynniki technologiczne. Faza stała, przynajmniej w ujęciu makroskopowym, również cechuje się mikroporowatością, głównie w matrycy cementowej i tu również konwekcja ma mniejszą, ale zauważalną rolę, w sumarycznym transporcie ciepła. Natomiast przy założeniu podobnego rozkładu porów w betonie wyprodukowanym z dodatkiem popiołu lotnego istotnym czynnikiem jest mechanizm przewodzenia ciepła w produktach hydratacji, głównie w C-S-H i, co bardziej istotne, nieprzereagowanych ziarnach nośnika krzemionki. I tu zaznacza się wpływ krystaliczności tego nośnika, bowiem przewodzenie ciepła w glinokrzemianowej fazie amorficznej, z której zbudowane są ziarna popiołów, jest znacznie mniejsze niż w przypadku krystalicznego kwarcu. Dodatkowo część ziaren popiołu wykazuje wewnętrzną porowatość zamkniętą, aż do formy mikrosfer włącznie, co dodatkowo wpływa korzystnie na współczynnika przewodzenia ciepła. Dodatkowym czynnikiem może być także obecność jonów glinu, które działają korzystnie na powstanie tobermorytu, a zatem zwiększają stopień przereagowania kwarcu (10, 11). Z punktu widzenia wytrzymałości substytucja popiołem lotnym piasku kwarcowego w procesie mielenia zapewnia większy stopień rozdrobnienia składników, a zatem również zwiększoną reaktywnością nośników krzemionki z jonami wapnia. Efektem może być zwiększenie wytrzymałości betonu komórkowego, jednak należy tu zachować ostrożność w uogólnianiu tego zjawiska, gdyż efekt ten często jest maskowany przez wpływ wielu innych czynników. Przy dużym stopniu zastąpienia zaznacza się

factors: grain size distribution, mass homogenization, properties of aluminum powder and mass rising conditions. These are mainly technological factors. The solid phase, at least in macroscopic terms, is also defined by microporosity, mainly between the crystallites, and here also the convection plays minor, but noticeable role in the total heat transport. On the other hand, assuming a similar pore distribution in concrete produced with the fly ash in relation to sand, an important factor is the heat transport mechanism in hydration products principally by C-S-H, and, more importantly, unreacted grains of the silica source. And here the influence of the crystallinity of this materials is noticeable, because the heat transport in the aluminosilicate amorphous phase of the ash grains is much smaller than in the case of crystalline quartz. In addition, some of the ash grains are defined by internal closed porosity, up to and including the form of microspheres, which additionally has a positive effect on the thermal conductivity coefficient. An additional factor may be the presence of aluminum ions, which promote the formation of tobermorite, and therefore increase the degree of quartz reaction (10, 11). From the point of view of strength, the substitution of fly ash instead of quartz sand in the grinding process, results in a greater fineness of the components and therefore also in an increased reactivity of the silica source with calcium ions. The effect may be the increase of the AAC strength, however, one should be careful in generalizing this phenomenon, as this effect is often masked by the influence of many other factors. With the high degree of replacement, the effect of the difference in the strength of the unreacted micro-aggregate, in favor of sand is marked.

The situation in the raw materials market is constantly changing, in particular the availability of high-quality fly ash, which is widely used in the production of CEM II and CEM IV-VI cements. This tendency, due to the increasing share of supplementary cementitious materials in cement and also due to environmental considerations, will probably not change in the future. We are looking for other raw materials that are a source of silica, in AAC technology. An example is the use of waste, formed during production of expanded perlite (12). The worldwide production of perlite exceeds 3 million tons.

wpływ różnicy w wytrzymałości nieprzereagowanego mikroskru-szywa, na korzyść piasku.

Sytuacja na rynku surowcowym ulega ciągłym zmianom, a w szczególności dotyczy dostępności do dobrej jakości popiołu lotnego, który chętnie jest wykorzystywany w produkcji cementu CEM II i CEM IV-VI. Tendencja ta, z uwagi na zwiększający się udział składników nieklinkierowych w produkowanych cementach, również wymuszony względami środowiskowymi, zapewne nie będzie się zmieniał w przyszłości. Poszukuje się także innych surowców stanowiących źródło krzemionki w technologii ABK. Przykładem jest wykorzystanie odpadu w formie pyłu powstającego podczas produkcji perlitu ekspandowanego (12). Światowa produkcja perlitu przekracza 3 mln ton, a ilość odpadu w formie frakcji mniejszej od 200  $\mu\text{m}$  szacowana jest na około 5-10%, w zależności od konstrukcji pieca fluidalnego, w którym prowadzony jest ten proces (13). Ziarna perlitu ekspandowanego zbudowane są z glinokrzemianowej fazy amorficznej, zawierającej około 70%  $\text{SiO}_2$ , 10-15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , i około 10% alkaliów w przeliczeniu na tlenki  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  i  $\text{Na}_2\text{O}$ . Jest to trudny do przetwarzania i zagospodarowania odpad ze względu na małą gęstość objętościową, a co za tym idzie, duże pylenie i znaczną porowatość. Jednak w przypadku kiedy stanowić będzie substytut piasku i dozowany będzie do młyna mokrego w formie zwilżonej lub nawet zawiesiny, problem pylenia przestaje mieć znaczenie. W procesie mielenia ziarna perlitu ekspandowanego łatwo się rozmielają do formy pojedynczych płytek perlitu, dzięki czemu składnik ten ma znacznie większą powierzchnię w stosunku do mielonego z nim razem piasku kwarcowego. Powoduje to dużą reaktywność perlitu w stosunku do jonów wapnia.

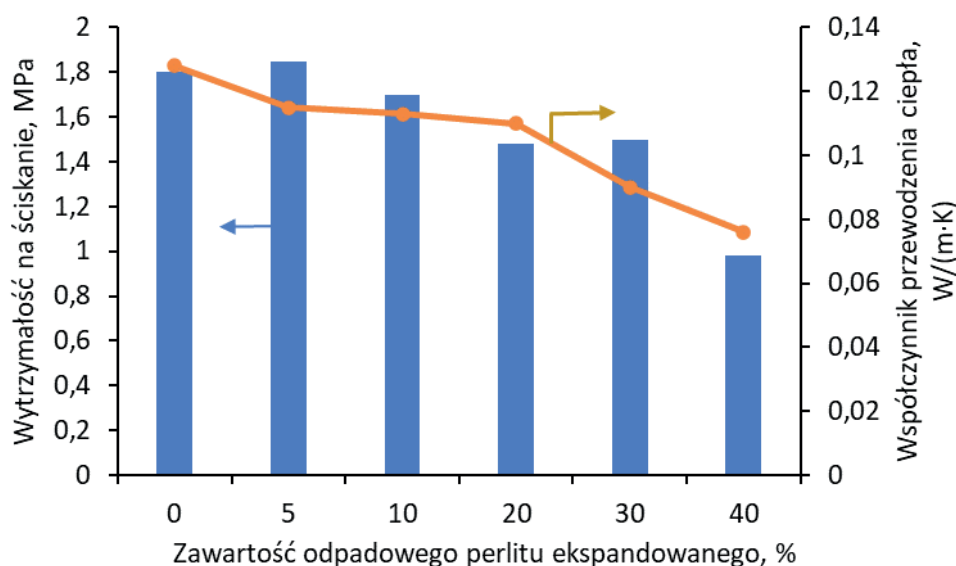
Makroskopowo efekt ten przejawia się możliwością uzyskania znacznej poprawy współczynnika przewodzenia ciepła, przy zachowaniu wytrzymałości na podobnym poziomie, aż do 30% substytucji piasku kwarcowego. Jest to bardzo obiecujący wynik, niemniej trzeba wziąć pod uwagę dostępność pyłu perlitowego, w odpowiedniej ilości. W Polsce nie ma złóż perlitu, a zakłady produkcyjne poszukują innych rozwiązań, zagospodarowania tego odpadu.

Stosowanie różnych dodatków mineralnych wpływa na mikrostrukturę matrycy betonu komórkowego. Zwykle w pracach przedstawia się bardzo dobrze wykształcony tobermorit, jednak jego skupienia, nie są przeciętnym obrazem mikrostruktury. Dobrze widoczny refleks w analizie XRD, pochodzący od tobermoritu, związany jest zazwyczaj z produktami krystalizującymi na wewnętrznych powierzchniach porów, generowanych przez wodór. Częstą formą mikrostruktury w masie jest włóknista lub wstęgowa postać fazy przejściowej

The amount of waste, dust with grain size below 200  $\mu\text{m}$  is estimated to be approximately 5%-10%, depending on the construction of the fluidized bed furnace, in which the process is carried out (13). Expanded perlite grains are composed of the amorphous aluminosilicate phase, containing about 70%  $\text{SiO}_2$ , 10-15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and approximately 10% alkali expressed as  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  and  $\text{Na}_2\text{O}$  oxides. It is a waste that is difficult to process and manage due to its low bulk density, and thus high dusting and high porosity. However, if it is a substitute for sand and is dosed to a wet mill in a moist form or even slurry, the problem of dusting ceases to be significant. In the grinding process, the expanded perlite grains easily grind into the form of single plates of expanded perlite, thanks to which this component has a much greater surface area, compared to co-ground quartz sand. This results in high reactivity of perlite with calcium ions.

Macroscopically, this effect is manifested by the possibility of obtaining a significant improvement in the thermal conductivity coefficient, while maintaining a similar strength level, up to 30% of quartz sand substitution. This is a very promising result, but the availability of perlite dust in a sufficient quantity, must be taken into account. There are no raw perlite rock deposits in Poland, and producing plants are looking for other solutions, for this waste developing.

The use of various mineral additives affects the microstructure of the cellular concrete matrix. Most of the published works show very well-formed tobermorite crystals, but such agglomerations are not the average image of the microstructure. The clearly visible tobermorite peaks in the XRD patterns, are usually associated with products crystallizing on the inner surfaces of the pores, generated by hydrogen. A common form of mass microstructure is the fibrous or ribbon forms of the C-S-H phase, partially transformed into tobermorite. Scawtite was also observed in samples



Rys. 2. Efekt częściowego zastąpienia piasku kwarcowego przez odpadowy perlit ekspandowany na właściwości ABK, na podstawie (12)

Fig. 2. The effect of partial replacement of quartz sand by waste expanded perlite on the AAC properties, according to (12)

między C-S-H a tobermorytem. W próbkach zawierających dodatki węglanowe obserwuje się dodatkowo scawtyt. W pracy (14) podjęto próbę zamiany gipsu mączką wapienną, w składzie autoklawizowanego betonu komórkowego. Wprawdzie celem autorów było zastąpienie gipsu z uwagi na potencjalną możliwość wymywania jonów siarczanowych ze składowiska odpadów zawierających gruz betonu komórkowego, niemniej jednak praca jest interesująca ze względu na zmianę składu fazowego produktów, po autoklawizacji. Obiecująca jest możliwość zwiększenia stopnia przereagowania kwarcu w takim układzie dzięki formowaniu się scawtytu  $[Ca_7[Si_6O_{18}](CO_3) \cdot 2H_2O]$ , który potencjalnie może tworzyć struktury przypominające rozety. Choć zgodnie z pracą Matsui (15) jony siarczanowe przyspieszają przemianę C-S-H w tobermoryt, to zawartość drobnych ziaren mączki wapiennej także może mieć takie działanie, a z pewnością działanie powstawania hetero-zarodków.

Zanotowano niewielki wzrost gęstości objętościowej przy utrzymaniu podobnego poziomu wytrzymałości, jednak z uwagi na złożone oddziaływania układ wymaga dalszych badań, szczególnie w kontekście wpływu mączki wapiennej na wyrastanie masy i przewodnictwo cieplne betonu.

Zmniejszenie potencjalnego wymywania jonów siarczanowych z gruzu betonu komórkowego, można uzyskać przez wprowadzenie do matrycy betonu prażonej gliny (19). W wariacie takim można uzyskać analogiczne właściwości użytkowe betonu tj. wytrzymałość, współczynnik przewodzenia ciepła i skurcz na podobnym poziomie, co próbek odniesienia.

Szczególnie z punktu widzenia zmniejszenia zapotrzebowania na energię zużytą w procesie mielenia piasku, interesujące są próby wykorzystania różnych odpadowych pyłów mineralnych, np. pyłu

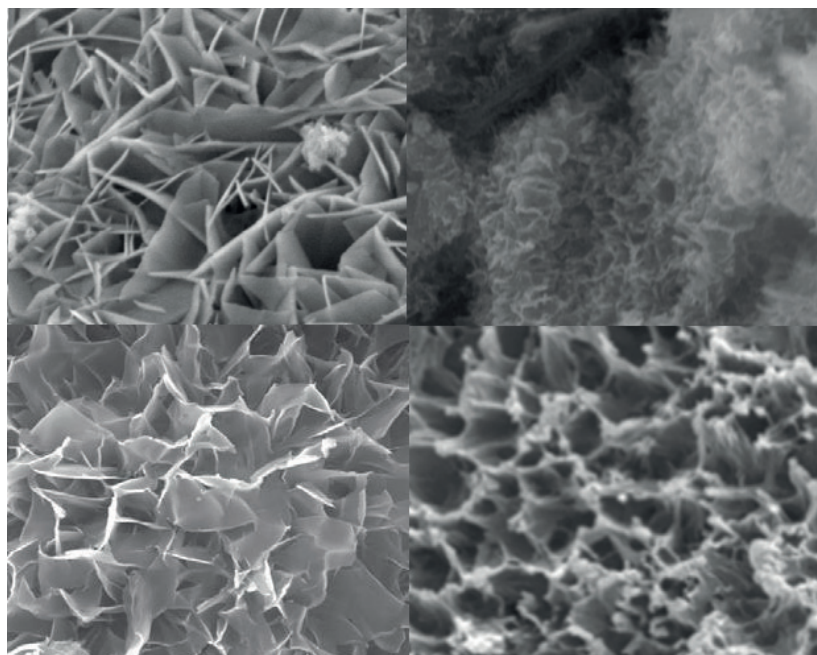
containing carbonate additives. In the study (14) an attempt was made to replace gypsum, with limestone meal in AAC. Although the aim of the authors was to replace gypsum due to the potential possibility of leaching sulphate ions from landfilled AAC wastes, the work is interesting due to the change of the phase composition of the products after autoclaving. The possibility of increasing quartz conversion in such a system is promising thanks to the formation of scawtite  $[Ca_7[Si_6O_{18}](CO_3) \cdot 2H_2O]$ , which has the potential to form rosette-like structures. Although, according to the work of Matsui (15), the sulphate ions accelerates the conversion of C-S-H to tobermorite. The presence of fine grains of limestone may also potentially have such an effect, and certainly a hetero-nuclei formation effect.

There was a slight increase in the volume density while maintaining a similar strength, however, due to the complex nature of the interactions, the system requires further research, especially in the context of the influence of the contents of limestone, on the mass rising and thermal conductivity of AAC.

The decrease in leaching of the sulphate ions from the waste AAC, can be achieved by introducing calcined clay into the concrete matrix (19). In such a variant, it is possible to obtain similar functional properties of concrete, i.e. strength, thermal conductivity and shrinkage, at a level similar to that of the reference samples.

Particularly from the point of view of reducing the energy demand expended in the sand grinding process, the use of various waste mineral dusts, e.g. granite dust (17), dust, or rather sediments formed during the cutting of rock blocks (20), seems to be interesting.

According to available estimates, the amount of dust generated during granite processing, exceeds 50% of the granite stone content, offered as the final product (22). During many stages of its treatment, significant amounts of fine dust are produced, with a dominant particle size of several dozen micrometers. The dust contains approximately 65%  $SiO_2$ , 20-25% of the sum of  $Al_2O_3$  and  $Fe_2O_3$  and up to 10% alkali. Therefore, it can be an attractive replacement for sand, limiting the need to grind it, to the large surface area. In work (17) on AAC with a relatively high volume density - higher than  $1000 \text{ kg/m}^3$ , a favourable effect on strength was demonstrated, which was due to the matrix compaction and the increase in the bulk density of concrete, with dust. A linear increase in the thermal conductivity coefficient, as a function of the amount of dust introduced, was also observed. In the case of varieties with a much lower bulk density, this effect will probably be less visible, because of the dense matrix, but one should not expect an improvement in insulation in this system. Similarly, the waste generated when cutting rock blocks, not only granite ones, is characterized by a high content of silica, despite the obvious differences in the mineralogical composition, excluding carbonate rocks. It is estimated that when cutting blocks, the



Rys. 3. Przykłady mikrostruktury autoklawizowanego betonu komórkowego z różnymi dodatkami mineralnymi, na podstawie (12, 16-18)

Fig. 3. Examples of the microstructure of AAC with various mineral additives, according to (12, 16-18)

granitowego (17), czy pyłów, a właściwie osadów powstających podczas cięcia bloków skalnych (20).

Zgodnie z dostępnymi szacunkami w czasie obróbki granitu powstająca ilość pyłu przekracza 50% zawartości kamienia granitowego, oferowanego jako produkt końcowy (22). Podczas wielu etapów jego obróbki powstają znaczne ilości drobnego pyłu o dominującym uziarnieniu kilkudziesięciu mikrometrów. Pył ten zawiera w przeliczeniu na tlenki około 65%  $\text{SiO}_2$ , 20-25% sumy  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oraz do 10% alkaliów. Może zatem stanowić atrakcyjny zamiennik piasku, ograniczając konieczność jego mielenia do dużej powierzchni. W pracy Zafara i in. (17) dotyczącej betonów komórkowych o stosunkowo dużej gęstości objętościowej - ponad  $1000 \text{ kg/m}^3$ , wykazano korzystny wpływ na wytrzymałość, za który odpowiadał efekt zagęszczenia matrycy i zwiększona gęstość objętościowa betonu, z dodatkiem pyłu. Stwierdzono również liniowy wzrost współczynnika przewodzenia ciepła, w funkcji ilości wprowadzonego pyłu. W przypadku odmian, o znacznie mniejszej gęstości objętościowej, efekt ten zapewne będzie mniej widoczny z uwagi na udział zwartej matrycy, ale raczej nie należy się spodziewać poprawy izolacyjności w tym układzie. Podobnie, dużą zawartością krzemionki cechują się odpady powstające przy cięciu bloków skalnych, nie tylko granitowych, mimo oczywistych różnic w składzie mineralogicznym, z wyłączeniem skał węglanowych. Szacuje się, że przy cięciu bloków powstaje ilość odpadów w formie pyłu, dochodząca do 10% masy wycinanej skały (23). W pracy Wana i in. (20) zwrócono uwagę na zanieczyszczenie technologiczne fosforanami i dodatkami do wody oraz odpadu z procesu cięcia, jednak o niewielkim znaczeniu dla dalszej przeróbki. Uziarnienie pyłu z cięcia jest nieco grubsze niż z polerowania granitu, ale w większości przypadków nie przekracza  $100 \mu\text{m}$ . Korzystnym jest brak konieczności suszenia odpadu przy wprowadzeniu w formie zawiesiny, wraz ze szlamem z młyna mokrego piasku, jako jego częściowy substytut. Wykazano praktycznie brak większego wpływu zarówno na proces wyrastania masy, gęstość objętościową, wytrzymałość na ściskanie po autoklawizacji, jak też na wartość współczynnika przewodzenia ciepła otrzymanych próbek betonu, nawet przy całkowitym zastąpieniu piasku pyłem, z cięcia bloków skalnych. Z punktu widzenia ochrony środowiska jest to bardzo atrakcyjne rozwiązanie, nie tylko ze względu na oszczędność energii zużywanej do mielenia piasku, ale również potencjalnego suszenia osadów, w celu ich wykorzystania w innej technologii.

Źródłem krzemionki mogą też być różne inne materiały np. łupki węglowe, wypalone (16), stłuczka szklana (24), żużle metalurgiczne i popioły z odpadów komunalnych (25). Szczególnie te ostatnie są coraz częściej przedmiotem badań, z uwagi na ciągle zwiększającą się ilość powstających odpadów, szczególnie w dużym miastach, i problemami z ich hałdowaniem. Zgodnie z danymi GUS w 2020 roku w Polsce zebranych zostało 13,1 mln ton odpadów komunalnych, z czego 20,3% zostało skierowane do przekształcenia termicznego, z odzyskiem energii, co stanowiło ponad 2,6 mln ton. Średnio na mieszkańca Polski wypada około 380 kg odpadów rocznie, co i tak jest znacznie mniej niż w Europie, w której jest około 500 kg (26). Po spaleniu odpadów komunalnych powstają popioły lotne, i bardziej interesujące, ze względu na

amount of waste in the form of dust, is up to 10% of the mass of the cut rock (23). In the work of Wan et al. (20), attention was paid to technological contamination with phosphates and coolant, of water additives to the cutting waste, but it was of the little importance for further processing. The grain size of the cutting dust is slightly coarser than that of the granite polishing, but in most cases it does not exceed  $100 \mu\text{m}$ . It is advantageous that the waste does not need to be dried, when introduced in the form of a slurry together with the wet-milled sand slurry, as a partial substitute for it. It was showed that there was practically no significant influence on the mass rising process, the bulk density, the compressive strength after autoclaving, as well as on the value of the thermal conductivity coefficient of the obtained concrete samples, even with complete replacement of sand with the dust, from cutting rock blocks. From an environmental point of view, this is a very attractive solution, not only in terms of saving energy used to grind sand but also in potentially drying of the slurry, for use in other technologies.

The source of silica can also be various other materials, e.g. burnt coal shale (16), glass cullet (24), metallurgical slag and municipal waste ash (25). Especially the latter are more and more often the subject of research, due to the constantly increasing amount of waste generated, especially in large cities, and the problems with its disposal. According to the data of the Statistics Poland [GUS], in 2020, 13.1 million tonnes of municipal waste was collected in Poland, of which 20.3% was directed to thermal conversion with energy recovery - over 2.6 million tonnes. On average, there is about 380 kg of waste per one inhabitant of Poland, which is much less than in Europe about 500 kg (26). After incineration of municipal waste, fly ash is obtained, as well as bottom ash, which is more interesting due to, among others, lower content of heavy metals (27). Bottom waste constitutes about 80% of ashes from incineration of municipal waste (28). These wastes usually contain, apart from silica, high CaO content, even 30%, and a few percent of  $\text{P}_2\text{O}_5$ . The presence of phosphorus compounds disqualifies, or significantly reduces the possibility of direct use of bottom waste in cement-based composites, due to their negative effect on cement hydration. However, in the case of autoclaved aerated concrete, the benefits are seen in the simultaneous replacement of both - part of the quartz sand and part of burnt lime. These ashes may also contain metallic aluminium (29). The results of the work of Song et al. (25) indicate the possibility of using bottom ash both as a partial replacement for quartz sand, but more interesting, as a replacement for aluminium powder. Although the amount of hydrogen formed in the reaction of Al with calcium hydroxide, is about 100 times lower than when using Al powder, however, due to the very small amounts of aluminium powder introduced into the mixture, nothing prevents introducing many times greater amounts of ashes.

In the case of introducing up to 30% of bottom ash from combustion, without the use of aluminium powder, AAC with a bulk density of  $630 \text{ kg/m}^3$  and a compressive strength of 6 MPa, was obtained. In each case, a much more favourable pore size distribution in the bulk was found, in comparison to the samples in which the foaming was carried out, with the use of aluminium powder.

mniejszą zawartość metali ciężkich, popioły denne (27). Odpady denne stanowią około 80% popiołów ze spalania odpadów komunalnych (28). Odpady te zwykle zawierają oprócz krzemionki dużo CaO, nawet 30%, oraz kilkuprocentową zawartość  $P_2O_5$ . Obecność związków fosforu dyskwalifikuje, lub znacznie ogranicza możliwość bezpośredniego wykorzystania odpadów dennych w kompozytach cementowych, z uwagi na ich niekorzystny wpływ na hydratację cementu. Natomiast w przypadku autoklawizowanego betonu komórkowego, korzyści upatruje się w jednoczesnym zastąpieniu zarówno części piasku kwarcowego jak i wapna. Popioły te mogą również zawierać metaliczne aluminium (29). Wyniki pracy Songa i in. (25) wskazują na możliwość wykorzystania popiołów dennych, zarówno jako częściowy zamiennik piasku kwarcowego, ale co bardziej interesujące, jako zamiennik proszku glinowego. Ilość wodoru powstającego w reakcji z wodorotlenkiem wapnia jest wprawdzie około 100 razy mniejsza niż w przypadku stosowania proszku Al, jednak z uwagi na bardzo małe ilości wprowadzanego do mieszanki proszku glinowego, nic nie stoi na przeszkodzie dodawać wielokrotnie większe ilości popiołów.

W przypadku wprowadzenia do 30% popiołów dennych, ze spalania bez udziału proszku glinowego, uzyskano beton komórkowy o gęstości objętościowej rzędu  $630 \text{ kg/m}^3$ , i wytrzymałości na ściskanie na poziomie 6 MPa. W każdym przypadku obserwowano znacznie korzystniejszą strukturę porów w masie w stosunku do próbek, w których uzyskanie porów przeprowadzane było z udziałem proszku glinowego.

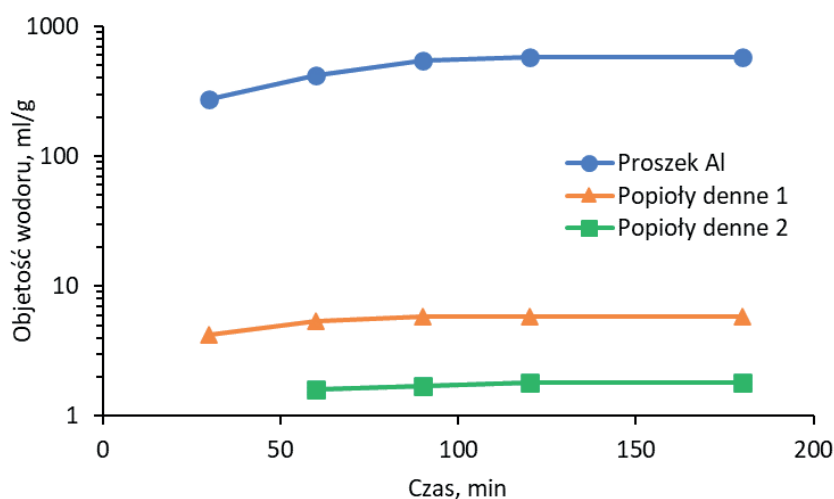
Zdecydowanie mniej prac poświęconych jest próbom znalezienia przynajmniej częściowej substytucji wapna, wykorzystywanego w tej technologii. Właściwości wapna, przede wszystkim jego reaktywność, czas wystąpienia i maksymalna temperatura osiągnięta w procesie, bezpośrednio wpływa na wyrastanie masy, jak również na dostępność jonów wapniowych, do reakcji z krzemionką. Z tego względu należy wykazać dużą ostrożność w przenoszeniu wyników uzyskanych w laboratorium, do praktyki przemysłowej. Niemniej jednak jest to ważny problem, z uwagi na zmniejszenie ilości wykorzystywanego materiału [CaO], podczas produkcji, w którym powstają duże ilości  $CO_2$  z rozkładu węglanu wapnia i spalaniu paliwa.

Wapno może być częściowo zastąpione popiołem, uzyskiwanym ze spalania makulatury (29). Popiół ten zawiera duże ilości CaO - nawet więcej od 40%, z uwagi na powszechnie stosowany wypełniacz węglanowy w produkcji papieru, ale też może zawierać duże ilości siarczanów. W pracy podjęto próbę całkowitego zastąpienia wapna, popiołem ze spalania papieru. Wskazano na taką możliwość, jednak pewnym ograniczeniem jest stosunek CaO/SiO<sub>2</sub> w mieszance i jego wpływ zarówno na skład fazowy, utrudnione powstawanie tobermorytu, ale również wytrzymałość. Wg autorów, najlepsze rezultaty, które mogą być przeniesione na praktykę

Much less work is devoted to find at least a partial substitute for the burnt lime, used in this technology. The properties of burnt lime, especially its reactivity, the maximum temperature achieved in the process and the time of its occurrence, directly affect the process of mass rising, as well as the availability of calcium ions, for the reaction with silica. For this reason, great care should be taken in transferring the results obtained in the laboratory to the industrial practice. Nevertheless, it is a significant issue, due to the possible reduction of the amount of burnt lime, during the production in which large amounts of  $CO_2$  are emitted from limestone decomposition and fuel combustion.

An example of burnt lime substitution is its partial replacement with ash, obtained from burning the waste paper (29). This ash contains large amounts of CaO, even above 40%, due to the commonly used carbonate filler in papermaking, but it can also has large content of sulphates. The study attempts to completely replace lime with the ash, from burning paper. Such a possibility was pointed out, but a certain limitation is obtaining the favourable CaO/SiO<sub>2</sub> ratio in the mixture and its influence both on the phase composition - hindered formation of tobermorite, but also on strength. According to the authors, the best results that can be applied in industrial practice, were obtained with the CaO/SiO<sub>2</sub> ratio in the range of 0.7 to 0.8.

Attempts were also made to use the waste from cleaning flue of gases from waste incineration, with spraying slaked lime slurry (30). The waste was used in the form in which it is generated in the gas cleaning process, as well as, to activate it, after preliminary thermal treatment at  $550^\circ\text{C}$ . According to the authors, such waste can potentially be a partial substitute for lime, despite a slight negative impact on the pore distribution and thus deterioration of the thermal insulation properties of concrete. Nevertheless, it should be noted that gas cleaning wastes contain chlorides, often in large amounts, which may be an obstacle in the use of this material.



Rys. 4. Ilość wodoru generowana przez proszek glinowy w teście porównawczym z popiołami dennymi ze spalania odpadów komunalnych, na podstawie (25)

Fig. 4. The amount of hydrogen generated by aluminum powder in the comparative test with bottom ash from municipal waste incineration, according to (25)



przemysłową uzyskano, w przypadku gdy stosunek  $\text{CaO/SiO}_2$  był w granicach 0,7-0,8.

Podjęto też próby wykorzystania odpadu z oczyszczania gazów spalinowych ze spalania odpadów metodą wapienną (30). Zastosowano odpad w formie jakiej powstaje w procesie oczyszczania gazów, jak również, w celu jego uaktywnienia, po wstępnej obróbce termicznej w  $550^\circ\text{C}$ . Odpad taki wg autorów (30) może stanowić częściowy substytut wapna, mimo niewielkiego negatywnego wpływu na rozkład porów, a co za tym idzie, pogorszenia właściwości termoizolacyjnych betonu. Niemniej jednak, należy zwrócić uwagę, że odpady z oczyszczania gazów zawierają chlorki, często w dużej ilości, co może być przeszkodą, w zastosowaniu tego materiału.

### 3. Recykling betonu komórkowego

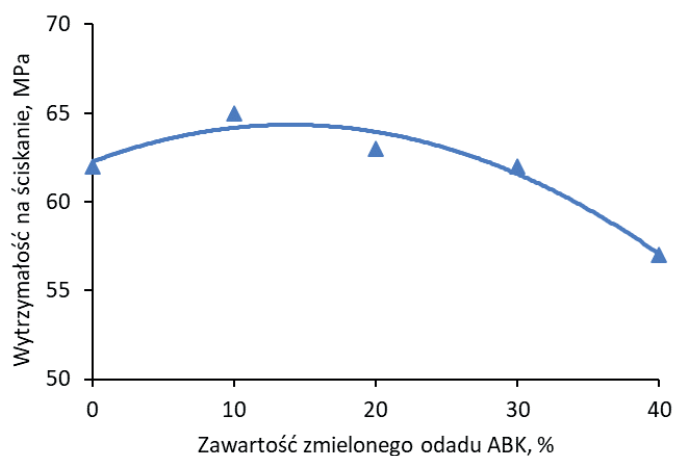
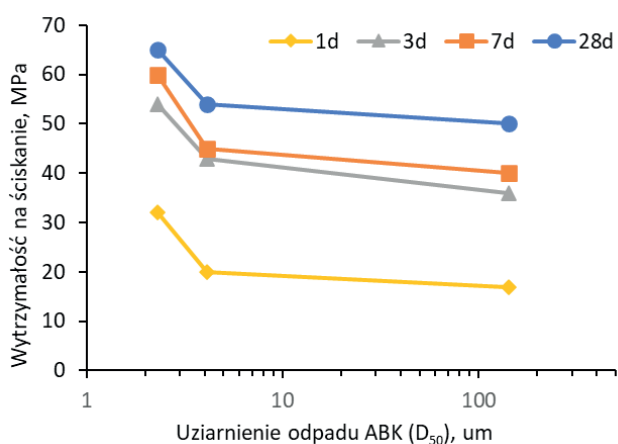
Beton komórkowy jest jednym z najpopularniejszych materiałów budowlanych, stosowanych do wznoszenia ścian. Produkcja w Europie przekracza poziom 16 mln  $\text{m}^3$  rocznie (31), a światowa ilość produkowanego autoklawizowanego betonu komórkowego, szacowana jest na 450 mln  $\text{m}^3$  wyrobów niezbrojonych (32). Przez minione dekady z betonu komórkowego powstały miliony obiektów, które z biegiem czasu poddawane są rozbiórce. Po segregacji i oczyszczeniu, materiał taki może być poddany recyklingowi materiałowemu. Wykorzystanie części odpadów możliwe jest wprost po rozkruszeniu, bez dodatkowego przetworzenia - sorbent, zastosowania w agrotechnice, natomiast, ze względu na potencjalną skalę wykorzystania, wartościowe są próby stosowania odpadu po zmieleniu, jako dodatku lub substytutu cementu w zaprawach i betonach. W tym kontekście istnieją jednak dwa duże ograniczenia: wspomniany wcześniej poziom wymywania jonów siarczanowych z odpadu, ze względu na stosowany gips oraz porowata mikrostruktura, której negatywny wpływ na przepuszczalność np. jonów chlorkowych w betonie może być znaczny, już przy niewielkiej ilości stosowanego dodatku. W większości przypadków proponuje się więc mielenie odpadu, w niektórych przypadkach nawet do poziomu kilku mikrometrów. Dzięki poro-

### 3. CC recycling

Cellular concrete [CC] is one of the most popular building materials used for erecting walls. Production in Europe exceeds the level of 16 million  $\text{m}^3$  per year (31), and the world volume of autoclaved cellular concrete is estimated as 450 million  $\text{m}^3$  of unreinforced products annually (32). Over the past decades, CC has been used to create millions of objects that are demolished over time. After segregation and cleaning, such material can be recycled. Part of the waste can be used directly after crushing, without additional processing - sorbent and agrotechnical applications, however, due to the potential scale of use, attempts to use the waste after grinding as an additive or substitute for cement in mortars and concretes, are valuable. In this context, however, there are two major limitations: the aforementioned level of leaching of sulphate ions from the waste, due to the gypsum used for mix formulation and the porous microstructure, the negative impact of which on the permeability of e.g. chloride ions in concrete may be significant, even with a small amount of the additive used. Therefore, in most cases it is proposed to ground the waste, in some cases even under to the level of a few micrometres. Due to the porous microstructure of cellular concrete, the energy input in this process is many times lower than in the case of other, usually used, supplementary cementitious materials. The impact of waste grinding and the level of cement replacement was analysed, among others, by He et al. (33).

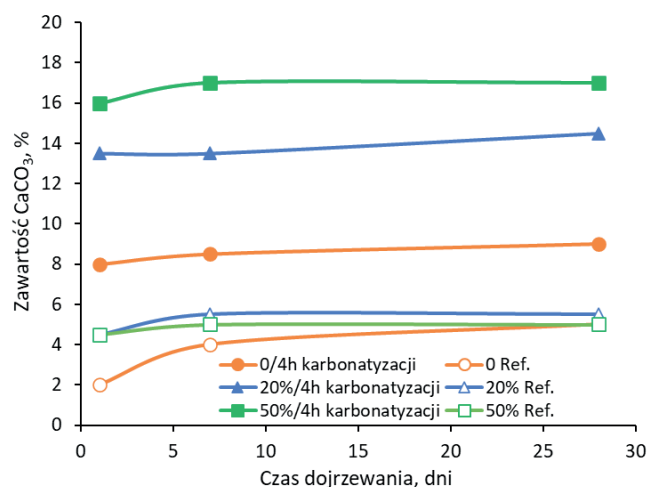
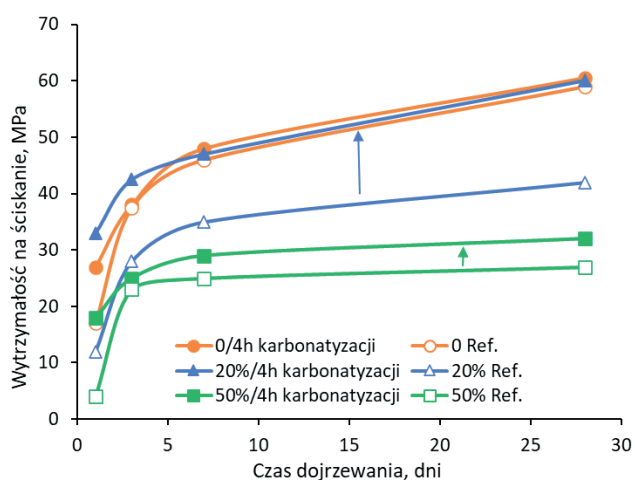
Increased water demand and an effect on cement setting time, have also been reported. The effective influence on the properties was obtained by using the smallest particle size of the waste. This work also presents an analysis of the energy balance and costs for a 20% share of ground waste in cement, showing a 20% reduction in both  $\text{CO}_2$  emissions and total process costs, while maintaining similar strength as in the reference sample.

A comparison of the effect of ground cellular concrete with other ground mineral waste, on the properties of cement composites can be found by Yang et al. (34).



Rys. 5. Wpływ uziarnienia odpadu autoklawizowanego betonu komórkowego przy 20% zamianie cementu, na wytrzymałość zapraw dla różnych czasów dojrzewania oraz wytrzymałość zapraw z różną zawartością odpadu zmielonego do  $D_{50} = 2,3 \mu\text{m}$ , po 28 dniach dojrzewania, na podstawie (33)

Fig. 5. Influence of the grains size distribution of cellular concrete waste at 20% replacement of cement, on the strength of mortars for different maturation times and the strength of mortars with different content of waste ground to  $D_{50} = 2,3 \mu\text{m}$ , after 28 days of curing, on the basis of (33)



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie zapraw i zawartość  $\text{CaCO}_3$  w masie po przyspieszonej karbonatyzacji, w funkcji czasu dojrzewania dla różnego stopnia zastąpienia cementu mielonym odpadem ABK, na podstawie (35)

Fig. 6. Compressive strength of mortars and  $\text{CaCO}_3$  content in the mass after accelerated carbonation as a function of maturation time, for a different degree of replacement of cement with ground AAC waste, according to (35)

watej mikrostrukturze betonu komórkowego, wkład energetyczny w ten proces jest wielokrotnie mniejszy niż w przypadku innych, zwykle wykorzystywanych dodatków mineralnych do cementu i betonu. Wpływ zmielenia odpadu i poziomu zastąpienia cementu analizowany był m.in. w pracy He i in. (33).

Zanotowano również zwiększoną wodożądność i wpływ na czas wiązania cementu. Efektywny wpływ na właściwości uzyskano stosując najmniejsze uziarnienie odpadu. W pracy tej przedstawiono również analizę bilansu energetycznego i kosztów dla 20% udziału mielonego odpadu w cemencie, wykazując 20% ograniczenie zarówno emisji  $\text{CO}_2$  jak i całkowitych kosztów procesu, przy zachowaniu podobnej wytrzymałości, w stosunku do próbki odniesienia.

Porównanie wpływu mielonego, autoklawizowanego betonu komórkowego z innymi mielonymi odpadami mineralnymi, na właściwości kompozytów cementowych można znaleźć w pracy (34).

Ciekawą propozycję wykorzystania odpadu z betonu komórkowego zaprezentowano natomiast w artykule Qin i Gao (35). Odpad, po zmieleniu do ziaren wielkości kilkudziesięciu mikrometrów, dodawany był jako zamiennik cementu portlandzkiego do kompozytów, które następnie po krótkim dojrzewaniu, poddawane były przyspieszonej karbonatyzacji. Jest to jedna z coraz częściej rozpatrywanych metod wykorzystania  $\text{CO}_2$ , a przy okazji również zwiększenia wytrzymałości wczesnej, prefabrykatów betonowych (36, 37).

Stwierdzono zwiększoną wytrzymałość, szczególnie po kilkugodzinnej karbonatyzacji, rozpoczętej we wczesnym stadium dojrzewania zapraw cementowych. Wzajemna relacja między wytrzymałością zapraw a ich przepuszczalnością, a zatem i późniejszą trwałością, ogranicza ilość wprowadzanego mielonego odpadu do 20% masy cementu. Jest to obiecująca metoda zarówno utylizacji odpadu z betonu komórkowego, jak również zmniejszenie emisji  $\text{CO}_2$ . Poza zmniejszeniem ilości cementu, a zatem emisji związanej

An interesting proposal for the use of the CC waste was presented in Qin and Gao paper(35). After the waste ground to the size of several dozen micrometers, it was added as a replacement for Portland cement to composites, which then, after a short maturation, were subjected to accelerated carbonation. It is one of the methods of the  $\text{CO}_2$  use that is considered more and more frequently and, at the same time, increasing the early strength of concrete precast elements (36, 37).

Increase in strength was found, especially after several hours of carbonation, which started at the early stage of cement mortars curing. The mutual relation between the strength of the mortars and their permeability, and thus also the later durability, limits the amount of ground waste introduced to 20% of the cement mass. It is a promising method both for the utilization of CC waste and for reducing the amount of  $\text{CO}_2$ . In addition to reducing the content of cement, and therefore the emission related to burning clinker for its production, according to the authors, it is possible to bind a dozen percent of  $\text{CO}_2$  in the mass of the binder in the composite.

Another way of using cellular concrete waste is its use as an additive to cement-based composites, to reduce autogenic shrinkage (38). This effect is achieved through the ability to retain water in the pores of the waste of the CC grains. Then, water is available during cement hydration, reducing the risk of shrinkage cracks, associated with surface drying. With the use of crushed waste, greater efficiency was achieved in reducing shrinkage and internal curing than in the case of expanded perlite. Nevertheless, such results must be related to the influence on other properties, e.g. permeability, and thus the subsequent durability of such materials.

#### 4. Conclusions

Autoclaved cellular concrete can be seen from many points of view, as an environmentally friendly material. Both the optimized produc-

z wypaleniem klinkieru do jego produkcji, wg autorów możliwe jest związanie kilkunastu procent CO<sub>2</sub>, w masie spoiwa w kompozycie.

Innym kierunkiem wykorzystania odpadu z autoklawizowanego betonu komórkowego, jest jego zastosowanie jako dodatek do kompozytów cementowych, zmniejszających skurcz autogeniczny (38). Efekt ten uzyskiwany jest dzięki zdolności do zatrzymywania wody w porach dodatku, która jest wolna w czasie hydratacji cementu zmniejszając ryzyko spękań skurczowych, związanych z wysychaniem powierzchni. Przy zastosowaniu kruszonego odpadu, uzyskano większą efektywność ograniczania skurczu i autopielęgnacji niż w przypadku perlitu ekspandowanego. Niemniej jednak wyniki takie muszą być powiązane z wpływem na innych właściwości, np. przepuszczalności, a co za tym idzie, późniejszą trwałość takich materiałów.

#### 4. Wnioski

Autoklawizowany beton komórkowy z wielu punktów widzenia może być postrzegany jako materiał przyjazny środowisku. Zarówno sam proces produkcji, w tym możliwość wykorzystania mikrododatków i odpadów z innych technologii, jak i efektywne wykorzystanie bardzo dobrych właściwości termoizolacyjnych w czasie eksploatacji. Po zakończeniu cyklu życia również łatwość recyklingu i przetworzenia odpadów z autoklawizowanego betonu komórkowego, uzasadniają taką ocenę. Mimo zmiany oblicza świata, i zmiany priorytetów społecznych, technologia produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego wciąż jest, i ma potencjał żeby również w przyszłości być, jedną z najbardziej przyjaznych środowisku technologii, wytwarzania materiałów budowlanych.

#### Literatura / References

1. A. Hinc, Transformacja gospodarki w kierunku niskoemisyjnym. *Studia BAS* **29**, 109-136 (2012).
2. "Fit for 55" package [part of the European Green Deal], adopted by the European Commission on July 14, 2021.
3. B.G. Hellers, R. Schmidt, Autoclaved Aerated Concrete (AAC) – the story of low-weight material. *Proc. V Int. Conf. of Autoclaved Aerated Concrete*, Bydgoszcz 2011.
4. G. Zapotoczna-Sytek, S. Balkovic, Autoclaved aerated concrete. PWN, Warszawa 2013 (in Polish).
5. N. Narayanan, K. Ramamurthy, Microstructural investigations on aerated concrete. *Cem. Concr. Res.* **30**, 457-464 (2000). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00199-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00199-X)
6. X. Qu, X. Zhao, Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete – A review. *Constr. Build. Mater.* **135**, 505-516 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.208>
7. Announcement of the Minister of Investment and Development Of Poland of April 8, 2019 on the announcement of the uniform text of the ordinance of the Minister of Infrastructure on technical conditions to be met by buildings and their location. *Journal of Laws of The Republic of Poland* 2019, item 1065.

tion process itself, including the possibility of using by-products and wastes from other technologies as raw materials, as well as very good thermal insulation properties of final material, and after the end of the life cycle, the easy of recycling and processing of CC wastes, justify such a perception. Despite the changing face of the world and the change in social priorities, the technology of cellular concrete production is still one of the most environmentally friendly technologies, for the production of building materials in the future.

8. P. Walczak, P. Szymański, A. Różycka, Autoclaved Aerated Concrete based on fly ash in density 350 kg/m<sup>3</sup> as an environmentally friendly material for energy – efficient constructions. *Proc. Eng.* **122**, 39–46 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.005>
9. N.N. Lam, Influence of fly ash and recycled AAC waste for replacement of natural sand in manufacture of Autoclaved Aerated Concrete. 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **505** 012001 (2020). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012001>
10. W. Nocuń-Wczelik, Effect of Na and Al on the phase composition and morphology of autoclaved calcium silicate hydrates. *Cem. Concr. Res.* **29**, 1759-1767 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00166-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00166-0)
11. N.Y. Mostafa, A.A. Shaoult, H. Omar, S.A. Abo-El-Enim, Hydrothermal synthesis and characterization of aluminum and sulphate substituted 1.1 nm tobermorites. *J. Alloys Compd.* **467**, 332-337 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.11.130>
12. A. Różycka, W. Pichór, Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated Concrete. *Constr. Build. Mater.* **120**, 65–71 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.019>
13. Perlite and Vermiculite: 2014 Market Review and Forecast, Merchant Research & Consulting Report, 2014.
14. W. Kurdowski, J. Pawluk, Limestone meal as active mineral additive for production of aerated autoclaved concrete. *Cem. Wapno Beton* **24**(2) 154-160 (2019).
15. K. Matsui, A. Ogawa, J. Kikuma, M. Tsunashima, T. Ishikawa, S. Matsuno, Influence of addition of Al compound and gypsum on tobermorite formation in autoclaved aerated concrete studied by in situ X-ray diffraction. *Cem. Wapno Beton*, **16**(special issue), 3-6 (2011).
16. R.D. Wu, S.B. Dai, S.W. Jian, J. Huang, H.B. Tan, B.D. Li, Utilization of solid waste high-volume calcium coal gangue in autoclaved aerated concrete: Physico-mechanical properties, hydration products and economic costs. *J. Clean. Prod.* **278**, 123416 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123416>
17. M.S. Zafar, U. Javed, R.A. Khushnood, A. Nawaz, T. Zafar, Sustainable incorporation of waste granite dust as partial replacement of sand in autoclave aerated concrete. *Constr. Build. Mater.* **250**, 118878 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118878>
18. W. Pichór, Properties of autoclaved aerated concretes with cenospheres from coal ash. *Cem. Wapno Beton* **17**, 32-36 (2012).
19. C. Chucholowski, H. Müller, K.-Ch. Thienel, Low-sulfate autoclaved aerated concrete (AAC): A recyclable AAC with calcined clay. *Constr. Build. Mater.* **342**, 127984 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127984>
20. H. Wan, Y. Hu, G. Liu, Y. Qu, Study on the structure and properties of autoclaved aerated concrete produced with the stone-sawing mud. *Constr. Build. Mater.* **184**, 20-26 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.214>
21. J. Mendoza M. Feced, G. Feijoo, A. Josa, X. Gabarrell, J. Rieradevall, Life cycle inventory analysis of granite production from cradle to gate. *Int. J. Life Cycle Assess.* **19**, 153-165 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0637-6>
22. L. Lakhani, R.K. Sharma, P. Tomar, Utilization of stone waste in the development of value added products: a state of the art review. *JESTR* **7**, 180–187 (2014). <https://doi.org/10.25103/jestr.073.29>
23. P. Torres H.R. Fernandes, S. Olhero, J.M.F. Ferreira, Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. *J. Eur. Ceram. Soc.* **29**, 23-30 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.045>
24. W. Szudek, Ł. Gótek, G. Malata, Z. Pytel, Influence of waste glass powder addition on the microstructure and mechanical properties of autoclaved building materials. *Materials* **15**, 434 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15020434>
25. Y. Song, Z.L. B. Li, E.-H. Yang, Y. Liu, T. Ding, Feasibility study on utilization of municipal solid waste incineration bottom ash as aerating agent for the production of autoclaved aerated concrete. *Cem. Concr. Comp.* **56**, 51-58 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.006>
26. Municipal waste generated in 2019. Eurostat report, 2021.
27. C. Lam, A.W.M. Ip, J.P. Barford, G. McKay, Use of Incineration MSW Ash: A Review. *Sustainability* **2**, 1943-1968 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.045>
28. J.M. Chimenos, M. Segarra, M.A. Fernández, F.Espiell, Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. *J. Hazardous Mater.* **64**, 211-222 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(98\)00246-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(98)00246-5)
29. A. Hauser, U. Eggenberger, T. Mumenthaler, Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete. *Cem. Concr. Res.* **29**, 297–302 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00207-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00207-5)
30. A. Różycka, Ł. Kotwica, Waste originating from the cleaning of flue gases from the combustion of industrial wastes as a lime partial replacement in autoclaved aerated concrete. *Materials* **15**, 2576 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15072576>
31. [www.eaaca.org](http://www.eaaca.org)
32. F.H. Fouad, T. Schoch, AAC in USA – a second look. *Ce/Papers - Special Issue: ICAAC - 6th Int. Conf. Autoclaved Aerated Concrete.* **2**(4) E1-E6 (2018).
33. X. He, Z. Zheng, J. Yang, Y. Su, T. Wang, B. Strnadell, Feasibility of incorporating autoclaved aerated concrete waste for cement replacement in sustainable building materials. *J. Clean. Prod.* **250**, 119455 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119455>
34. J. Yang, L. Zheng, Z. Su, X. He, Y. Su, R. Zhao, X. Gan, Wet-milling disposal of autoclaved aerated concrete demolition waste – A comparison study with classical supplementary cementitious. *Adv. Powder Technol.* **31**, 3736-3746 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.07.016>
35. L. Qin, X. Gao, Recycling of waste autoclaved aerated concrete powder in Portland cement by accelerated carbonation. *Waste Manag.* **89**, 254-264 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.018>
36. T. Wang, H. Wuang, X. Hu, M. Fang, Z. Luo, R. Guo, Accelerated mineral carbonation curing of cement paste for CO<sub>2</sub> sequestration and enhanced properties of blended calcium silicate. *Chem. Eng. J.* **323**, 320–329 (2017) <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.03.157>
37. D. Zhang, Z. Ghoulleh, Y. Shao, Review on carbonation curing of cement-based materials. *J. CO<sub>2</sub> Util.* **21**, 119–131 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.003>
38. J. Yang, F. Wang, X. He, Y. Su, T. Wang, M. Ma, Potential usage of porous autoclaved aerated concrete waste as eco-friendly internal curing agent for shrinkage compensation. *J. Clean. Prod.* **320**, 128894 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128894>