

Autoklawizowany beton komórkowy – dzisiaj i jutro

The today and tomorrow of autoclaved aerated concrete

1. Wprowadzenie

Autoklawizowany beton komórkowy (ABK) zyskał uznanie nie tylko w Europie, ale i na świecie, jako bardzo dobrej jakości materiał budowlany, znajdujący zastosowanie w budownictwie mieszkaniowym, użyteczności publicznej i przemysłowym (1).

Ten materiał budowlany jest już wytwarzany od ponad 80 lat. Jego produkcja została rozpoczęta w Szwecji w 1929 roku przez firmę Ytong, a w 1934 roku przez firmę Siporex, z kolei Hebel rozpoczął produkcję w 1943 r. (1). Po drugiej wojnie światowej produkcję ABK podjęły również firmy, z których, z uwagi na poziom i nowoczesność wymienić należy Hendriksen i Hendriksen (H+H) w Danii oraz Durox (Calsilox) w Holandii (1-3).

Europejscy producenci ABK wykazują dużą aktywność w rozwijaniu i doskonaleniu technologii produkcji i stosowania tego materiału w budownictwie. W roku 1988 utworzone zostało Europejskie Stowarzyszenie Producentów Autoklawizowanego Betonu Komórkowego (ESPABK), aby promować dalszy rozwój tego materiału budowlanego (2-4). Jest to uzasadnione ze względu na bardzo małe negatywne oddziaływanie na środowisko procesu wytwarzania betonu komórkowego oraz właściwości techniczne i zdrowotne obiektów wykonanych z zastosowaniem tego materiału. ABK jest materiałem przyjaznym dla środowiska naturalnego, który w szerokim zakresie spełnia wymagania dotyczące efektywności energetycznej, spośród wszystkich materiałów budowlanych (2-4).

Do Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Autoklawizowanego Betonu Komórkowego, zrzeszającego Stowarzyszenia i Przedsiębiorstwa z różnych krajów, od 1996 roku należy również Polskie Stowarzyszenie Producentów Betonów (4). Obecnie w ESPABK jest zgrupowanych 100 zakładów produkcyjnych, znajdujących się w 17 krajach, o łącznej produkcji około 16 milionów metrów sześciennych ABK rocznie (4).

Autoklawizowany beton komórkowy został wprowadzony na rynek budowlany w Polsce ponad 60 lat temu (2, 3). O jego rozwoju zdecydował brak materiałów budowlanych niezbędnych do odbudowy kraju po zniszczeniach wojennych, ale również wyjątkowo korzyst-

1. Introduction

Autoclaved aerated (or cellular) concrete (AAC) is now a universally accepted and widely used high-grade construction material, applied in the construction of residential, public, and industrial buildings across Europe and worldwide (1).

It has been around for over 80 years. The first aerated concrete was produced by Ytong in Sweden in 1929. The companies Siporex and Hebel soon followed suit, and launched new AAC production lines in 1934 and 1943, respectively. (1) Following World War II, the production AAC was taken up by other companies, most notably Hendriksen og Hendriksen (H+H) in Denmark, and Durox (Calsilox), a company based in the Netherlands, both excelling in terms of production volumes and technological advancement. (1-3)

In general, AAC producers based in Europe have actively contributed to the development and improvement of the production formula, and have expanded to use of AAC in the construction industry. In 1988, the European Autoclaved Aerated Concrete Association (EAACA) was established to further advance the development of autoclaved aerated concrete. (2-4) Promoting AAC is specifically justified by the negligible negative environmental impact of AAC production, as well as the technical and health-related properties of buildings built with this particular construction material. AAC is considered environmentally friendly as it meets the latest energy efficiency requirements to an extent much greater than any other construction materials. (2-4)

The European Autoclaved Aerated Concrete Association brings together local businesses and associations from across different countries. The Polish Concrete Producers Association joined EAACA in 1996. (4) Today, EAACA members operate more than 100 production sites in 17 countries, producing around 16 million cubic meters of autoclaved aerated concrete annually. (4)

AAC was introduced to Poland and has been used in the Polish construction sector for around 60 years. (2, 3) It quickly gained ground largely due to the huge deficit in and demand for construction materials in the post-war era, when the entire country was

ne właściwości ABK, jako materiału izolacyjno-konstrukcyjnego. Na jego rozwój złożył się ogromny wysiłek tysięcy pracowników tej branży – od zaplecza naukowo-badawczego, projektantów urządzeń i wytwórni, producentów maszyn i urządzeń, inżynierów oraz techników, aż do stanowisk robotniczych włącznie (2, 3).

Dalszy jego rozwój znajduje przede wszystkim uzasadnienie w bardzo dobrych właściwościach wyrobów, zapewnionych przez współczesne technologie wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego, przy równoczesnym spełnianiu uwarunkowań zrównoważonego rozwoju (3, 4).

2. Technologie ABK w Polsce

Rozwój przemysłu betonów komórkowych w Polsce zapoczątkowała współpraca polsko-szwedzka. Zakupiono szwedzką licencję i częściowe wyposażenie dwóch zakładów doświadczalnych. W latach 1951-1952 uruchomiono wytwórnię w Redzie (Ytong) oraz w Aleksandrowie Kujawskim (Siporex). Jednocześnie, w Centralnym Laboratorium Lekkich Tworzyw, przekształconym w 1971 r. w COBRPB CEBET, podjęto prace badawcze nad dostosowaniem technologii produkcji ABK do warunków krajowych (1, 5). W wyniku przeprowadzonych badań i doświadczeń opracowano technologie wytwarzania betonu komórkowego, dostosowane do różnych wariantów surowcowych, dostępnych w naszym kraju [tablica 1].

Podkreślić należy, że polska technologia Unipol opatentowana w 1961 roku, dzięki zastosowaniu spoiwa mieszanego (wapna i cementu) oraz różnych kruszyw, przede wszystkim piasku kwarcowego i popiołów lotnych, zapewnia korzystne warunki technologiczne prowadzenia procesu produkcyjnego. Prace technologiczne prowadzono w Centralnym Laboratorium Lekkich Tworzyw (CLLT) w Warszawie (5 – 7).

Po rozwiązaniu umów licencyjnych produkcja betonu komórkowego rozwijana jest według polskich technologii i rodzajów maszyn, stosowanych w powstających sukcesywnie wytwórniach. Było to

rebuilding itself from ruins. In addition, AAC proved to be a highly advantageous insulation and construction material. Obviously, the advancements in AAC technology were due to an immense effort by thousands of people working in this market sector – including scientific and research background, designers of production lines and sites, producers of machinery and technical equipment, engineers and technicians, as well as blue-collar workers (2, 3).

Further development of autoclaved aerated concrete is justified on grounds of the favorable properties of AAC produced according to state-of-the-art production technologies, and its widely-acknowledged status as a sustainable construction material (3, 4).

2. AAC technologies in Poland

The history of autoclaved aerated concrete in Poland takes roots from a Polish-Swedish cooperation. Two experimental production sites were established and operated on a Swedish license, and were partly fitted with Swedish production equipment. Over the period 1951-1952, two more production sites were started in Reda (Ytong) and Aleksandrów Kujawski (Siporex). Also, the establishment of the Central Lightweight Materials Laboratory, later renamed into Research and Development Centre of Ceramics and Building Materials CEBET in 1971, marked the beginning of extensive research, mainly focused on incorporating and adapting foreign AAC production technologies to the local conditions (1, 5). As a result of successful research and experimental work, new aerated concrete production technologies have been developed, based on various formulas utilizing the raw materials available locally [Table 1].

It should be underlined that the Polish Unipol technology, patented since 1961, provides beneficial technological conditions for the production process of AAC as it is based on a mixture of lime and cement used as binders, and a selection of aggregates, most notably quartz sand and fly ash. In parallel, technological research was carried out at the Central Lightweight Materials Laboratory (CLLT) based in Warsaw (5-7).

Tablica 1 / Table 1

POLSKIE TECHNOLOGIE WYTWARZANIA ABK (1)

AAC PRODUCTION TECHNOLOGIES DEVELOPED IN POLAND (1)

Rodzaj technologii Production technology	Podstawowe surowce/Basic raw materials	
	Spoiwo / Binder	Kruszywo / Aggregate
UNIPOL (uniwersalna polska technologia) UNIPOL (universal Polish technology)	wapno palone + cement + część kruszywa wspólnie mielone quicklime + cement + a portion of aggregate milled together	piasek kwarcowy mielony na mokro lub popioły lotne lub mieszanina piasku i popiołów wet-milled quartz sand or fly ash or a mixture of sand and ash
PGS (pianogazosilikat) FGS (foam-gas-silicate)	wapno palone + gips wspólnie mielone z częścią popiołów lotnych quicklime + gypsum milled together with a portion of fly ash	popioły lotne fly ash
SW (silikat wolnotęzący) SSS (slowly-solidifying silicate)	wapno palone + cement quicklime + cement	piasek kwarcowy mielony na mokro lub popioły lotne lub mieszanina piasku i popiołów wet-milled quartz sand or fly ash or a mixture of sand and ash

możliwe dzięki prowadzonym pracom w krajowych ośrodkach badawczych, głównie w Centralnym Ośrodku Przemysłu Betonów CEBET. Budowane wytwórnie były coraz nowocześniejsze, a ich poziom techniczny był zbliżony lub odpowiadający poziomowi światowemu, właściwemu dla okresów ich budowania. Rozpoczęła się polska szkoła betonu komórkowego, według której rozwijana była produkcja ABK w Polsce, ale również w Europie i innych krajach świata. Ogółem Polska wyeksportowała 26 wytwórni betonu komórkowego o łącznej zdolności produkcyjnej ponad 4 mln m³ – pilotowanych przez POLIMEX CEKOP i FABEX ZREMB. Dla eksportowanych wytwórni prowadzono badanie surowców (CEBET), opracowywano technologię, szkolono obsługę (CEBET, wytwórnie betonów komórkowych) (5 – 7) [rysunek 1].



Rys. 1. Eksport wytwórni betonu komórkowego: Rosja [10], Czechy i Słowacja [7], Węgry [1], Rumunia [3], Niemcy [1], Jugosławia [1], Egipt [2], Chiny [3], Indie [1], Irak [4], Iran [1], Mongolia [1], Korea [1], (7)

Fig. 1. Export volumes of AAC production sites: Russia [10], Czech Rep. and Slovakia [7], Hungary [1], Romania [3], Germany [1], Yugoslavia [1], Egypt [2], China [3], India [1], Iraq [4], Iran [1], Mongolia [1], Korea [1], (7)

3. Właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK)

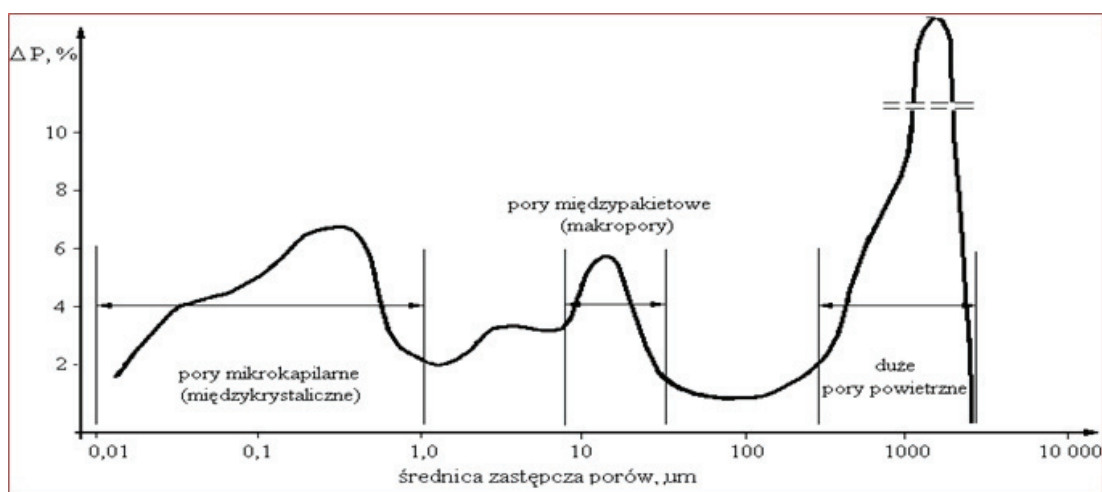
Beton komórkowy, który dzięki walorom eksploatacyjnym ma ponad 80 letnią, ugruntowaną pozycję na rynku, ma wszelkie dane aby tę pozycję utrzymać, osiągając coraz lepsze właściwości techniczne. Duży wpływ na to mają m.in. nowe normy europejskie (7). Wyroby o małej gęstości objętościowej mają coraz mniejszą przewodność cieplną, co pozwala na budowanie domów o małych stratach ciepłych (8, 9). Dobre właściwości techniczne autoklawizowanego betonu komórkowego wpłynąć mogą na zwiększenie stosowania betonu komórkowego w budownictwie (7, 8, 10). Wytrzymałość, obok izolacyjności cieplnej i ceny, stanie się jednym z kryteriów wyboru materiału na ściany budynków (8, 12, 13). W tych kierunkach powinny być także podejmowane prace badawcze, które powinny wyprzedzać potrzeby rynku (7, 11).

W Polsce autoklawizowany beton komórkowy produkowany jest głównie w klasach o gęstości 600, 500 i 400 kg/m³. Nieliczni producenci wytwarzają ABK o najniższych klasach gęstości 300 i 350 kg/m³, których współczynnik przewodzenia ciepła jest <0,01 W/m·K. Beton komórkowy o gęstości 300 – 500 kg/m³ ma współczynnik przewodzenia ciepła w przedziale 0,090-0,135W/m·K (9). W materiałach porowatych w przewodzeniu ciepła główną rolę odgrywa powietrze zawarte w porach tworzywa. Zatem można przyjąć, że współczynnik przewodzenia ciepła betonu komórkowego wzrasta proporcjonalnie do gęstości objętościowej materiału. Ze względu na dużą zawartość porów, która wynosi w ABK około 80% objętości, ważne znaczenie ma ich rozkład i wielkość w mikrostrukturze materiału; korzystne jest, aby kształtował się on tak jak to przed-

After the license agreements have expired, the production of aerated concrete has been extended according to Polish technologies, based on the assortment of machines and production lines built over the years at new production sites. This process was inspired and fueled by research and development continuing at Polish research centers, most notably the Concrete Industry Center CEBET. Production sites became increasingly modern and high-tech, while their technical level was equivalent or not inferior to global standards of the day. The 'Polish school' of aerated concrete soon emerged, setting the tone for the production of AAC in Poland, across Europe, and in other parts of the world. Overall, Poland exported 26 AAC production sites, offering an impressive production capacity of over 4 million cubic meters of concrete, led by POLIMEX CEKOP and FABEX ZREMB. Raw materials were tested (by CEBET), technology was developed, and new staff was trained (CEBET, aerated concrete production sites) for the exported production sites [Fig 1] (5-7).

3. The properties of autoclaved aerated concrete (AAC)

Aerated concrete has over 80 years of market presence and enjoys the status of a well-performing construction material. Moreover, it is likely to maintain its high-profile status due to continuously improved technical characteristics. This is also largely due to the new EU standards (7). Low bulk density construction components are characterized by increasingly lower thermal conductivity, which makes it possible to minimize heat loss from residential buildings (8, 9). The favorable technical properties of autoclaved aerated concrete may and should translate into increased use of AAC in



Rys. 2. Porowatość autoklawizowanego betonu komórkowego (14)

Fig. 2. Porosity of Autoclaved Aerated Concrete (14)

stawiono na rysunku 2. Wnikanie wilgoci w głąb ściany, pogarsza jej izolacyjność, konieczne jest zatem tynkowanie zewnętrzne elementów ściennych, które powinny być „suche”, o wilgotności około 5-8%.

Zwiększenie wytrzymałości ABK umożliwia stosowanie „ciepłych” ścian zewnętrznych jednowarstwowych, o współczynniku przenikania ciepła mniejszego od $0,30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, w zakresie $0,19 - 0,29 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Zaletą tych ścian jest ich wystarczająca izolacyjność cieplna bez potrzeby dodatkowego ocieplania (7). Równocześnie spełniają one warunki bezpieczeństwa konstrukcji, bezpieczeństwa pożarowego i ochrony przed hałasem (15).

W maju 2010 roku Parlament i Rada Unii Europejskiej przyjęły znowelizowaną Dyrektywę „Charakterystyka energetyczna budynków” (16). Główne zmiany w Dyrektywie EPBD z 2010 roku w stosunku do pierwotnej wersji z 2002 r. dotyczą przede wszystkim wprowadzenia pojęcia budynku o niemal zerowym zużyciu energii oraz określenia wspólnych dla krajów członkowskich metod obliczania charakterystyki energetycznej budynków. Natomiast projekt krajowego planu mającego na celu zwiększenie liczby budynków o małym zużyciu energii podany jest w dokumencie *Prawo budowlane* [Dz. U. 2013 r., poz. 1409, z późniejszymi zmianami].

Wyroby z ABK mogą być z powodzeniem stosowane zarówno do budowy domów energooszczędnych, w których EA^1 nie przekracza $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$, o małym zużyciu energii - $EA < 45 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$, jak i pasywnych - $EA < 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$.

W grudniu 2016 roku do zbioru Polskich Norm, wprowadzona została norma PN-EN 771-4+A1: 2015-10 Wymagania dla elementów murowych część 4. Elementy murowe z autoklawizowanego betonu komórkowego. Wprowadza one szereg zmian w stosunku do poprzedniej normy EN 771-4: 2011.

Badania wymywalności podane w tablicy 2 potwierdziły bardzo duży stopień immobilizacji metali ciężkich w betonie komórkowym,

¹EA wskaźniki sezonowego zapotrzebowania ciepła w odniesieniu do powierzchni

the construction industry (7,8,10). Apart from the good thermal insulation properties and a competitive price, the strength characteristics is another important advantage of AAC as a material used in wall construction (8,12,13). This should also be the focus of research, which should not only respond to, but preferably stay ahead of the market needs (7, 11).

The major part of the autoclaved aerated concrete produced in Poland belongs to 600, 500, or 400 kg/m^3 bulk density class. Only few producers offer AAC of the lowest bulk density classes of 300 and 350 kg/m^3 , with the thermal conductivity coefficient of $< 0.01 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. The thermal conductivity coefficient of aerated concrete with the bulk density of 300-500 kg/m^3 ranges from 0.090 to 0.135 $\text{W/m} \cdot \text{K}$. The thermal conductivity characteristics of porous construction materials is mainly attributed to air bubbles trapped in the pores of the material. Therefore, it can be reasonably concluded that the thermal conductivity coefficient of aerated concrete increases proportionally with its bulk density. With AAC being highly porous (pores account for around 80% of its overall volume), it is important to consider the distribution and size of pores in the microstructure of AAC; the preferable porosity parameters are listed in Fig. 2. Moisture ingress into a wall affects its thermal insulation characteristics; therefore, it is necessary to apply plaster onto outside walls to keep them “dry”, i.e. to reduce wall humidity to the level of 5-8 percent.

With its improved strength characteristics, AAC can be used to build “warm” single-leaf external walls, offering heat transfer coefficient of less than $0.30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ within the range of $0.19 - 0.29 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Walls of this type provide sufficient thermal insulation without any additional insulation layers (7). They also meet the safe construction criteria, as well as fire safety and noise protection requirements (15).

In May 2010, the new Energy Performance of Buildings Directive was adopted by the European Parliament and the European Commission (16). The current EPBD of 2010 (versus the former one of 2002) introduces the definition of a nearly zero-energy building,

Tablica 2 / Table 2

WYMYWALNOŚĆ METALI CIĘŻKICH Z PRÓBEK ABK¹

LEACHING BEHAVIOR OF HEAVY METALS IN AAC SPECIMENS¹

Pierwiastek Element	Oznaczenie próbki ABK (odmiana w kg/m ³) AAC specimen code (bulk density classes in kg/m ³)						Dopuszczalne graniczne wartości wymiwywania (16) Leachability limit values (16)		
	300	350	400	500	600	700	X	Y	Z
	Zawartość pierwiastka, mg/kg suchej masy/Content, mg/kg								
As	0,0061	0,0079	0,0170	0,0063	0,0138	0,0150	0,5	2	25
Cr	0,2870	0,1080	0,0903	0,0961	0,0745	0,0973	0,5	10	70
Zn	<0,0005	<0,0005	0,2450	<0,0005	<0,0005	0,0707	4	50	200
Cd	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,04	1	5
Pb	<0,0005	<0,0005	0,0010	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,5	10	50
Ni	<0,0005	<0,0005	0,1060	<0,0005	<0,0005	0,0005	0,4	10	40
Cu	0,0130	0,0122	0,1200	0,0211	0,0114	0,0355	2	50	100
Sr	5,78	5,55	3,75	2,10	2,55	2,60	-	-	-
Ba	0,0772	0,1200	0,0776	0,0788	0,0712	0,0771	20	100	300
Hg ²	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,01	0,2	2
SO ₄ ²⁻³	13701,9	8390,0	11679,0	7158,8	7332,9	7691,4	1000	20000	50000

¹badania niepublikowane ICI MB ZTB CEBET/unpublished research by ICI MB ZTB CEBET

²Oznaczono spektrometrem ICP-MS/Measured with ICP-MS spectrometer

³Oznaczono gravimetrycznie. Dopuszczalne graniczne wartości wymywywania dla odpadów do deponowania na składowisku odpadów: X – obojętnych; Y – innych niż niebezpieczne i obojętne; Z – niebezpiecznych/Determined gravimetrically. Acceptable leaching values for waste deposited at landfills: X – inert waste; Y – other than hazardous and inert; Z – hazardous

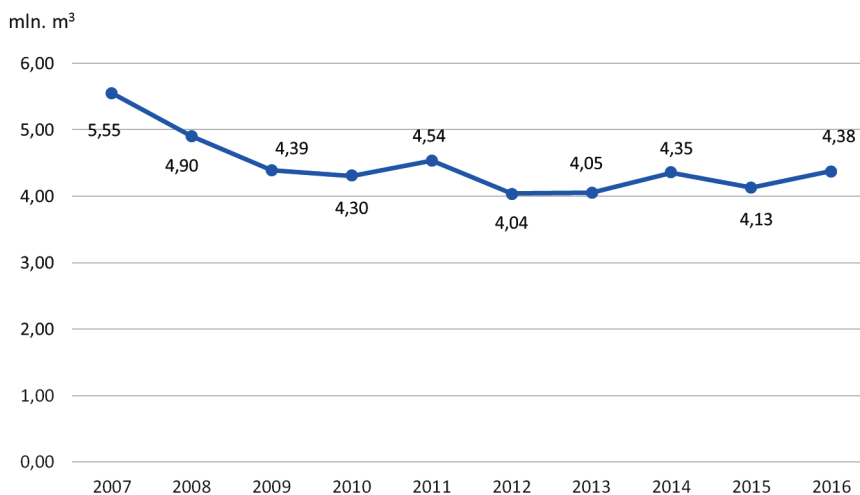
przede wszystkim dzięki zawartości amorficznej fazy C-S-H (19). Dla odpadów – „gruzu” z betonu komórkowego spełnione są wymagania dopuszczania do ich składowania na hałdach odpadów innych niż niebezpieczne (20). W niektórych eluatach z ABK przekroczone zostały wprawdzie stężenia jonów SO₄²⁻, pomimo że pewna ich część ulega absorpcji w fazie C-S-H. Wskazuje na to wiele wyników badań (20,21).

4. Produkcja i rodzaje wyrobów z autoklawizowanego betonu komórkowego

Rozwój produkcji i asortymentu wyrobów z betonu komórkowego oraz wkład Polski w rozwój ABK w Europie i świecie, przedstawiano między innymi na poprzednich konferencjach (7).

Produkcja betonu komórkowego w Polsce obejmująca lata 2009-2016 wahała się średnio na poziomie 4-4,5 mln m³ rocznie [rysunek 3].

Polski rynek betonu komórkowego jest od wielu lat największym w Europie [rysunek 4]. W roku 2015 produkcja ABK wyniosła ponad 4,13 mln m³, a w 2016 przekroczyła 4,38 mln m³.



Rys. 3. Produkcja ABK w Polsce w latach 2007-2016 (4)

Fig. 3. AAC production volumes in Poland between 2007 and 2016 (4)

and determines a uniform methodology for the calculation of the energy performance of buildings. The Polish draft plan to promote and increase the number of very low energy buildings was incorporated to the Construction Law Act (Polish Journal of Laws Dz. U. 2013 item 1409, as amended).

Construction components made of AAC can be successfully used both in the construction of energy-saving houses with maximum EA¹ 100 kWh/(sqm · year), low-energy houses of EA < 45KWh/(sqm · year), and passive houses of EA < 15kWh/(sqm · year).

¹ EA seasonal heat demand rates per surface area

Podkreślić należy, że autoklawizowany beton komórkowy w Polsce jest nadal liderem wśród wyrobów ściennych, z niezmiennym udziałem w rynku od kilku lat na poziomie około 40% [rysunek 5]. Drugą pozycję utrzymuje ceramika z udziałem 35% (4).

W Polsce produkowany jest głównie bogaty asortyment elementów drobnowymiarowych [rysunek 6].

Dzięki modernizacji wytwórni ABK i budowie nowych, produkuje się obecnie nowe rodzaje wyrobów o dużej dokładności wymiarów, które w gotowych elementach nie przekraczają $\pm 1,5$ mm, a nawet $\pm 1,0$ mm, co pozwala na ich łączenie zaprawami „klejowymi”. Następuje równocześnie powrót do produkcji prefabrykatów zbrojonych z ABK. Są to głównie nadproża oraz elementy stropowe i ścienne.

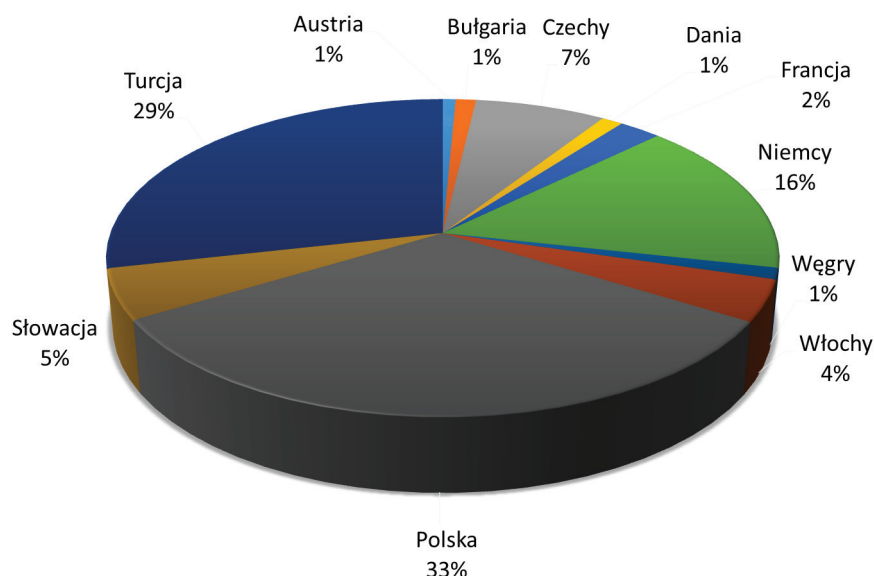
Pewnym udogodnieniem w projektowaniu i produkcji elementów zbrojonych powinna być norma europejska PN-EN 12602:2016-11 Prefabrykowane elementy zbrojone z autoklawizowanego betonu komórkowego. Dodać należy, że ABK jest stosowany również w budownictwie wielorodzinnym, przemysłowym i użyteczności publicznej [rysunek 7].

5. Beton komórkowy, a środowisko naturalne

Analiza współczesnych technologii wytwarzania ABK wykazuje, iż proces ten spełnia bardzo dobrze uwarunkowania zrównoważonego rozwoju (3, 22-25). Technologie te wyróżniają się małym zużyciem surowców oraz energii [tablica 3] w stosunku do technologii wytwarzania innych materiałów budowlanych. W produkcji ABK nie powstają odpady, gdyż zarówno pozostałości świeżej masy betonu jak i woda odpadowa kierowane są z powrotem do procesu technologicznego. Powstające odpady, po procesie autoklawizacji, wykorzystywane są również w produkcji (3).

W procesie wytwarzania ABK nie powstają żadne materiały i substancje, które mogłyby być szkodliwe dla organizmów żywych lub środowiska. Ponadto w przypadku rozbiórki obiektów beton komórkowy może być użyty ponownie do produkcji betonu komórkowego, ewentualnie do innego obiektu budowlanego, jak i do budowy dróg. Można go łatwo przenosić w inne miejsca (jest lekki) i użyć, jako materiał wypełniający wyrobiska, na przykład po eksploatacji kruszyw.

Do produkcji ABK mogą być stosowane popioły lotne oraz inne surowce odpadowe, na przykład piaski odpadowe, wapno z produkcji karbidu, gips z odsiarczania spalin, łupki, żużle.

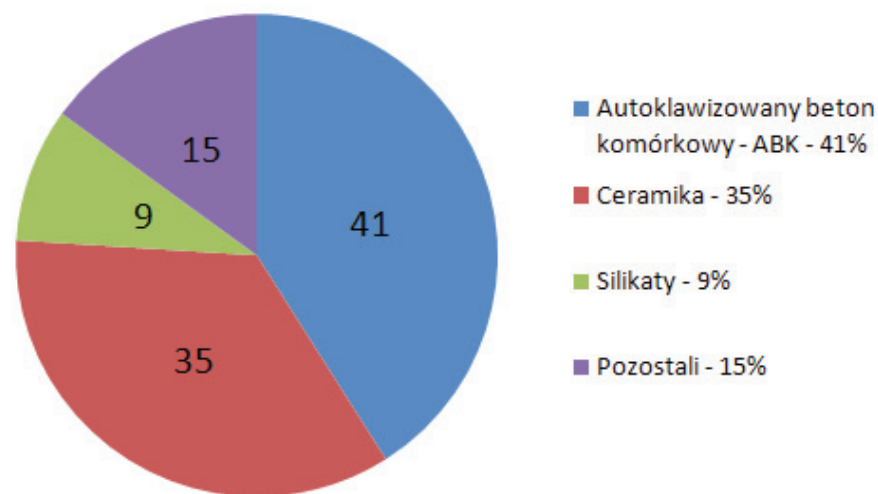


Rys. 4. Udział krajów europejskich oraz Turcji w produkcji ABK w % w 2015 roku (4)

Fig. 4. Percentage share in AAC production across Europe and in Turkey in 2015 (4)

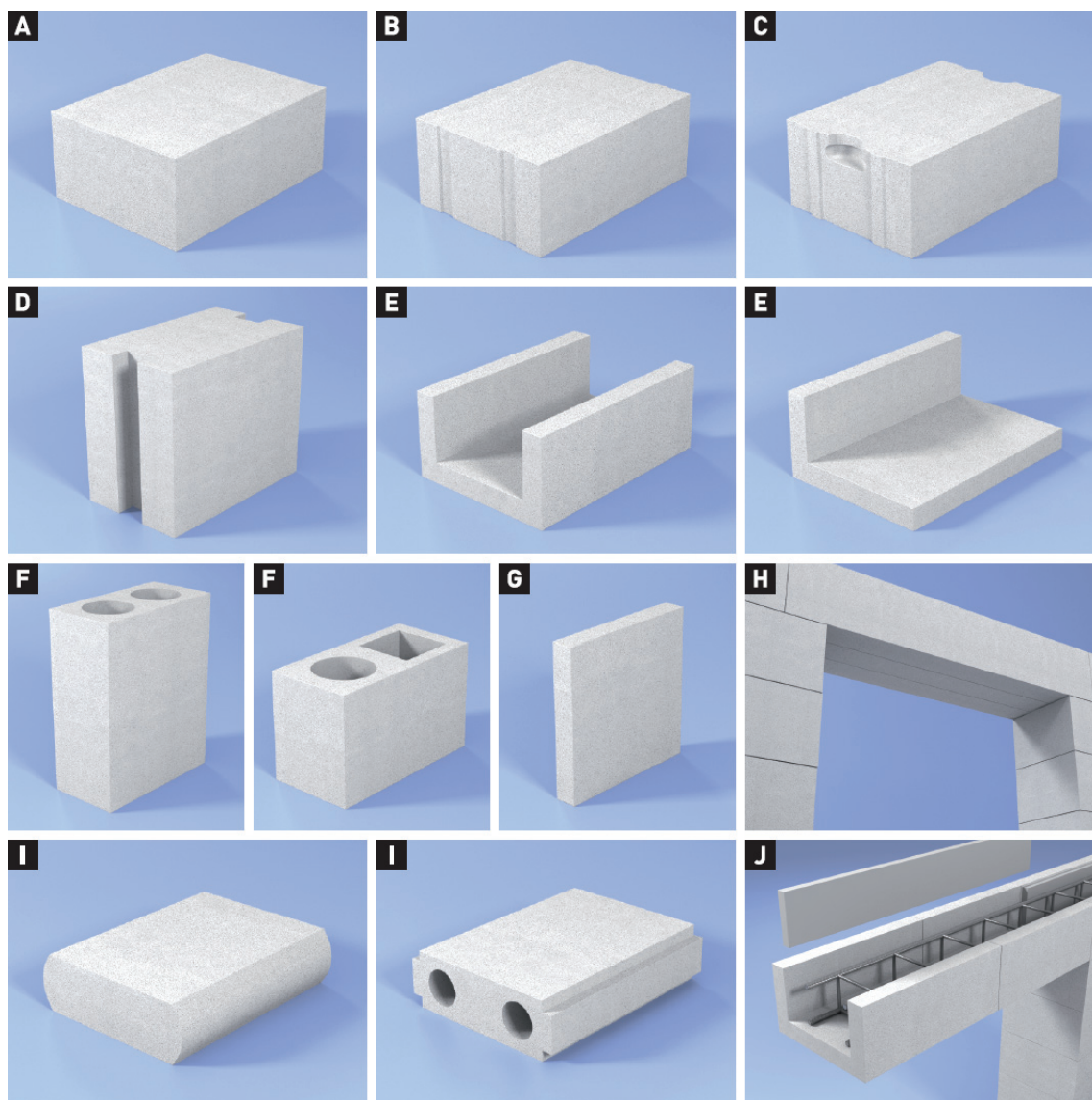
In December 2016, the standard PN-EN 771-4+A1: 2015-10 Specification for masonry units – Part 4. Autoclaved aerated concrete masonry units was introduced to the Polish Standards. It provides for a number of amendments against the previous standard EN 771-4: 2011.

Leaching tests in Table 2 demonstrated very high immobilization levels of heavy metals in aerated concrete, which is mainly attributed to the content of the amorphous C-S-H phase (19). Moreover, waste aerated concrete meets the criteria established for waste acceptable at landfill sites for non-hazardous waste other than inert waste (20). In some AAC eluates, the SO_4^{2-} ion levels were found to be elevated, although they are partly absorbed in the C-S-H phase. This was confirmed in a number of studies (20, 21).



Rys. 5. Udział w rynku poszczególnych materiałów ściennych w Polsce (4, 11)

Fig. 5. Market share of wall construction materials in Poland (4, 11)



Rys. 6. Przykładowy asortyment wyrobów z ABK produkowany w Polsce

Fig. 6. Assortment of Autoclaved Aerated Concrete (produced in Poland)

- a) element o gładkich powierzchniach/blocks,
- b) element z wyprofilowanymi powierzchniami czołowymi do łączenia na pióro i wpust/profiled brickwork elements,
- c) element z wyprofilowanymi powierzchniami czołowymi dodatkowo z uchwytem montażowym/profiled brickwork elements,
- d) blok modułowy/modular blocks,
- e) elementy uzupełniające z betonu komórkowego - kształtki „U” oraz „L”/„U” and „L” blocks,
- f) elementy uzupełniające z betonu komórkowego - kształtki osłonowe instalacji wentylacyjnych lub spalinowych/protection blocks for ventilation and exhaust,
- g) elementy z wkładką termoizolacyjną/thermal insulation blocks,
- h) nadproża prefabrykowane/lintel,
- i) elementy stropowe (pełne i z otworami do wypełniania stropów gęstożebrowych/ floor hollow blocks,
- j) wykonanie nadproża/lintel support.

W ostatnim okresie w stosunku do autoklawizowanego betonu komórkowego – materiału o korzystnych właściwościach i zaletach, tworzone są opinie, iż może on być materiałem niebezpiecznym dla zdrowia człowieka i naturalnego środowiska, ze względu na wymywanie ciężkich metali oraz jonów siarczanowych. Wskazuje się również na zwiększenie zawartości pierwiastków promieniotwórczych. Badania wykazały, że odpady – „gruz” z betonu ko-

4. Production and types of construction components made of autoclaved aerated concrete

The growing production and assortment of construction components made of aerated concrete, as well as Poland's contribution to the development of AAC in Europe and worldwide have been extensively discussed during the previous conferences (7).

mórkowego spełniają wymagania dopuszczenia do składowania na składowiskach odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne. Wynika to z porównania uzyskanych w badaniach wielkości immobilizacji metali ciężkich i siarki całkowitej z wymaganiami określonymi w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki i Pracy [tablica 2] (18). Autoklawizowany beton komórkowy ma bardzo duży współczynnik immobilizacji metali ciężkich (20, 22). Ma na to przede wszystkim wpływ faza C-S-H i hydrogranaty. W większości analizowanych próbek ponad 90% jonów metali ciężkich ulega immobilizacji w betonie komórkowym (20). Prowadzone systematycznie pomiary promieniotwórczości naturalnej próbek ABK pozwalają na stwierdzenie, że betony komórkowe produkowane w kraju, zarówno według technologii piaskowej jak i popiołowej, spełniają wymagania dotyczące dopuszczalnych wskaźników aktywności naturalnych pierwiastków promieniotwórczych (27, 28). Także stężenie radonu, emitowanego w mieszkaniach o ścianach wykonanych z ABK [tablica 4] wykazują, że betony komórkowe są materiałem bezpiecznym z punktu widzenia ochrony radiologicznej (29, 30).

6. Kierunki dalszego rozwoju ABK

Technologia ABK ulega ciąglemu rozwojowi, jak to podano już w pierwszym punkcie (5-7). Rozwój ten dotychczas polegał głównie na zwiększaniu rodzaju surowców podstawowych, przede wszystkim udziału krzemionkowych popiołów lotnych w mieszance betonowej (31-34). Duże osiągnięcia z tego zakresu miał COBRPB CEBET.

Przełom w technologii betonu komórkowego nastąpił po roku 1990 w wyniku wprowadzenia automatycznego sterowania procesami produkcyjnymi. To przede wszystkim wprowadzenie automatyzacji znacznie ułatwiło utrzymywanie odpowiedniej wilgotności i temperatury gazów w procesie autoklawizacji wyrobów. Ponadto pozwoliło to na regulowanie przyrostu temperatury w początkowej fazie obróbki termicznej. Powstały korzystniejsze warunki do wytwarzania lekkich odmian ABK, przy równoczesnym utrzymaniu odpowiedniej wytrzymałości elementów budowlanych.

Postęp naukowo-badawczy pozwolił na dalsze polepszenie właściwości użytkowych betonu komórkowego, przede wszystkim w wyniku postępu technicznego w procesach produkcyjnych. Dzisiaj podstawowa gęstość betonu komórkowego wynosi 500 lub 600 kg/m³, przewodnictwo cieplne 0,125-0,165 W/m·K. Można zadać sobie pytanie: czy to jest „szczyt” osiągnięć w zakresie technologii i właściwości ABK? (35). Dalszy rozwój może dotyczyć przede wszystkim mikrostruktury betonu komórkowego i będzie polegać na zmianach struktury porów. Ma na to wpływ między innymi skład ziarnowy proszku Al, a także piasku. Zmiany uziarnienia proszku



Rys. 7. Bloki mieszkalne z betonu komórkowego w trakcie budowy (4)

Fig. 7. Construction of apartment buildings made of autoclaved aerated concrete (4)

In the period 2009-2016, the annual production of aerated concrete in Poland amounted to 4-4.5 million cubic meters [Fig. 3].

For many years, Poland has been one of the leading producers of aerated concrete in Europe [Fig. 4]. The domestic production volume amounted to 4.13 and exceeded 4.38 million cubic meters in 2015 and 2016, respectively.

It must in any event be pointed out that autoclaved aerated concrete continues to be the leading material used in wall construction in Poland, with a stable market share of around 40 percent [Fig. 5]. Ceramic building materials is the runner-up, with 35 percent share in the market (4).

In Poland, AAC production is dominated by a rich assortment of small-size construction components [Fig. 6].

Modernized or new AAC production sites produce new types of construction components whose dimensions are precise and reproducible within the range of ± 1.5 mm, or even ± 1.0 mm, and can be later fixed together with adhesive mortars. Also, we witness a renaissance of reinforced precast AAC components, mainly lintels as well as roof and wall precast components.

Furthermore, the design and production of reinforced components became somewhat easier with the introduction of the standard EN 12602:2016-11 *Prefabricated reinforced components of autoclaved aerated concrete*. Moreover, AAC is also used in the construction of in multi-dwelling houses and public buildings, and in industrial construction.

Tablica 3 / Table 3

ZUŻYCIE ENERGII DO PRODUKCJI BETONU KOMÓRKOWEGO I CEGŁY PORYZOWANEJ ORAZ DO OGRZEWANIA BUDYNKÓW MIESZKALNYCH (26)

ENERGY CONSUMPTION IN THE PRODUCTION OF AERATED CONCRETE AND HOLLOW BRICKS, AND IN THE HEATING OF RESIDENTIAL BUILDINGS (26)

Rodzaj materiału Type of material	Zużycie energii do ogrzewania budynków mieszkalnych o grubości ścian 30 cm Energy consumption for the heating of residential buildings, wall thickness of 30 cm	Zużycie energii w produkcji elementów budowlanych Energy consumption for the production of construction units
Autoklawizowany beton komórkowy Autoclaved aerated concrete $\lambda=0,12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	5322 kWh/m ³	279 kWh/m ³
Cegła poryzowana Hollow brick $\lambda=0,21 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	8918 kWh/m ³	604 kWh/m ³

Tablica 4 / Table 4

WSKAŹNIKI AKTYWNOŚCI NATURALNYCH PIERWIASTKÓW PROMIENIOTWÓRCZYCH W WYBRANYCH MATERIAŁACH BUDOWLANYCH (29, 30)

ACTIVITY OF NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE SUBSTANCES IN CONSTRUCTION MATERIALS (29, 30)

Materiał Material	Masa na 1m ² ściany Mass per 1 sqm of wall kg	Wskaźniki aktywności Activity rate		Wymagania Requirements
		f ₁	f ₂ Bq/kg	
Beton komórkowy piaskowy 600 Sand aerated concrete	142,73	0,16	20	f ₁ ≤ 1,2 f ₂ ≤ 240 Bq/kg
Silikaty - Silka E 24 Silicates - Silka E 24	332,64	0,16	20	
Ceramika – pustak UNI-MAX 250/220 Ceramics – hollow brick UNI-MAX 250/220	228,00	0,54	70	
Beton komórkowy popiołowy 600 Fly ash aerated concrete 600	142,73	0,56	80	
Beton zwykły – bloczek fundamentowy Plain concrete – foundation block	399,00	0,22	24	
Keramzytobeton – pustak liapor M Gravelite concrete – Liapor M hollow brick	213,41	0,36	32	
Beton komórkowy 400/Aerated concrete 400	166,52	0,16	20	

Uwaga: Grubość 24 cm, oprócz ostatniego wiersza (42 cm).

Note: Thickness of 24 cm, apart from the last line (42 cm).

Al leżą w zakresie możliwości Zakładu Produkcyjnego w Skawinie, należącego do firmy Benda Lutz (4). Dobór uziarnienia proszku Al będzie w znacznym stopniu zależał od rodzaju cementu stosowanego w mieszance betonowej (40). W przypadku składu ziarnowego piasku duże znaczenie ma frakcja mniejsza od 100 μm (36–38). Należy także w szerszym stopniu wykorzystać domieszki chemiczne (39). W przypadku popiołów fluidalnych celowym wydaje się większą uwagę zwrócić na popioły wapienne (41). Wyniki badań ABK z tymi popiołami wykazały, właściwości wyrobów spełniają wymagania standardów europejskich. Zastosowanie popiołów fluidalnych powoduje równocześnie zmniejszenie wapna do 20% (42). Dotychczasowe wyniki badań wykazują, że popiół fluidalny można zastosować również w technologii piaskowej, co umożliwi zmniejszenie w składzie mieszanki betonowej cementu i wapna.

5. Aerated concrete versus the environment

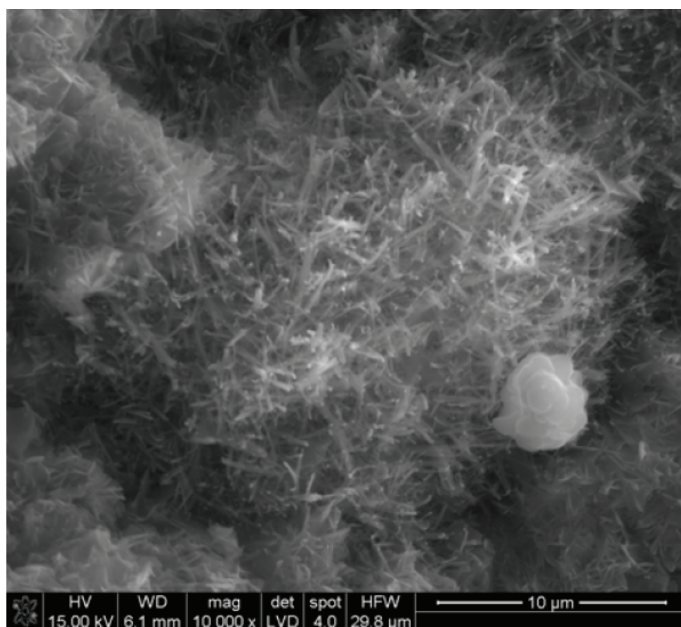
When analyzing the latest AAC technologies, the production of AAC was demonstrated to fulfil the conditions for sustainable development (3, 22–25). AAC production technologies are characterized by low consumption levels of raw materials and energy as compared to the manufacturing formulas of other wall materials [Table 3]. The process is waste-free, while both residues of fresh raw concrete, and waste water are reintroduced to the production process. All waste generated during the autoclaving is utilized in the production (3).

The production of AAC does not generate any materials or substances that might be considered hazardous for living organisms or the environment. Moreover, aerated concrete from demolished

Innym przykładem są mikrosfery, które również są przedmiotem badań wdrożeniowych (43). Mikrosfery glinokrzemianowe są cząstkami o kulistym kształcie i wielkości nieprzekraczającej 0,5 mm, przy czym należą do lekkiej frakcji popiołów lotnych. Badania wykazały, że mikrosfery mogą być stosowane do produkcji lekkich betonów komórkowych. Dodatek mikrosfer zmniejsza nasiąkliwość ABK o około 20% oraz zwiększa jego wytrzymałość na ściskanie o około 10% (43).

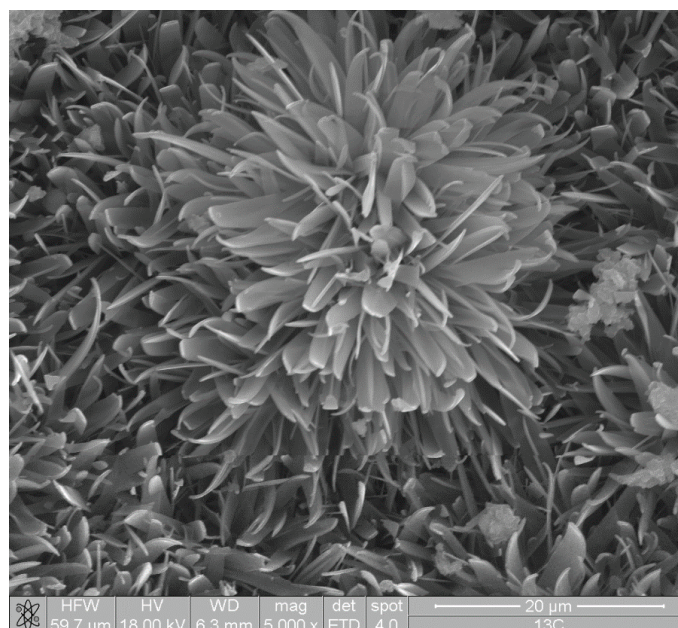
Duże znaczenie dla producentów mają zawsze koszty wytwarzania, na które w przypadku ABK, mają duży wpływ spoiwa: cement i wapno. Z tego powodu są prowadzone doświadczenia częściowego zastępowania tych spoiw dodatkami mineralnymi o właściwościach pucolanowych. Jak wiadomo głównym składnikiem fazowym betonu komórkowego jest faza C-S-H oraz 1,1 tobermoryt (rysunek 8) (35). W trakcie autoklawizacji powstaje zwykle katoit – $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_{3-x}(\text{OH})_{4x}$ ($x=1,5-3$) (rysunek 9). Uważa się, że katoit może stanowić fazę przejściową przechodzącą następnie w 1,1 tobermoryt. Inne fazy nie mają praktycznie znaczenia; między innymi czasem występuje śladowa zawartość ksonolitu ($\text{Ca}_6(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{OH})_2$) (rysunek 10), (14, 42, 44, 45).

Analiza dotychczasowych badań jak i wielkość produkcji ABK w Polsce wykazuje, że podstawową gęstością będzie 400/500 kg/m^3 , o współczynniku przewodności cieplnej 0,09-0,13 $\text{W/m}\cdot\text{K}$. A tylko prawdopodobnie niewielki udział będzie miała produkcja betonu komórkowego o gęstości 300 kg/m^3 , którego przewodność cieplna będzie mniejsza od 0,1 $\text{W/m}\cdot\text{K}$. Te właściwości można uzyskać przede wszystkim przez zmianę mikrostruktury (37, 38). Jak wykazały badania mikrostruktury za pomocą mikroskopu skaningowego, beton komórkowy o gęstości 300 kg/m^3 zawiera więcej regularnych, kulistych porów, o większych średnich wymiarach – około 1,5 mm, w porównaniu z betonem komórkowym o gęstości 600 kg/m^3 , w którym średni wymiar porów wynosi około 0,6 mm (37, 38).



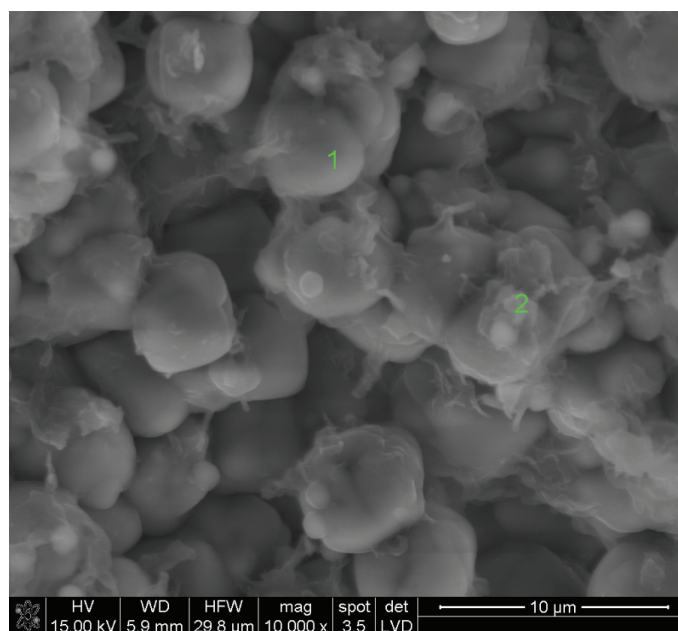
Rys. 10. Widoczne włókna ksonolitu (37)

Fig. 10. Formation of xonotlite fibers (37)



Rys. 8. Mikrostruktura ABK złożona z kryształów 1,1 tobermorytu (31)

Fig. 8. The microstructure of AAC composed with crystalline 1.1 tobermorite (31)



Rys. 9. Skupienie hydrogranatów i amorficzna faza C-S-H (35)

Fig. 9. Agglomeration of hydrated calcium aluminosilicate and amorphous phase C-S-H (35)

building can be reused for the production of new aerated concrete, in the construction of new buildings or roads. It can be easily handled and transported from one place to another (as it is light-weight) and used to backfill excavations, for example to restore former aggregate excavation sites.

The production formulas of AAC may include fly ash and other waste materials, such as waste sand, carbide lime waste, gypsum generated by flue gas desulphurization, slates, or slag.

Biorąc pod uwagę właściwości ABK celowym wydaje się zwiększenie udziału w produkcji technologii popiołowej. Wiadomo, że niektóre właściwości betonu komórkowego wytwarzanego tą technologią są korzystniejsze od ABK uzyskiwanego technologią piaskową. Można podać jako przykłady skurcz i przewodnictwo cieplne.

Literatura / References

1. A. Paprocki, *Betony komórkowe*, Arkady, Warszawa, 1966.
2. H. Jatymowicz, J. Siejko, G. Zapotoczna-Sytek, *Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego*, Arkady, Warszawa 1980.
3. S. Balkovic, G. Zapotoczna-Sytek, *Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia. Właściwości. Zastosowanie*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2013.
4. Materiały informacyjne Europejskiego Stowarzyszenia Producentów Autoklawizowanego Betonu Komórkowego (EAACA), Stowarzyszenie Producentów Betonów w Polsce (SPB), Firm produkcyjnych ABK w Polsce.
5. M. Włodarczyk, G. Zapotoczna-Sytek, *Pół wieku działalności COBRPB CEBET w dziedzinie technologii betonu i prefabrykacji betonowej*. Prace CEBET nr. 32.2004. s.11.
6. G. Zapotoczna-Sytek, *Rozwój Autoklawizowanego betonu komórkowego na tle 20 Konferencji "Jadwisińskich"*, Materiały 20. Konferencji Naukowo-Technicznej Jadwisin 2006. Serock, 2006. s. 389.
7. G. Zapotoczna, M. Soboń, *60 lat betonu komórkowego. Historia i przyszłość.*, 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete „Securing a sustainable future” to be held ...Bydgoszcz, Poland, September 14-17, 2011.
8. M. Haas, *The future of AAC – from a material scientist’s point of view*, Autoclaved Aerated Concrete – Limbachiya and Roberts (eds) Taylor&Francis Group, p. 187, London 2005.
9. K. Łaskawiec, L. Misiewicz, *Właściwości użytkowe elementów murowych z ABK*. Materiały Budowlane, 9, 60 (2014).
10. L. Misiewicz, *Krajowy rynek materiałów budowlanych do wznoszenia ścian w 2016 r.* Materiały Budowlane, 4, 2 (2017).
11. *Materiały Konferencji Bydgoskiej 2011.*
12. C. A. Fudge, J. N. Hacker, *UK housing and climate change: performance evaluation using AAC*, Autoclaved Aerated Concrete – Limbachiya and Roberts (eds) Taylor&Francis Group, p.131, London 2005.
13. K. Łaskawiec, E. Górecka, L. Misiewicz, *Kształotowanie przewodności cieplnej betonu komórkowego w zależności od stopnia zawilgocenia*, Materiały Budowlane, 3, 36 (2016).
14. Wittmann (ed), *Advances in Autoclaved Aerated Concrete*, Balkema, Rotterdam, 1992.
15. R. Janiak, *H+H dBlok – element Systemu Budowy H+H przeznaczony do ścian tłumiących hałas*, Materiały Budowlane, 4, 9 (2017).
16. *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków wraz z późniejszymi zmianami.*
17. *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) Nr 305/2011 z dnia 09. 03. 2011r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG, zwane Construction Products Regulation (CPR)*, Dz. U. UE L88 z dnia 04.04.2011r.
18. *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach wraz z późn. zm.*

There have recently been revelations that autoclaved aerated concrete – in itself a very beneficial construction material – is potentially dangerous for human health and the surrounding environment because of the leaching of heavy metals and sulphate ions. It also allegedly contains increased levels of radioactive elements. Studies have demonstrated that waste aerated concrete meets the criteria established for waste acceptable at landfill sites for non-hazardous waste other than inert waste. This waste classification is based on a comparison between the heavy metal and total sulfur immobilization characteristics of AAC, and the statutory requirements specified in the Regulation of the Ministry of Economy and Labor [Table 2] (18). Autoclaved aerated concrete was demonstrated to have a very high immobilization share of heavy metals (20,22). This is mainly attributed to the C-S-H phase and hydrogarnets. In the vast majority of tested AAC specimens, over 90 percent of heavy metal ions were shown to be immobilized (20). Regular measurements of the natural radioactivity of AAC specimens make it possible to conclude that aerated concrete produced in Poland, according to both sand- and ash-based formulas, meet the requirements for acceptable activity levels of naturally occurring radioactive substances (27, 18). Also, the levels of radon emitted inside residential buildings made of AAC (Table 4) clearly indicate that aerated concrete is safe in terms of radiation protection (29, 30).

6. The future of AAC

As already mentioned, the AAC production technology is evolving and is constantly perfected (5-7). So far, its development was largely focused on increasing the portion of raw materials, mainly siliceous fly ash, added to the concrete mix (31-34). COBRPB CEBET has a strong track record and has delivered some excellent results in this field of research.

The breakthrough came in 1990 with the introduction of automated control of production processes. With the introduction of automation, it became significantly easier to maintain proper humidity and temperature of gases during the autoclaving process of construction components. It also provided better control over the temperature increase in the initial phase of the thermal processing. More favorable conditions were created for the production of light-weight types of AAC, while maintaining the appropriate strength of the produced construction components.

Over time, the scientific progress has improved the performance of aerated concrete, mainly as a result of technological advances. Today, the typical bulk density of AAC is in the range of 500 or 600 kg/m³, with thermal conductivity coefficient of 0.125-0.165 W/m·K. It may well be wondered if this the peak achievement in terms of AAC performance, or is a better AAC technology yet to come? (35). Further research on AAC may focus on its microstructure, and attempts will be made to modify the structure of AAC pores. The microstructure of concrete is influenced by the particle size distribution of Al powder, as well as that of sand. The production site of the company Benda Lutz in Skawina is well prepared to run experiments with Al powder grain size (4). The selection of Al

19. W. Nocuń-Wczelik, Struktura i właściwości uwodnionych krzemianów wapniowych, Prace Komisji Nauk Ceramicznych – Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. Ceramika, s. 59, Kraków 1999.

20. P. Gębarowski, B. Górska, A. Michalik, G. Zapotoczna-Sytek, M. Gawlicki, Autoklawizowany beton komórkowy – materiał przyjazny dla człowieka i środowiska, 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete „Securing a sustainable future” to be held ..., September 14-17, Bydgoszcz, Poland 2011.

21. E. Grabowska, Wpływ zeolitu na hydratację cementu i jego właściwości, AGH Kraków 2016.

22. K. Łaskawiec, P. Gębarowski, G. Zapotoczna-Sytek, J. Małolepszy, Fly ashes of new generation as a raw material to the production of autoclaved aerated concrete (AAC), 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete „Securing a sustainable future” to be held ..., p. 119, September 14-17, Bydgoszcz, Poland 2011.

23. G. Zapotoczna-Sytek, K. Łaskawiec, P. Gębarowski, J. Małolepszy, J. Szymczak, ICiMB, Popioły lotne nowej generacji do produkcji autoklawizowanego betonu komórkowego, Monografia, Wydawnictwo Instytut Śląski 2013.

24. K. Łaskawiec, P. Gębarowski, J. Małolepszy, Influence of Fluidized Ashes on Properties of Autoclaved Aerated Concrete, *ACI Materials Journal*, **113**, 4, 409 (2016).

25. K. Łaskawiec, M. Piotrowicz, P. Zając, Zastosowanie ABK z recyklingu do wytwarzania betonu zwykłego, *Materiały Budowlane*, 12, 49 (2015).

26. G. Zapotoczna-Sytek, J. Małolepszy, Zrównoważony rozwój, a proces wytwarzania i stosowania elementów z betonu komórkowego, s. 867, Dni Betonu – tradycja i nowoczesność, Wisła 13-15 października 2008.

27. Construction Law Act of 7 July 1994 (DzU of 2006 no. 156, item 1118 as amended).

28. Atomic Law Act of 29 November 2000 (DzU of 2007 no. 42, item 276 as amended).

29. L. Brunarski, Budowanie z betonu komórkowego. Poradnik. Wyd. Stowarzyszenie Producentów Betonów, s. 32, Warszawa, 2005.

30. G. Zapotoczna – Sytek, K. Mamont Cieśla, K. Lubińska, T. Rybarczyk, Mił o promieniotwórczości autoklawizowanego betonu komórkowego (ABK) – jak jest naprawdę?, 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete „Securing a sustainable future” to be held ..., September 14-17, Bydgoszcz, Poland 2011.

31. G. Zapotoczna-Sytek, P. Jarszewski, B. Babiński, Wpływ techniki odsiarczania spalin na właściwości odpadów paleniskowych. Wyd. Prace COBRPB Cebet, zeszyt nr 28. Warszawa 1996.

32. Z. Giergiczny, M. Gawlicki, Popiół lotny do betonu - nowelizacja normy EN 450, *Budownictwo Technologiczno-Architektura*, lipiec-wrzesień 2005.

33. E. Tkaczewska E. Wpływ właściwości fizykochemicznych krzemionkowych popiołów lotnych na proces hydratacji cementu, Praca doktorska AGH, 2007.

34. G. Zapotoczna-Sytek, K. Łaskawiec, J. Małolepszy, Fly ashes of new generation for the production of autoclaved aerated concrete, Non-traditional cement & concrete III: proceedings of the international symposium, p. 803, Brno 2008.

35. N. Narayanan, K. Ramamurthy, Structure and properties of autoclaved aerated concrete: a review, *CCR*, 30, 457 (2000).

36. Badania nad uzyskaniem autoklawizowanego betonu komórkowego o gęstości poniżej 300kg/m³ o wysokiej izolacyjności cieplnej Sprawozdanie COBRPB CEBET, Warszawa 2009.

37. J. Małolepszy, W. Pichór, Beton komórkowy XXI wieku. *Materiały Budowlane* 4, 8 (2001).

powder grain size will largely depend on the type of cement used in the concrete mix (40). Fractions smaller than 100 μm play the major role in terms of the particle size distribution of sand. (36–38) Also, greater use would have to be made of chemical admixtures (39). Also, fluidized bed combustion (FBC) fly ash, and specifically calcareous fly ash, should be studied more extensively (41). Studies on AAC based on a calcareous fly ash formula have demonstrated that the finished construction components meet the applicable European standards. Also, FBC fly ash reduces lime content down to 20 percent (42). FBC fly ash has proven useful also in the sand-based AAC formula, as a means of reducing the amount of cement and lime mixture in the concrete formula.

More research should also be dedicated to the addition of microspheres to the concrete formula (43). Aluminosilicate microspheres are spherical 0-0.5 mm large particles belonging to the fraction of light-weight fly ash. Studies support the use of microspheres in the production of lightweight aerated concrete. The addition of microspheres reduces the absorbability of AAC by around 20 percent, and boosts its strength by around 10 percent (43).

Producers also pay attention to production costs, and in the case of AAC, this criterion largely depends on the use of two binders: cement and lime. Hence, experiments are now performed on how to partly replace these compounds with mineral additives with pozzolanic properties. It is well known that the C-S-H phase and 1,1-tobermorite are the main phase components of aerated concrete (Fig. 8). (35) Katoite is typically produced in the process of autoclaving – $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_{3-x}(\text{OH})_{4x}$ ($x=1.5-3$) (Fig. 9), and is believed to be a transitional phase, later transformed into 1.1-tobermorite. Other phases are of no practical relevance; rarely, trace amounts of xenolith ($\text{Ca}_6(\text{Si}_6\text{O}_{17})(\text{OH})_2$) are detected (Fig. 10). (14, 42, 44, 45)

Based on a review of existing body of evidence, and considering the AAC production volume in Poland, it can be assumed that the typical bulk density of AAC is within the range of 400-500 kg/m³, with the thermal conductivity coefficient of 0.09-0.13W/m·K. Aerated concrete of 300 kg/m³ bulk density and 0.1 W/m·K thermal conductivity will most probably account for only a small fraction of the overall AAC production volume in Poland. The AAC of this kind can be produced by modifying the microstructure. (37, 38) Studies of concrete microstructure captured with a scanning microscope have demonstrated that aerated concrete with the bulk density of 300 kg/m³ contains more regular spherical pores whose mean size is larger – around 1.5 mm, as compared to aerated concrete with the bulk density of 600 kg/m³, with a mean pore size of around 0.6 mm. (37, 38)

Considering the properties of AAC, it would be appropriate to promote AAC production formulas based on fly ash. Some of the properties, such as shrinkage and thermal conductivity, of AAC produced with fly ash aggregate are known to be more favorable as compared to those of AAC produced using sand.

38. J. Małolepszy, W. Pichór, Możliwości wytwarzania autoklawizowanego komórkowego odmiany 300, s. 297, Konferencja Naukowo-Techniczna, Olsztyn-Lańsk 2002.
39. M. Skorniewska, M. Abramowicz, G. Zapotoczna, Domieszki chemiczne, a procesy fizykochemiczne zachodzące przy wytwarzaniu autoklawizowanego betonu komórkowego, Prace ICiMB nr 12, s. 88, 2013.
40. prEN 197-1 rev *Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*, June 2014.
41. Patent nr 207649 Mieszanka do wytwarzania betonu komórkowego.
42. K. Łaskawiec, Wpływ fluidalnych popiołów z węgla brunatnego na skład fazowy i właściwości betonu komórkowego, AGH Kraków 2011.
43. W. Pichór, Właściwości autoklawizowanego betonu komórkowego z dodatkiem mikrosfer glinokrzemianowych, *Cement Wapno Beton*, **79**, 1 (2012).
44. Rola xonotlitu i girolitu w kształtowaniu struktury i mikrostruktury betonu komórkowego, Sprawozdanie ICiMB Centrum Badań Betonów CEBET i AGH, Warszawa 2012.
45. A. Różycka, Ł. Kotwica, J. Małolepszy, Synthesis of single phase gyrolite in the CaO-quartz-Na₂O-H₂O system; *Materials Letters*, **120**, 166 (2014).