

Autoklawizowany beton komórkowy (ABK) z popiołów lotnych w strategii zrównoważonego rozwoju

AAC of fly ash in the strategy of sustainable development

1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zagadnień zrównoważonego rozwoju jest ochrona naturalnego środowiska. Zagadnienie to obejmuje zarówno wykorzystanie surowców wtórnych, jak i rozwijanie procesów produkcyjnych przyjaznych dla środowiska. Zagospodarowanie popiołów lotnych stanowi poważny problem we wszystkich krajach, w tym szczególnie w Polsce, która oparła energetykę na paliwach stałych.

W wyniku wieloletnich badań i doświadczeń produkcyjnych zrealizowano w Polsce szereg kierunków utylizacji popiołów lotnych w przemyśle materiałów budowlanych (2).

Nasze doświadczenia wykazują, że najbardziej racjonalnym i efektywnym sposobem zagospodarowania popiołów lotnych jest ich wykorzystanie do produkcji ABK.

Ten kierunek zagospodarowania popiołów jest stosowany w Polsce od przeszło 50 lat. Pierwszy raz zastosowano w Polsce popioły do produkcji betonu komórkowego już w roku 1954, a od początku lat sześćdziesiątych technologia wytwarzania ABK z popiołów lotnych stała się najważniejszym kierunkiem rozwoju produkcji tego materiału konsekwentnie realizowanym w następnych latach w oparciu o polskie technologie i maszyny (6, 11). Wybudowano 10 wytwórni stosujących technologię opartą na popiołach lotnych, zużywających rocznie przeszło 1 mln ton popiołów lotnych*, i wytwarzających około 2 mln m³ betonów komórkowych, co stanowiło około 40% ogólnej ich produkcji.

Bardzo dobre wyniki produkcyjne polskiego przemysłu wzbudziły zainteresowanie w świecie i stworzyły dogodne warunki eksportu

* Obecnie ilość ta zmniejszyła się w wyniku produkcji betonów komórkowych o mniejszej gęstości, a więc o mniejszym zużyciu popiołów oraz zaprzestania produkcji przez dwie najstarsze wytwórnie.

1. Introduction

One of the essential elements of sustainable development is to protect natural environment. In practice it means the utilization of by-products and introduction of technological processes which are friendly for the environment. The utilization of fly ash - by-product from power stations creates a serious problem in all countries, including Poland, where production of energy is based on solid fuels.

As a result of long-term investigations and production practice the fly ash in Poland found its effective utilization in the building materials industry (2).



Rys. 1. Dojrzewające odlewy ABK w hali produkcyjnej

Fig. 1. Production hall of Autoclaved Aerated Concrete

The Polish experience shows that the most effective way of fly ash utilization is constituted by the AAC production.

Such utilization of fly ash has been used in Poland since early fifties. For the first time the production of cellular concrete of fly ash was applied in Poland already in 1954 and as early as from the beginning of sixties fly ash technology of AAC production became

wytwórni ABK. Polska zbudowała dotychczas 36 wytwórni ABK, w tym 12 stosujących technologię opartą na popiołach lotnych (5).

2. Kierunki prac rozwojowych i badawczych

Rozwój produkcji betonu komórkowego z popiołów lotnych opierał się na kompleksowych, prowadzonych głównie przez COBRPB Cebet, pracach badawczych obejmujących szczegółowe rozpoznanie właściwości popiołów, opracowanie wymagań normowych i instrukcji (10). Najważniejsze znaczenie dla praktyki miało ustalenie zasad technologicznych, rozwiązań, które uwzględniały właściwości popiołów.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY (ŚREDNI I ZAKRES WAHAŃ) POPIOŁÓW LOTNYCH Z WĘGLA KAMIENNEGO I BRUNATNEGO

CHEMICAL COMPOSITION (AVERAGE AND LIMITS) OF FLY ASHES FROM HARD COAL AND LIGNITE, %

Składniki Component	Rodzaj popiołu lotnego Characteristic type of fly ash from		
	Z węgla kamiennego krzemionkowy % mas. Hard coal (siliceous) I	Z węgla brunatnego % mas. Lignite	
		glinowy (aluminat) II	wapniowy (calcium) III
		Turów	Konin
SiO ₂	52,0 (43-57)	48,0 (41-50)	45,0 (30-50)
Al ₂ O ₃	20,0 (18-23)	31,0 (30-35)	8,0 (5-9)
Fe ₂ O ₃	13,0 (7-16)	7,0 (14-20)	5,0 (4-6)
CaO	6,0 (4-10)	3,0 (2-4)	32,0 (25-48)
MgO	3,0 (1-5)	1,5 (0,1-1,0)	3,0 (2-4)
SO ₃	1,0 (0,5-3,5)	0,5 (0,5-0,7)	7,1 (5-10)
Na ₂ O+K ₂ O	1,8 (1-3)	1,5 (0,1-0,3)	0,2 (ślady)

Jak można było oczekiwać, skład chemiczny popiołów lotnych z polskich elektrowni różni się znacznie w zależności od rodzaju spalane go węgla. W tablicy 1 przedstawiono charakterystyczne składy chemiczne popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego oraz węgla brunatnego.

Duże różnice w stosunku do pozostałych wykazuje popiół z węgla brunatnego z Zagłębia Konin, który wykazuje dużą zawartość tlenku wapnia i małą (w tym w formie anhydrytu) krzemionki (11).

Wieloletnie doświadczenie badawcze i produkcyjne pozwoliło na opracowanie oryginalnych technologii produkcji betonu komórkowego zarówno z popiołów lotnych z węgla kamiennych z suchego odpopielania, a także z mokrego jak i z węgla brunatnych.

Analizy ekonomiczne różnych technologii produkcji ABK z wapniowych popiołów lotnych ze spalania węgla brunatnego jest mniej efektywna ekonomicznie od technologii opartej na popiołach lotnych z węgla kamiennego. Wynika to z konieczności stosowania szeregu dodatkowych procesów technologicznych, a przede wszystkim wstępne gaszenie wapna oraz wzbogacenie popiołów w krzemionkę, wynikających z własności tych popiołów (5).

W związku z tym nie znalazły dotychczas zastosowania wapniowe

the preferred method in further development of this concrete, consistently based on Polish technologies and equipment (6, 11). Ten new AAC factories using fly ash technology have been built (Fig. 1). They utilized altogether over 1 million tons of fly ash per year, producing about 2 million cubic meters of AAC which was about 40% of total AAC production in Poland at that time.

As a result of this modern technology developed in Poland there was a considerable worldwide interest and profitable conditions for export of AAC factories. So far Poland has exported 36 turnkey AAC factories, 12 of which are based on fly ash technology (5).

2. Reserch and development activities

Together with the development of production of cellular concrete based on fly ash Research Center Cebet carried out scientific work concerning the investigation of fly ashes properties and establishment of technical requirements and standards, instructions (10) as well as the settlement of technological rules to be observed.

Among others, on the basis of this works the limits of chemical compositions of fly ash from the Polish power stations were found depending on burned coal quality. In Table 1 average chemical compositions of fly ashes from hard coal I and from lignite II i III are shown.

The properties of fly ashes from lignite originated from Konin are significantly different from others because they contain a large quantity of calcium and a small quantity of silica (11).

As a result of the long-term research and industrial activities the Polish technology of cellular concrete production has been developed both for use of hard coal and lignite fly ash, taking into account specific properties of these ashes.

The economic analysis of different technologies has shown that AAC production of calcium fly ash from lignite is less effective than that of fly ash from hard coal. It is due to a more complicated technology in which a number of additional processes must be used, for example preliminary slacking, enrichment in silica of this ash, which contain considerable quantity of free lime and sulphur (5). It was the reason why in Poland the utilization of calcium fly ash in AAC production has not been introduced so far in the production practice. In the production of cellular concrete in Poland exclusively siliceous fly ash from hard coal is applied. That is why most research and development work are dedicated to this fly ash.

The analysis of properties of fly ash from hard coal as received by factories of cellular concretes has revealed that its chemical composition from one power station does not show large variations, yet, physical properties such as: fineness, water absorption and coal content change in a considerably wider range. Changeability of these properties has a direct influence on the process of cellular concrete production.

To minimize the lack of homogeneity of fly ash the investigation was undertaken in cooperation with the power industry, concerning

popioły lotne w produkcji ABK. Do produkcji betonu komórkowego stosowane są wyłącznie popioły lotne krzemionkowe z węgla kamiennego, z suchego odpopielania. Tym popiołom poświęcono także najwięcej prac badawczych.

Analiza właściwości popiołów lotnych z węgla kamiennych otrzymywanych przez wytwórnie betonów komórkowych wykazała, że skład chemiczny popiołów z jednej elektrowni nie wykazuje większych wahań, natomiast w dość szerokim zakresie zmieniają się ich własności fizyczne, a przede wszystkim uziarnienie, wodożądność i zawartość węgla. Zmienność tych właściwości fizycznych wpływa na proces wytwarzania betonu komórkowego.

W celu zmniejszenia niejednorodności popiołów przeprowadzono wspólnie z energetyką badania wpływu warunków przygotowania i spalania węgla na jakość popiołów lotnych i otrzymywanego z nich ABK (16).

Badania wykazały, że niejednorodność popiołów lotnych – w zakresie składu chemicznego i fazowego oraz własności fizycznych, a przede wszystkim wodożądności i uziarnienia – można ograniczyć przez odpowiednie przygotowanie paliwa, a głównie przez właściwy proces jego spalania.

W wyniku doświadczeń określono warunki tych procesów zapewniających dobrą jakość popiołów przy jednoczesnej poprawie efektywności pracy kotłów. Badania popiołów lotnych z poszczególnych stref odpopielania wykazały celowość selektywnego przesyłania do wytwórni betonów komórkowych popiołów z wybranych stref odpopielania w celu doboru popiołów o najlepszej jakości. Przeprowadzone prace technologiczne pozwoliły na ustalenie korzystnych warunków wytwarzania z ABK elementów o małych wymiarach (błoczki, płytki) oraz elementów zbrojonych o długości mniejszej od 4,80 m. Po podjęciu produkcji tych ostatnich wyłonił się problem powstawania rys w zbrojonych elementach o dużych wymiarach (15). Z popiołów o zbliżonym składzie chemicznym i o podobnych własnościach fizycznych w niektórych elementach powstały rysy. W elementach o długości większej od 4,80m występowały okresowo rysy i pęknięcia, na całej szerokości elementu. Badania składu chemicznego i własności fizycznych, popiołów nie doprowadziły do wyjaśnienia tego problemu.

Przeprowadzono więc badania składu mineralnego, współczynnika rozszerzalności termicznej α_t , ciepła rozpuszczenia, przewodnictwa elektrycznego zawiesin popiołowych oraz pomiar ich aktywności podczas autoklawizacji. W wyniku tych prac do wymagań dotyczących popiołów stosowanych do produkcji elementów zbrojonych wprowadzono ocenę ich aktywności podczas autoklawizacji (13).

Różnice współczynnika rozszerzalności cieplnej α_t kruszywa piaskowego ($11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), popiołów lotnych ($3,1-4,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) i stali ($12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) wydają się wskazywać, że rysy powstają wówczas gdy duże naprężenia w betonie w okresie wzrostu temperatury przewyższają wytrzymałość ABK. Popioły o większej reaktywności zapewniają uzyskiwanie dostatecznie dużych wytrzymałości tworzywa i w tych warunkach rysy nie powstają. Badania właściwości

the influence of conditions of preparations and burning of coal on quality of fly ash (16).

The investigations have shown that homogeneity of fly ash – and its physical properties, such as water absorption and fineness – depends of fuel preparation and its burning.

The research permitted to optimize the condition of production of AAC small size elements (blocks, plates). However, the production of AAC reinforced elements of large size caused some problems by their cracking (15). In some AAC elements based on fly ash cracks were formed while in others with fly ash of a very similar chemical composition and physical properties no cracks appeared. In elements of length above 4,80 m cracks and fractures occurred periodically on the whole width of the element. The investigation of chemical composition and physical properties, which indicated conformity with earlier fly ash specifications for small size elements, did not help to explain the problem. The profound investigation together with preparation of reinforced elements of equal size in laboratories of Research Center Cebet were undertaken, using fly ash from different power stations (14). During the tests a number of technological measures were applied, but the problem remained unsolved.

The tests of fly ashes comprised physical and chemical properties as well as the determination of thermal expansion coefficient, electric conductivity of water slurries, and measurement of fly ash activity in autoclave conditions. In the result of such a wide range of tests the correlation was found among properties of fly ash and a tendency to cracks formation in big size AAC reinforced elements (13). On this basis to the fly ash requirements for the production of reinforced elements an additional test of the so-called activity in autoclave condition was added.

The differences of the coefficient of thermal expansion α_t for sand $11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, steel $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ in comparison with fly ash in the range of $3,1-4,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ indicate that cracking occurs when large tensions in concrete during the temperature rise in the autoclave exceeds strength of AAC at this time. The more reactive fly ash assures sufficiently larger strength of AAC in the same period of autoclaving. The investigation of fly ash properties for reinforced AAC elements production of lengths exceeding 3 m should be continued.

In the last years in Poland, for protection of atmosphere, different systems of flue gas desulfurization from traditional boilers as well as from fluidized-bed boilers (17) were introduced. To solve the problems connected with the utilization of fly ash mixed with by-products, from different desulfurization processes, the properties of these materials were tested in view of their utilization in the concrete industry. The technologies of production of cellular concrete were worked out for a part of these materials (18). Both the properties of fly ash mixed with desulfurization by-products and the directions of their utilization should be further investigated. Necessary are also further investigations of statistical character as well as tests in the technical scale of different directions of utilization, especially of by-products from fluidized-bed boilers.

popiołów przeznaczonych do wytwarzania elementów zbrojonych o większej długości powinny być kontynuowane.

W ostatnich latach w Polsce, wprowadzane są różne metody odsiarczania spalin z kotłów pyłowych oraz spalanie węgla w kotłach fluidalnych (17). Równocześnie w celu rozwiązania problemu wykorzystania odpadów powstających w różnych metodach odsiarczania spalin, zbadano właściwości tych odpadów i określono kierunki ich utylizacji w przemyśle betonów. W przypadku niektórych popiołów zmieszanych z produktami odsiarczania spalin opracowano technologie ich stosowania do wytwarzania betonu komórkowego (18). Zarówno określone właściwości odpadów jak i opracowane kierunki ich wykorzystania nie wyczerpują niezbędnych prac badawczych w tym zakresie. Potrzebne są dalsze badania także o charakterze statystycznym oraz sprawdzenie w skali technicznej zaproponowanych kierunków utylizacji.

Jednym z ważnych zagadnień zrównoważonego rozwoju jest racjonalne wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych, do których należy energia z biomas. Jej udział w bilansie paliwowym energetyki rośnie w Polsce z roku na rok. Biomasa jest również spalana w dużych przemysłowych kotłach pyłowych, z których popioły lotne są stosowane do wytwarzania ABK. W ostatnim okresie podjęto więc prace, których celem jest sprawdzenie jak zmieniają się właściwości popiołów lotnych powstających z równoczesnego spalania biomasy i węgla w stosunku do popiołów ze spalania samego węgla i czy ewentualne zmiany właściwości nie wykluczają możliwości ich wykorzystania do wytwarzania autoklawizowanego betonu komórkowego i innych materiałów budowlanych (19).

3. Utrudnienia w stosowaniu popiołów lotnych

Utrudnieniem w stosowaniu popiołów lotnych między innymi do produkcji betonów komórkowych są opinie wyrażane w środkach masowego przekazu, o szkodliwości dla zdrowia popiołów lotnych i wyrobów z ich zastosowaniem.

W dalszym ciągu na łamach niektórych pism powtarzana jest ta opinia, a zdarzają się również artykuły, w których mówi się o szkodliwości prefabrykatów z betonu kruszywowego, wytwarzanych bez udziału popiołów. Natomiast jako najzdrowszy materiał uznawana jest ceramika. Prowadzone od 1980 roku systematyczne badania surowców mineralnych i wytwarzanych z nich materiałów pod kątem zawartości pierwiastków promieniotwórczych wyrażanych w formie współczynników f_1 i f_2 wykazują, że wyroby ceramiczne mają te współczynniki na poziomie żużlobetonu i betonu komórkowego, wykonanego z popiołów lotnych (rysunek 2) (9). Podczas systematycznych badań betonów komórkowych z popiołów prowadzonych przez 25 lat nie stwierdzono ani razu przekroczenia dopuszczalnych wartości współczynników f_1 i f_2 . Stwierdzono również, że nie występują

One of the essential elements of sustainable development concerns rational utilization of energy from renewable resources, such as the energy from biomass. Its part in fuel balance of renewable energy in Poland grows from year to year. Biomass is also burned in large industrial boilers and from these boilers fly ash is used for AAC production. For this reason, new research is undertaken checking to what degree the properties of fly ash from coburning of biomass and coal are different and whether a possible change of properties would be accepted for the production of AAC or other building materials (19).

3. Limitations of fly ash application

For many years there have been some obstacles in Poland in developing the production of building materials of fly ash, among others also AAC, resulting from mass media activity, which formulate an opinion of the public about harmfulness of fly ashes and their products.

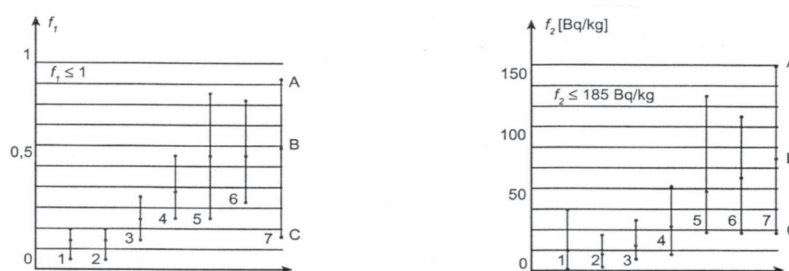
All the time the media present such a point of view and also there were articles in the press in which castable elements of concrete produced without any waste materials have been attacked. However, a prevailing opinion is that ceramic is the healthiest material. The tests carried out systematically from 1980 on building materials on the presence of natural radioactive elements have shown that ceramic products have the same level of qualifying coefficients as slag concrete and AAC produced of fly ash (Fig. 2) (9). A systematic examination lasting for over 25 years did not discover of AAC of fly ash even a single example of exceeding admissible values of qualifying coefficients f_1 and f_2 . It was also affirmed, that essential changes of these coefficients did not occur during this period.

The permissible values are:

$$f_1 = 0,00027 S_K + 0,0027 S_{Ra} + 0,0043 S_{Th} \leq 1 \quad [1]$$

$$f_2 = S_{Ra} \leq 185 \text{ Bq/kg} \quad [2]$$

where: S_K , S_{Ra} , S_{Th} – are content of potassium K-40, radium Ra-226



Rys. 2. Zmienność współczynników f_1 i f_2 w wybranych materiałach budowlanych: 1 – beton komórkowy piaskowy, 2 – cegła wapienno-piaskowa, 3 – beton zwykły, 4 – beton z keramzytu, 5 – cegła i wyroby ceramiczne, 6 – żużlobeton, 7 – beton komórkowy z popiołów lotnych. Wartości: A – maksymalna, B – średnia, C – minimalna; oznaczone na wykresach kropką, dotyczą obu tych współczynników

Fig. 2. Variation of coefficients f_1 and f_2 in selected building materials:

1 – AAC of sand, 2 – sand - lime bricks, 3 – classic concrete, 4 – LWA concrete, 5 – ceramic materials, 6 – slag concrete, 7 – AAC of fly ash

Values: A – max, B – average, C – min concern all qualifying coefficients marked by dots

większe zmiany tych współczynników w czasie.

Dopuszczalne wartości są następujące:

$$f_1 = 0,00027 S_K + 0,0027 S_{Ra} + 0,0043 S_{Th} \leq 1 \quad [1]$$

$$f_2 = S_{Ra} \leq 185 \text{ Bq/kg} \quad [2]$$

gdzie: S_K , S_{Ra} , S_{Th} – zawartości potasu K – 40, radu Ra – 226 i toru Th – 228.

Od 1 stycznia 2003 roku obowiązują w Polsce nowe wzory i wymagania dotyczące zawartości naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach przeznaczonych dla ludzi i inwentarza żywego. Stosując te wymagania do oceny ABK z popiołów lotnych można stwierdzić, że są one również spełnione przez to tworzywo.

Przeprowadzono również pomiary stężenia radonu (za którego stężenie jest odpowiedzialny rad) w budynkach, których ściany wykonane były z ABK oraz dla porównania w budynkach z innych materiałów budowlanych. Budynki te były zamieszkałe i położone w jednym rejonie Polski, na obszarze o promieniu 30 – 40 km. Pomiary wykazały (tablica 2), że najwyższy średni poziom radonu występuje w budownictwie

and thorium Th-228, respectively.

Starting from 1st January, 2003 new regulations are in force in Poland concerning the content of natural radioactive elements in building materials designed for housing and livestock. The tests carried out, on the base of new regulations, have indicated that AAC of fly ash also meets the new requirements.

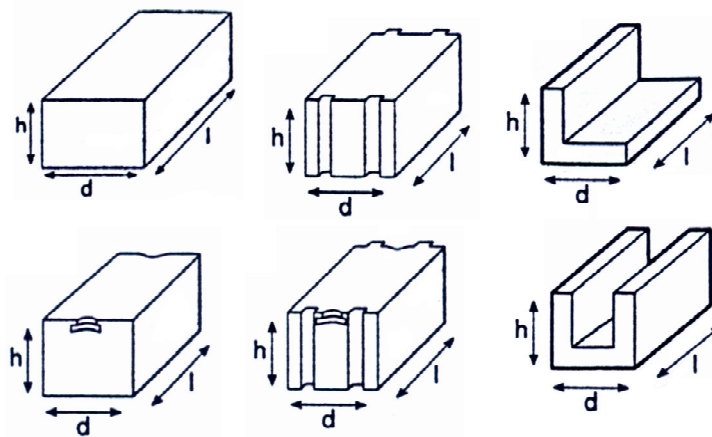
The concentration of radon was also tested in the buildings made of AAC walls as well as for comparison in the buildings from

Tablica 2 / Table 2

ŚREDNIE STĘŻENIE RADONU NA PARTERZE BUDYNKÓW WYKONANYCH Z RÓŻNYCH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH, Bq/m³

AVERAGE RADON CONCENTRATION ON THE GROUND FLOOR IN BUILDINGS CONSTRUCTED OF DIFFERENT MATERIALS, Bq/m³

Wielka płyta betonowa Big size panel	Drewno Wood	Cegła ceramiczna Ceramic	Beton komórkowy Cellular concrete of		
			popiołowy fly ash	piaskowy sand	piaskowy + cegła sand + brick
47	92,3	86,2	56,7	61,2	68,2



Rys. 3. Rodzaje elementów murowych o małych wymiarach oraz pustaki stropowe

Fig. 3. Masonry elements and floor hollow blocks

Tablica 3 / Table 3

DEKLAROWANY I OBLICZONY WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA ABK Z 23 WYTWÓRNI

DECLARED AND MEASURED THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT

Rodzaj ABK AAC type	Gęstość w stanie suchym kg/m ³ Dry density kg/m	Współczynnik przewodzenia ciepła λ W/(m x K) Thermal conductivity coefficient W/(m x K)		
		deklarowany declared		λ_u obliczony test results
		λ_{D23}	λ_{D10}	
Technologia piaskowa Sand technology	400	0,095-0,115	0,091-0,110	0,110-0,130
	500	0,125-0,140	0,120-0,135	0,145-0,160
	600	0,140-0,170	0,130-0,165	0,160-0,195
	700	0,175-0,190	0,165-0,190	0,200-0,22
Technologia popiołowa Fly ash technology	350 ¹⁾	0,070	0,068	0,095
	400	0,086-0,097	0,083-0,095	0,105-0,120
	500	0,110-0,120	0,105-0,115	0,130-0,140
	600	0,125-0,145	0,125-0,140	0,150-0,170
700	0,150-0,160	0,145-0,155	0,175-0,190	

¹⁾ jednego producenta

* from one producer AAC (from 23 factories)

drewnianym. Ponieważ drewno nie może być źródłem radonu, potwierdziły się wyniki badań uzyskane w innych krajach, że nie materiał budowlany jest czynnikiem decydującym o podwyższonym stężeniu radonu, lecz grunt na którym stoi budynek oraz łatwość infiltracji radonu z gruntu do wnętrza budynku (9).

O wynikach tych pomiarów Ośrodek CEBET oraz producenci betonów komórkowych informują opinię publiczną, aby zmienić panującą jeszcze wśród części społeczeństwa pogląd o szkodliwości popiołów lotnych. Takie poglądy mogą spowodować rezygnację niektórych producentów ABK ze stosowania popiołów lotnych, zastępując je piaskiem. Producenci ABK nie chcą być postrzegani jako utylizator odpadów w opinii odbiorców tych materiałów.

4. Rodzaje i właściwości techniczne ABK

Obecnie w Polsce z ABK wytwarzanych jest wiele rodzajów elementów murowych w klasach gęstości od 300 do 700 (rysunek 3) (1) oraz pustaki stropowe (rysunek 3), a z elementów zbrojonych wyłącznie na zamówienie płyty dachowe o długości do 3 m (klas gęstości 500 i 600).

W latach ubiegłych produkowane były również elementy zbrojone ścienne: dyle o długości do 6 m, elementy ścienne wielkopłytowe scalone również o długości do 6m o pełnym fabrycznym wykończeniu.

Duże ograniczenie uprzemysłowionego budownictwa spowodowało, że obecnie wytwarzane są głównie elementy o małych wymiarach. W pewnym stopniu na ten stan wpłynęły również problemy technologiczne związane z jakością popiołów lotnych (patrz p. 2).

Na podstawie wieloletnich polskich doświadczeń można stwierdzić, że stosowanie do produkcji ABK popiołów lotnych i prowadzenie procesu technologicznego zgodnie z ustalonymi zasadami zapewnia uzyskiwanie elementów o małych wymiarach i zbrojonych

different building materials. The buildings were inhabited, located in one region of Poland (within the radius of 30–40 km). The measurements showed (Table 2) that the highest average level of radon was found in wooden buildings. Taking into account that wood cannot be the source of radon the test confirmed results obtained in other countries that building material is not a decisive factor influencing the concentration of radon but the soil on which buildings were built as well as the easiness of infiltration of radon from soil to the inside of buildings (9).

The public was informed about these results as well as AAC producers in order to change the still existing, opinions about harmfulness of fly ash. These opinions can create unfavourable conditions and some AAC manufacturers can replace fly ash technology by sand technology. AAC manufacturers do not want

to be perceived as the users of by-products by their customers.

4. Assortment and technical properties of AAC

The masonry elements produced from AAC at present in Poland are of density classes from 300 to 700 (Fig. 3) (1) as well as floor hollow blocks and reinforced elements (Fig. 3), exclusively roof plates of lengths up to 3 m (classes 500 and 600), but only for individual orders.

In the past years reinforced wall elements were also produced, namely: planks of lengths up to 6 m, and entirely factory finished big size wall units of lengths up to 6 m.

Significant limitations of industrialized construction methods caused that at present mainly small-size elements are produced.

It can be stated that as a result of the long-term Polish experience technology AAC of fly ash technology and keeping the production process in accordance with established requirements assure the production of small and medium size reinforced elements (length up to 3 m) to be good properties.

As it was confirmed in practice, AAC of fly ash technology assures the production of lower density classes (300 - 500) and the compressive strength, is higher 10-15% as compared to AAC of sand technology, without fly ash.

Thermal properties (according to PN ISO 8302) of AAC showed the advantage of this high insulation material among other materials used for walls production. The best insulation has AAC of fly ash technology because this concrete shows usually a lower coefficient of thermal conductivity than AAC of sand technology, regard less density of concrete (Table 3) (12). This enables very advantageous methods for walls construction to be used which results in saving thermal energy during the building exploitation.

o średnich wymiarach (o długości do 3 m) o dobrych właściwościach. Wymaga to jednak stałej kontroli właściwości popiołów.

Stosowanie popiołów lotnych ułatwia uzyskiwanie ABK o niższych klasach gęstości (300 – 500). Jak potwierdziła praktyka w tych klasach gęstości używa się większą o 10–15% wytrzymałość na ściskanie niż w przypadku ABK z piasku.

Badania właściwości cieplnych (wg PN ISO 8302) wykazały, że zaletą ABK jest mała przenikalność ciepła odróżniająca je od innych materiałów stosowanych do murowania ścian. Najmniejszą wykazują ABK produkowane z popiołów lotnych. Beton ten ma bowiem zwykle niższy współczynnik przewodzenia ciepła od ABK piaskowego, niezależnie od gęstości betonu (tablica 3) (12), a to pozwala na bardzo korzystne rozwiązania ścian co w konsekwencji daje oszczędność energii cieplnej, podczas eksploatacji budynku.

W tablicy 4 przedstawiono wpływ współczynników przewodzenia ciepła na wartość współczynników przenikania ciepła U dla typowej jednorodnej (jednowarstwowej) ściany zewnętrznej. Ściany te są szczególnie polecane w przypadku budynków jednorodzinnych, pozwalają bowiem na najpełniejsze wykorzystywanie walorów izolacyjnych i konstrukcyjnych ABK.

Przeprowadzone badania ścian z ABK budynków po 30-40 latach eksploatacji potwierdziły, że wilgotność przegród z ABK piaskowego wynosi około 2,5% a popiołowego 4,5% (8). Taka wilgotność przegrody z ABK zapewnia dobrą izolacyjność cieplną. Zmierzone wilgotności przegród przeczą głośzonym niekiedy opiniom o bardzo dużej wilgotności ścian z ABK.

Oceniając właściwości ABK należy pamiętać że, ABK z popiołów lotnych ma często większy skurcz niż ABK piaskowy. Z badań Humsa (4) wynika, że graniczna wartość skurczu zmierzona w laboratorium, przy której nie powstają rysy w ścianach wynosi 0,35mm/m. Z naszych doświadczeń wynika, że równie ważna, oprócz skurczu, jest wilgotność ABK w trakcie murowania ściany oraz rodzaj zaprawy jaką łączone są elementy w murze (7).

Tablica 4 / Table 4

WSPÓŁCZYNNIKI PRZENIKANIA CIEPŁA TYPOWEJ JEDNORODNEJ ŚCIANY ZEWNĘTRZNEJ
HEAT-TRANSFER COEFFICIENT OF TYPICAL HOMOGENEOUS EXTERNAL WALL

Gęstość betonu w stanie suchym, kg/m ³ Dry density of AAC, kg/m	Rodzaj technologii, dla której przyjęto współczynnik przewodzenia ciepła λ_u Type of technology	Obliczony współczynnik przewodzenia ciepła λ_u W/(mxK) Measured thermal conductivity coefficients, W/(mxK)	Współczynnik przenikania ciepła U, W/m ² xK ściany grubości Heat-transfer coefficient, U, W/m ² xK Wall thickness	
			36 cm	42 cm
Wartości obliczone uzyskane przez producentów, dla technologii: Measured values:				
350	Popiołowej Sand technology	0,095	0,25	0,22
	Piaskowej Fly ash technology	0,095	0,25	0,23*
400	Popiołowej Fly ash technology	- wartość minimalna - minimum value	0,105	0,28
	- wartość maksymalna - maximum value	0,120	0,31	0,27
	Piaskowej Sand technology	- wartość minimalna - minimum value	0,110	0,29**
	- wartość maksymalna - maximum value	0,130	0,34	0,29
500	Popiołowej Fly ash technology	- wartość minimalna - minimum value	0,130	0,34
	- wartość maksymalna - maximum value	0,140	0,36	0,31
	Piaskowej Sand technology	- wartość minimalna - minimum value	0,145	0,37
	- wartość maksymalna - maximum value	0,160	0,41	0,35

*grubość ściany 40 cm

** grubość ściany 36.5 cm

*Wall thickness 40 cm

** Wall thickness 36.5 cm

In Table 4 the effect of the coefficient of thermal conductivity onto the heat-transfer coefficient is presented for a typical homogeneous external wall. These walls are particularly recommended for detached houses because they permit the best utilization of insulation and structural advantages of AAC.

The examination of AAC walls in buildings after 30-40 years of exploitation, has confirmed that the moisture content of partition from AAC of sand technology was about 2,5% while of AAC of fly ash technology - about 4,5% (8). At such a moisture content the partitions of AAC show good thermo-insulating properties. Test results of moisture content of partitions deny the opinions about very high moisture content of walls from AAC.

5. Efektywność wykorzystania popiołów lotnych do wytwarzania ABK

Doświadczenia polskie wykazują następujące efekty techniczno-ekonomiczne związane ze stosowaniem popiołów lotnych:

- Zmniejszenie kosztów budowy i eksploatacji składowisk popiołów oraz zmniejszenie ich powierzchni. Rachunek ekonomiczny wykazuje (w warunkach polskich), że zmniejszenie nakładów ponoszonych na składowanie takiej ilości popiołów jaką zużyje średniej wielkości wytwórnia ABK (o zdolności produkcyjnej 200 000 m³/rok) w czasie 8-10 lat pozwala zwrócić koszty inwestycyjne poniesione na jej wybudowanie (6)
- Zlokalizowanie wytwórni ABK bezpośrednio w sąsiedztwie elektrowni pozwala na zastosowanie pneumatycznego transportu popiołów do wytwórni, eliminując ich uciążliwe przewozy oraz pozwala na wykorzystanie pary zrzutowej z turbin w elektrowni jako pary technologicznej, co eliminuje potrzebę posiadania własnej kotłowni i bardzo zmniejsza koszty inwestycyjne i eksploatacyjne wytwórni.
- Wykorzystanie popiołów do produkcji ABK w stosunku do ABK piaskowego daje następujące korzyści:
 - zmniejszenie zużycia energii elektrycznej na wyprodukowanie 1 m³ ABK o około 40%,
 - zmniejszenie zużycia spoiw (cement + wapno) na jednostkę produkcji o 20–25%.

Jest to związane z dużym rozdrobnieniem popiołów oraz ich właściwościami pucolanowymi to jest zdolnością wiązania wodorotlenku wapna przez krzemionkę i tlenek glinu, stanowiące główne składniki popiołów krzemionkowych.

Koszt produkcji 1 m³ ABK z popiołów lotnych jest niższy o około 30% w stosunku do ABK piaskowego.

Zalety stosowania popiołów lotnych do produkcji ABK rekompensują następujące niedogodności produkcyjne:

- popiół pyli i zanieczyszcza atmosferę, wymaga więc hermetyzacji w trakcie transportu i dozowania co wiąże się ze stosowaniem urządzeń odpylających
- wymaga stałej kontroli właściwości.

6. Podsumowanie

- Współczesne technologie wytwarzania ABK i charakterystyki obiektów wykonanych z tych wyrobów wykazują, iż zarówno proces produkcji jak i stosowanie ABK wykazują szereg zalet z punktu widzenia zrównoważonego rozwoju w porównaniu z innymi materiałami budowlanymi (20). Szczególnie korzystne jest wykorzystanie popiołów lotnych do produkcji ABK.
- Rozwój produkcji ABK z popiołów lotnych w Polsce był oparty na kompleksowych pracach badawczych związanych z określeniem właściwości popiołów, wymagań normowych oraz opracowaniem technologii wytwarzania ABK.
- Z porównania ilości wytwarzanych odpadów i produkowanych

Analyzing AAC properties one should take into consideration that AAC of fly ash shows often larger shrinkage than AAC of sand technology. According to the investigations (4), 0,35 mm/m can be accepted as threshold shrinkage value, at which cracks do not occur in walls. It results, from our experience, that equally important, beside shrinkage from tests, is moisture content of AAC in the moment of wall making as well as the kind of mortar joining wall elements (7).

5. Efficiency of fly ash utilization in AAC production

The Polish experience shows the following effects of fly ash technology:

- Lower costs of fly ash storage and exploitation of dumping grounds as well as decrease of their surfaces. Economic analysis shows that, in the Polish conditions, expenditure savings for storing of ash quantity which would be used in average size AAC factory of capacity equal 200 000 m³/year during 8-10 years permits to return the costs of a new AAC factory (6).
- Location of AAC factory in the neighborhood of a power station permits to use pneumatic transport of fly ash, eliminating its burdensome transport as well as permits the utilization of dump steam from power station turbines as technological steam and excludes the need of an additional boiler which essentially decreases the investment and exploitation costs of AAC factory.
- Decrease of energy and material consumption. Utilization of ash for AAC production in relation to sand technology allows the following factors to decrease:
 - 40% of electric energy necessary for production of 1 m³ of AAC,
 - 20–25% of binder (cement + lime) for unit of production.

It is connected with high fineness of fly ash as well as with its pozzolanic properties, i.e. the ability of silica and aluminum reaction with calcium hydroxide and formation of C-S-H.

Cost of 1 m³ of AAC production in ash technology is lower by about 30% in relation to AAC in sand technology.

Efficiency of fly ash technology of AAC production compensates some shortcomings of ash resulting from its nature:

- dust formation, so it demands hermetic sealings in transport and in use as well as installing of dedusting equipment,
- its composition depends of coal quality and burning conditions which demands regular checking of ash properties.

6. Conclusions

- Necessity of assuring sustainable development to protect the climate of the Earth and the right of people to breathe clean air should make up the motto of our activity. This activity should not be directed for the satisfaction of needs not only of the present but also future generations (3). Often it is hard

materiałów budowlanych wynika, że na świecie w najbliższym dwudziestolecu zagospodarowanie odpadów w przemyśle materiałów budowlanych stanie się wyzwaniem cywilizacyjnym.

- Ocena stosowania surowców odpadowych, w tym popiołów lotnych, do wytwarzania materiałów budowlanych wymaga oprócz efektywności ekonomicznej, uwzględnienia zagadnień ekologicznych i społecznych, zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Literatura / References

1. Babiński i inni, *Budowanie z betonu komórkowego; Poradnik-katalog*. Stowarzyszenie Producentów Betonów, Warszawa 2005.
2. Bastian i inni, *Popioły lotne*, Instytut Techniki Budowlanej. Komisja wykorzystania popiołów lotnych, Warszawa 1965.
3. D. Hums, Ecological aspects for the production and use of autoclaved aerated concrete. Wittmann (ed.), *Advances in Autoclaved Aerated Concrete: 271-275*, Balkema, Rotterdam 1992.
4. D. Hums, Skurcz materiałów ściennych, *Materiały Budowlane* 98(4): 36-37, Warszawa 1999.
5. H. Jatymowicz, J. Siejko, G. Zapotoczna-Sytek, *Technologia autoklawizowanego betonu komórkowego*, Arkady, Warszawa 1980.
6. H. Jatymowicz, G. Zapotoczna-Sytek, Stan i możliwości zwiększenia popiołów lotnych do produkcji betonu komórkowego, *Materiały budowlane* 84(7): 17-19. Warszawa 1984.
7. Kruk i inni, *Badania podatności na zarysowania ustrojów ściennych (murów) wykonanych z lekkich odmian betonu komórkowego*, Warszawa: COBRPB "Cebet", Warszawa 2003-2004.
8. Łaś i inni, *Badania ciepłno-wilgotnościowe i trwałościowe murów z elementów z betonu komórkowego*, COBRPB "Cebet", Warszawa 1999-2001.
9. K. Mamont-Cieśla, G. Zapotoczna-Sytek, Promieniotwórczość betonu komórkowego- mity czy rzeczywistość? *Materiały Budowlane* 98(3): 22-23. Warszawa 1998.
10. Morawska i inni, *Instrukcja badań i oceny popiołów lotnych z węgla kamiennego stosowanego do produkcji betonu komórkowego*, COBRPB "Cebet", Warszawa 1987.
11. A. Paprocki, *Betony komórkowe*, Arkady, Warszawa 1966.
12. Soboń i inni, *Poradniki dla budujących z betonu komórkowego. Czasopismo Stowarzyszenia Producentów Betonów*, Warszawa 2000, 2005.
13. J. Stokłosa, i inni, Opracowanie kryteriów oceny popiołów lotnych przydatnych do produkcji pełnego asortymentu wyrobów z betonu komórkowego, *Temat 3078*, COBRPB "Cebet", Warszawa 1979-1980.
14. Sytek i inni, Kompleksowe badania popiołów lotnych w celu umożliwienia produkcji pełnego asortymentu wyrobów z betonu komórkowego, *Temat 3054*, COBRPB "Cebet", Warszawa 1977-1978.
15. G. Zapotoczna-Sytek, J. Siejko, *Problemy technologiczne występujące w przemysłowej produkcji AAC przy stosowaniu popiołów lotnych*, 81-87, COBRPB "Cebet", Warszawa 1978.
16. G. Zapotoczna-Sytek, Przydatność popiołów lotnych z nowoczesnych palenisk przemysłowych do produkcji betonu komórkowego, *Praca doktorska*, Politechnika Warszawska, Warszawa 1973.

to find a reference to such a formulated thesis in the present construction activity, engaging the whole process of formations and existence of objects as well as the reduction of influence on natural environment.

- Present-day technologies of AAC production, properties and types of buildings from this products show that both processes of production and use of AAC are in a relatively good agreement with sustainable development (20). The application of AAC of fly ash technology is particularly advantageous which has been documented in this paper.
 - Since the fifties production of AAC of fly ash has been developed in Poland. The development of AAC production was based on with complex investigations connected with detailed examination of fly ash properties, determination of requirements as well as technology of AAC production.
 - From comparison of quantity building materials production it results that in the world in the coming decades the utilization of by-products in this industry will become a civilization challenge.
 - Utilization of industrial waste and by-products in many cases demands a change of traditional approach. It has to follow full understanding of the problem, that production technology cannot be considered only from the point of view of technical
17. G. Zapotoczna-Sytek, i inni, Wpływ techniki odsiarczania spalin i prowadzenia spalania węgla w kotłach fluidalnych na skład chemiczny i cechy fizykochemiczne odpadów paleniskowych, *Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego nr 602879101*, COBRPB "Cebet", Warszawa 1994.
 18. G. Zapotoczna-Sytek, P. Jarosz-Jaroszewski, Ocena właściwości i możliwości zastosowania do produkcji materiałów budowlanych produktów odpadowych z różnych metod odsiarczania spalin, *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej; Zagadnienia Materiałowe Inżynierii Lądowej, Kraków. 19-22 czerwca 1996*: 416-423.
 19. G. Zapotoczna-Sytek, Zrównoważony rozwój, a proces wytwarzania wyrobów budowlanych, *III Międzynarodowa Konferencja Naukowa; Energia i Środowisko w technologiach materiałów budowlanych, Szczyrk-Opole: 259-269*, (2004).
 20. G. Zapotoczna-Sytek, Współczesne technologie betonu komórkowego, prognozy w świetle zasad zrównoważonego rozwoju, *Materiały XIX Konferencji Naukowo-Technicznej; Beton i Prefabrykacja, Jadwisin: 137-149*, Warszawa 2004.
 21. G. Zapotoczna-Sytek, B. Górską, J. Romanowski, Wykorzystywanie popiołów ze współspalania biomasy do produkcji materiałów budowlanych, *Konferencja; Współspalanie biomasy i paliw wtórnych w kotłach energetycznych, Zakopane, 12-14 maja 2004*.