

Assoc. Prof. Stanislav Unčík¹, PhD., Alena Struhárová¹, PhD., Mária Hlavinková¹, Andrea Sabová¹, Svetozár Balkovic², PhD.

¹ Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Slovak Republic

² Porfix – pórobeton, a.s., Zemianske Kostofany, Slovak Republic

Wpływ gęstości pozornej oraz zawartości wilgoci na właściwości autoklawizowanych betonów komórkowych

Effect of bulk density and moisture content on the properties of autoclaved aerated concrete

1. Wstęp

Gęstość pozorna jest czynnikiem, który ma wpływ na wszystkie właściwości fizyczne materiałów budowlanych, w tym również autoklawizowanych betonów komórkowych (ABK). Jest wiele wyników doświadczalnych pokazujących, że wytrzymałość na ścislenie raptownie maleje ze spadkiem gęstości pozornej (6). Wytrzymałość na ścislenie jest także zależna od wilgotności materiału i maleje z jego wzrostem. Jest ścisła zależność wytrzymałości na ścislenie, nasiąkliwości i innych właściwości fizycznych od porowatości materiału i rozkładu wielkości porów. ABK typowo zawiera mezopory o promieniach około 50 μm , a także makropory (10, 11, 14). Wiadomo, że na właściwości materiałów ma wpływ nie tylko porowatość całkowita, lecz także rozkład wielkości porów, który oddziałuje między innymi na podciąganie kapilarne i odporność na mróz.

Współczynnik przewodności cieplnej λ należy do podstawowych właściwości technicznych materiałów budowlanych, do których należy ABK (1-3). Producenci materiałów budowlanych określają z reguły współczynnik przewodności cieplnej λ suchego materiału. Jednak w praktyce materiały budowlane zawierają zawsze pewną zawartość wilgoci, która ma duży wpływ na właściwości cieplne. Z tego względu zmiany współczynnika przewodności cieplnej ma

1. Introduction

Bulk density is the factor that affects all physical properties of building materials, including autoclaved aerated concrete (AAC). There are numerous experimental results showing that compressive strength rapidly decreases with decreasing bulk density (6). Compressive strength is also affected by moisture content of the material and is decreasing with it increase. Compressive strength, water content and other physical properties are strongly influenced by porosity of the material and pore size distribution. AAC typically contains the mesopores with radius of about 50 μm , but also macropores (10, 11, 14). It is commonly known that properties of materials are affected not only by the total porosity, but also by pore size distribution which is influencing, among others, capillary action and frost resistance.

The thermal conductivity coefficient λ belongs to the basic technical properties of building materials, including aerated autoclaved concrete (AAC) (1-3). The producers of building materials usually define thermal conductivity λ of dried material. However, in praxis, materials always have a certain moisture content which strongly affects this thermal property. Therefore the changes of thermal conductivity coefficient with moisture content is of special importance. Stationary measurement methods, connected with

szczególne znaczenie. Metody pomiarów w stanie ustalonym, połączone z poddaniem badanej próbki długotrwałemu naprężeniu, wywołanym gradientem temperaturowym, nie mogą być stosowane w przypadku wilgotnych materiałów. Oczywiście są jeszcze inne metody, na przykład z zastosowaniem miejscowego podgrzewania próbki, które pozwalają na pomiar λ w przypadku materiałów o znacznej wilgotności. Ta metoda jest stosowana w aparacie „ISOMET”, który używano w tej pracy.

Znaczenie wpływu gęstości pozornej ABK na współczynnik λ jest szeroko opisany w technicznej literaturze. Według szeregu autorów (4, 5) zależność λ od gęstości pozornej jest nieliniowa. Inaczej mówiąc, przewodność cieplna materiału wzrasta znacznie ze wzrostem gęstości pozornej materiału. Przy dużych gęstościach krzywizna tej funkcji jest bardzo mała, a dla pewnego wąskiego przedziału gęstości pozornej tę zależność można traktować jako liniową.

Jest mniej danych na temat wpływu zawartości wilgoci na wielkość współczynnika przewodności cieplnej λ . Pomimo, że wpływ wilgotności na ten współczynnik jest znany to informacje te sprowadzają się często do ogólnego zdefiniowania tej zależności, bez podania wartości liczbowych. Ogólnie wiadomo, że współczynnik λ wzrasta ze zwiększeniem wilgotności. Niektórzy autorzy podają, że zależność ta jest nieliniowa, jednak często ujmuje się ją w uproszczonej liniowej postaci (6, 7).

W pracy omówiono wyniki pomiarów współczynnika przewodności cieplnej λ ABK o różnej gęstości pozornej i zawartości wilgoci. Celem doświadczeń było zbadanie wpływu zawartości wilgoci w ABK o różnej gęstości pozornej [technologia popiołowa] na wielkość współczynnika przewodności cieplnej λ .

2. Stosowane materiały i skład próbek

Próbki ABK pochodziły z wytwórni PORFIX, Inc. w Zemianske Kostol'any, zostały wyprodukowane zgodnie z technologią popiołową i miały gęstość nasypową, kolejno: 420, 480, 520 i 610 kg/m³. Badano próbki kostkowe, o wymiarze 100 mm. W celu zbadania wpływu wilgotności na wytrzymałość na ściskanie i właściwości cieplne dodawano do próbek wodę przed pomiarami, w ilości zapewniającej ich wilgotność wynoszącą 1,3, 5, 10, 20 i 30%. Próbki przechowywano w woreczkach plastikowych w szczelnym pojemniku plastikowym przez 2 tygodnie. Bezpośrednio przed pomiarem, a w przypadku pomiarów przewodności cieplnej także po pomiarach, oznaczano wilgotność próbek. Wyniki pomiarów wytrzymałości podano w tablicy 1.

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI ABK

PROPERTIES OF AAC

Gęstość pozorna w stanie suchym ρ_v / Bulk density in dry state ρ_v , kg·m ⁻³	420	480	520	560	610
Wytrzymałość na ściskanie f_c / Compressive strength f_c , MPa	2,4	3,2	3,8	5,0	5,5

long thermal stress of tested sample cannot be applied for moist materials. On the other hand, there are also other methods (e.g. hot wire method) that enable λ measurements of materials with relatively high moisture content. This method is also used in the “ISOMET” device which was applied of in this study.

The issue of the effect of bulk density of AAC on coefficient λ is quite adequately presented in technical literature. According to many authors (4, 5), the relationship between the bulk density and λ is nonlinear. In other words, the thermal conductivity of a material remarkably increases with the rise of the material bulk density. At higher bulk densities, the curvature of the function is very low and at certain relatively narrow interval of bulk densities, this relation can be considered as linear.

There is less information about the exact effect of moisture content on the coefficient of thermal conductivity λ . Even though the influence of moisture content on λ is widely known, the information is often limited to general definition of this relation, without numerical relationships. Generally, the coefficient λ increases with the rise of moisture content. Some authors report that this function is nonlinear, however, it is often presented in simplified linear form (6, 7).

In the paper the results of thermal conductivity coefficient λ measurements of AAC with various bulk density and moisture content are presented. The goal of experiments was to study the effect of moisture content at different bulk density of AAC [fly ash technology] on thermal conductivity coefficient λ .

2. Used material and kind of samples

The AAC samples produced according to fly ash technology, by PORFIX, Inc. Zemianske Kostol'any have various bulk density - 420, 480, 520, 560 and 610 kg/m³. The tested samples were dry cubes of 100 mm. For determination of moisture effect on compressive strength and thermal properties the suitable water content was added to the samples before measurements, assuring the moisture content of 1, 3, 5, 10, 15, 20 and 30%. Samples were then put into tight PE bags and stored in sealed PE box for 2 weeks. Just prior to the measurements and in the case of thermal conductivity also after the measurements, the moisture content of the samples was check. Compressive strength of AAC samples is shown in Table 1.

3. Methods

Compressive strength of AAC was determined according to EN 772-1:2000 Methods of test for masonry units. Capillarity porosity

3. Metody

Wytrzymałość na ściskanie próbek oznaczano zgodnie z normą EN 772-1:2000, a porowatość kapilarną z normą EN 772-11: 2000. Nasiąkliwość ABK określano jako zawartość wody zaabsorbowanej przez próbki w trakcie trzydniowych badań; w pierwszym dniu próbki były znużone w wodzie do 1/3 ich wysokości, w drugim dniu do 2/3, a w trzecim były całkowicie zanurzone.

Stosowano ISOMET 2104 z powierzchniowym sensorem do pomiaru współczynnika przewodności cieplnej. Sam pomiar polega na analizie odpowiedzi cieplnej badanej próbki na impulsy cieplne. Impulsy cieplne wynikają ze strat cieplnych spirali oporowej sensora, który ma bezpośredni kontakt z badaną próbką. Wyznaczenie ilościowej wielkości współczynnika przewodności cieplnej i współczynnika objętościowego ciepła właściwego opiera się na rejestracji zmian temperatury w funkcji czasu.

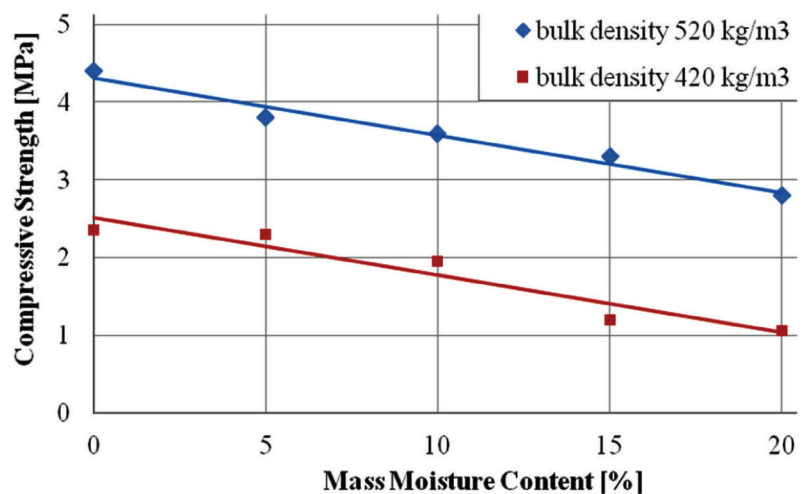
4. Wyniki pomiarów

W tabelicy 1 podano wpływ gęstości pozornej ABK na wytrzymałość na ściskanie, a wilgotności próbek pokazano na rysunku 1. Wzrost wilgotności powoduje znaczny spadek wytrzymałości na ściskanie.

Wpływ gęstości pozornej na podciąganie kapilarne próbek pokazano na rysunku 2, a normową nasiąkliwość na rysunku 3. Z rysunku 3 wynika znaczenie kierunku podciągania kapilarnego w stosunku do narastania masy betonu, w trakcie jej dojrzewania. Największe podciąganie kapilarne występuje w kierunku prostopadłym do kierunku narastania masy. Tak podciąganie kapilarne jak i nasiąkliwość normowa maleją ze wzrostem gęstości pozornej próbek ABK.

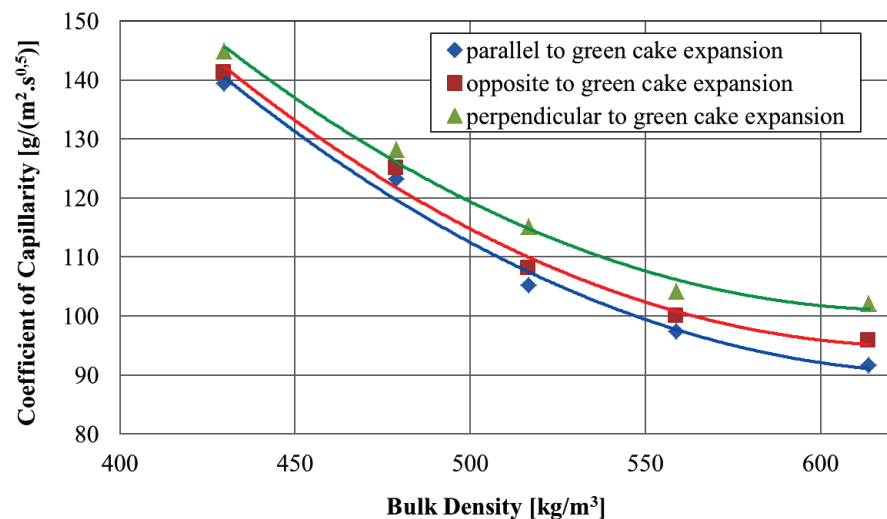
Wyniki oznaczeń struktury porów pokazano na rysunkach 4-7. Na rysunku 4 przedstawiono kumulacyjne krzywe objętości porów w próbkach ABK o różnej gęstości pozornej, a na rysunku 5 rozkład wielkości porów w tych próbkach. Na rysunku 6 pokazano wpływ gęstości pozornej na wartość mediany promienia porów oraz makroporów. Na rysunku 7 podano stosunki objętości mezoporów i makroporów.

Wyniki pomiarów właściwości fizycznych ABK zebrano w tabelicy 2. Zależność współczynnika przewodności cieplnej λ od wilgotności pokazano na rysunku 8, a od gęstości pozornej na rysunku 8. Zależność współczynnika przewodności cieplnej λ od gęstości pozornej przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 1. Wpływ wilgotności próbek ABK na wytrzymałość na ściskanie

Fig. 1. The influence of moisture content of AAC on compressive strength



Rys. 2. Wpływ gęstości pozornej ABK na podciąganie kapilarne w różnych kierunkach

Fig. 2. The influence of AAC bulk density on the capillary action in different directions

was measured according the European standard (EN 772-11: 2000 Methods of test for masonry units. Water absorption of AAC was determined as the amount of water absorbed by the samples during three days test; in the first day samples were immersed to one third of their heights, the second day to two-thirds and the third day they were totally immersed in water.

ISOMET 2104 with superficial sensor was used for thermal conductivity coefficient measurement.

The measurement is based on the analysis of thermal response of examined AAC sample to the impulses of thermal flow. Thermal flow is induced by Joule's losses of resistance wire in sensor, which is in direct thermal contact with tested sample. The quantification of thermal conductivity coefficient and coefficient of specific volume thermal capacity is based on evaluation of temperature records as time function.

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE ABK

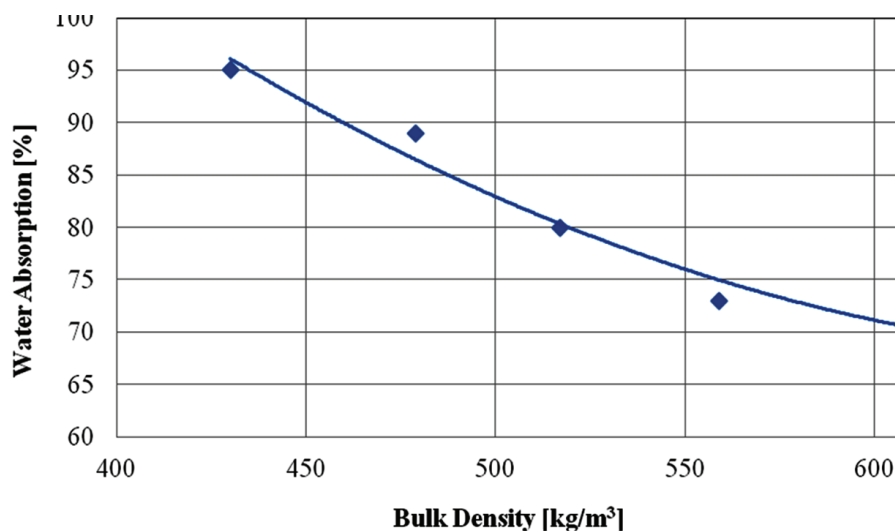
PHYSICAL PROPERTIES OF AAC

Gęstość pozorne próbek suchych ρ_V , Bulk density in dry state ρ_V , kg/m ³	Zawartość wilgoci V_{hm} , Mass moisture content V_{hm} , % mas.	Współczynnik przewodności cieplnej λ , Thermal conductivity coefficient λ , W/m·K	Objętościowe ciepło właściwe c_p , Specific volume thermal capacity c_p , J/m ³ ·K	Dyfuzyjność cieplna a , Thermal diffusivity a , m ² /s
420	0%	0,084	$4,16 \cdot 10^5$	$2,04 \cdot 10^{-7}$
	5%	0,105	$5,45 \cdot 10^5$	$1,93 \cdot 10^{-7}$
	10%	0,133	$6,87 \cdot 10^5$	$1,97 \cdot 10^{-7}$
	20%	0,196	$9,75 \cdot 10^5$	$2,01 \cdot 10^{-7}$
480	0%	0,090	$4,54 \cdot 10^5$	$1,91 \cdot 10^{-7}$
	5%	0,107	$5,75 \cdot 10^5$	$1,87 \cdot 10^{-7}$
	10%	0,136	$7,54 \cdot 10^5$	$1,80 \cdot 10^{-7}$
	20%	0,205	$10,82 \cdot 10^5$	$1,90 \cdot 10^{-7}$
520	0%	0,098	$4,75 \cdot 10^5$	$2,06 \cdot 10^{-7}$
	5%	0,121	$6,19 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^{-7}$
	10%	0,145	$7,41 \cdot 10^5$	$1,89 \cdot 10^{-7}$
	20%	0,227	$11,54 \cdot 10^5$	$1,98 \cdot 10^{-7}$
560	0%	0,117	$5,82 \cdot 10^5$	$2,01 \cdot 10^{-7}$
	5%	0,136	$7,39 \cdot 10^5$	$1,75 \cdot 10^{-7}$
	10%	0,164	$9,06 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^{-7}$
	20%	0,217	$12,60 \cdot 10^5$	$1,73 \cdot 10^{-7}$
610	0%	0,122	$6,20 \cdot 10^5$	$1,90 \cdot 10^{-7}$
	5%	0,148	$7,95 \cdot 10^5$	$1,86 \cdot 10^{-7}$
	10%	0,172	$9,61 \cdot 10^5$	$1,81 \cdot 10^{-7}$
	20%	0,237	$12,72 \cdot 10^5$	$1,88 \cdot 10^{-7}$

5. Omówienie wyników

Wszystkie właściwości fizyczne ABK są zależne od struktury porowatości i ulegają zmianom wraz z ich różną gęstością pozorną. Wzrost gęstości pozornej jest spowodowany zmniejszeniem sumarycznej objętości porów, jak to pokazano na rysunku 4. Zmiana objętości porów dotyczy głównie makroporów, szczególnie o promieniach większych od $5 \cdot 10^4$ nm. Objętość tych porów jest większa w przypadku mniejszej gęstości pozornej, podczas gdy objętość porów ≤ 50 μ m pozostaje praktycznie stała, jak to wynika z rysunku 7.

Oznaczony rozkład porów jest także skorelowany z objętością ogólną porów. W zakresie mezoporów (średnica od 2 do 50 nm) rozkład wymiarów porów jest bardzo podobny, praktycznie taki sam (rysunek 5), w przypadku wszystkich rodzajów ABK. Jednak zawartość makroporów znacznie wzrasta wraz ze spadkiem gęstości pozornej ABK. Ten rozkład porów znajduje potwierdzenie w wartości mediany promieni porów. Mediana promieni wszystkich porów jest znacznie większa w próbkach o mniejszej gęstości

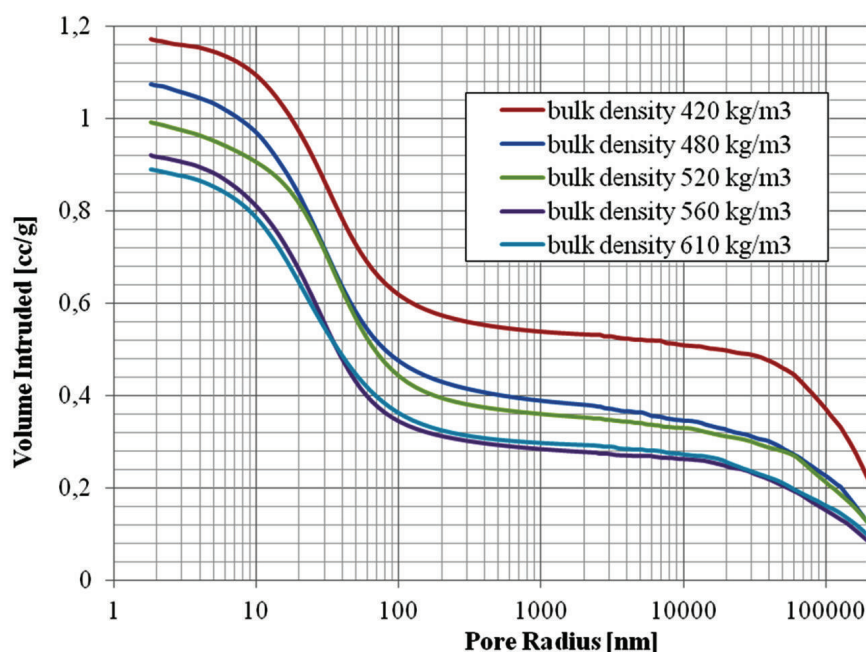


Rys. 3. Wpływ gęstości pozornej ABK na normową nasiąkliwość próbek

Fig. 3. The influence of AAC bulk density on the standard water absorption

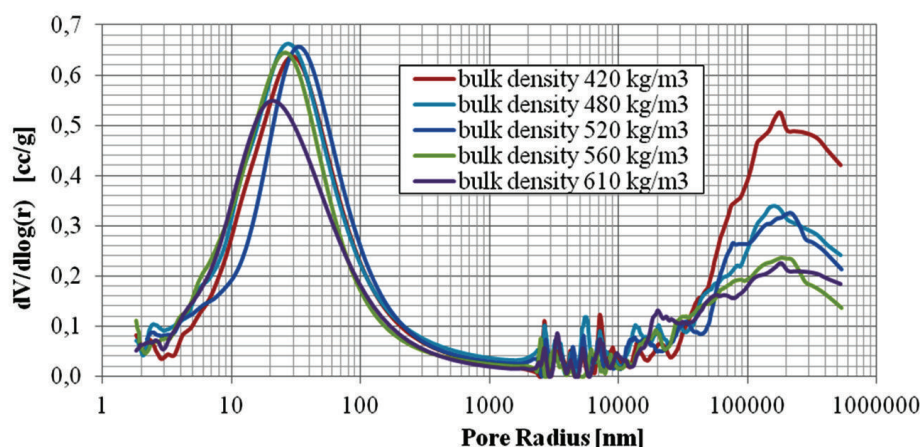
4. Test results

The effect of AAC bulk density on its compressive strength is given in Table 1. Influence of moisture content of AAC on compressive strength is shown in Fig. 1. Moisture increasing content led to significant decreasing of compressive strength.



Rys. 4. Kumulacyjna objętość porów ABK o różnej gęstości pozornej

Fig. 4. The cumulative pores volume of AAC with different bulk density



Rys. 5. Rozkład wielkości porów w ABK o różnej gęstości pozornej

Fig. 5. The pore size distributions of AAC with different bulk density

pozornej, natomiast mediana porów w zakresie od 2 do 5×10^4 nm pozostaje praktycznie stała (rysunek 6).

Otrzymane wyniki potwierdzają, że wzrost sumarycznej porowatości ABK, w przypadku spadku gęstości pozornej, zachodzi głównie w zakresie makroporów, natomiast struktura porów ulega bardzo małym zmianom w zakresie różnych gęstości pozornych. Spadek gęstości pozornej ABK jest spowodowany wzrostem zawartości banieczek gazu, zachodzącej podczas wzrostu objętości masy betonu, który jest równy wzrostowi objętości makroporów.

Wyniki pomiarów potwierdzają dominujący wpływ zawartości wilgoci na fizyczne właściwości ABK, obejmujący także współczynnik przewodności cieplnej.

Nasiąkliwość ABK wiąże się ze strukturą porów. Spadek gęstości pozornej wynikający ze wzrostu objętości porów powoduje zwięk-

The effect of bulk density on the absorption of AAC is shown in Fig. 2 and of the standard water absorption in Fig. 3. From the Fig. 3 the importance of direction of capillary action in relation to the direction of green cake expansion during its maturing, is evident too. The highest capillary action has been observed in the direction perpendicular to the green cake expansion. Both, capillarity and standard water absorption showed similar decreasing tendency with bulk density of AAC increasing.

The results of pore structures investigation are shown in Figs. 4-7. On Fig. 4 the cumulative curves of pore volume of AAC with different bulk density are presented. Fig. 5 shows the pore size distributions of AAC and in Fig. 6 the effect of bulk density on the median pore radius and median macropore radius is depicted. On Fig. 7 the relation between the volumes of pores with radius $> 50 \mu\text{m}$ and pores $\leq 50 \mu\text{m}$, is shown.

The results of measurements of physical properties AAC are shown in Table 2. The dependency of the coefficient of thermal conductivity λ with moisture content is shown in Fig. 8. The dependency of the coefficient of thermal conductivity λ of bulk density is shown in Fig. 9.

5. Discussion

All physical properties of AAC are affected by pore structures, and vary with changes in bulk density of AAC. Increase of bulk density leads to the total pore volume decrease (intruded volume), as it is presented in Fig. 4. The changes of pore volume are mostly concerning the macropores (especially with radius over 50000 nm). Volume of these pores is increasing with bulk density decrease, while the volume of pores $< 50 \cdot 10^3 \mu\text{m}$ was remaining practically constant, as is shown in Fig. 7.

Measured pore size distributions are also correlated with the pores volume. In the range of mesopores (pore diameter from 2 to 50 nm) pore size distribution is very similar, practically the same (Fig. 5) for all type of AAC. However, the content of macropores significantly increases with the decrease of bulk density of AAC. These pore distributions is confirmed also by median pore radius (volume). The median pore radius of all pores is substantially increasing with decrease of bulk density, median of pores in the range from 2 to 50000 nm remains practically constant (Fig. 6).

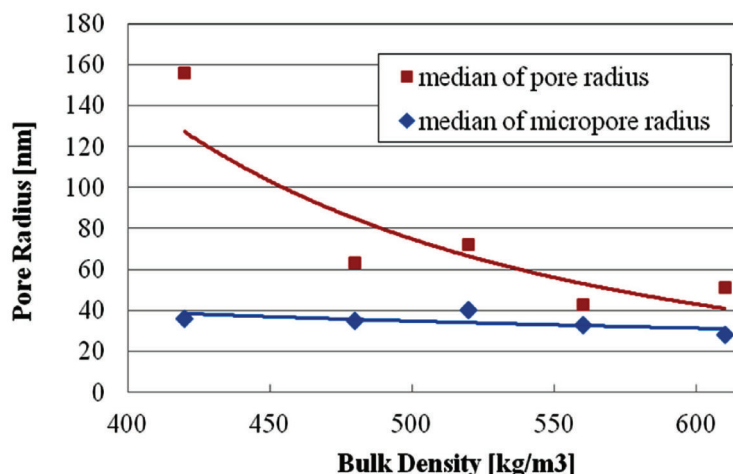
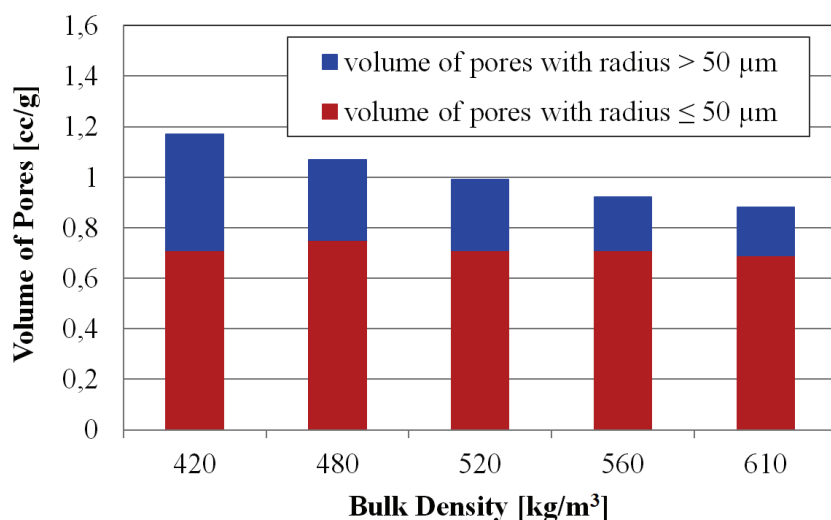


Fig. 6. The effect of bulk density on the median pore radius (included all pores in the range from 3 to 500 000 nm) and on the median macropores radius (pores under 50 000 nm, blue curve)

Rys. 6. Wpływ gęstości pozornej na wartość median średnicy porów (pory w zakresie od 3 do 500 000 nm) oraz mediana promieni makroporów (niebieska krzywa)

szczenie nasiąkliwości. Podobne wyniki otrzymano dla podciągania kapilarnego (rysunek 2). Podciąganie kapilarne jest związane nie tylko z gęstością pozorną lecz także z jego kierunkiem w stosunku do wzrostu objętości masy w trakcie jej dojrzewania. Wzrost podciągania kapilarnego stwierdzono w kierunku prostopadłym do narastania masy, a mniejszy w równoległym. Można to prawdopodobnie wyjaśnić małymi różnicami kształtu porów w różnych kierunkach, co ma wpływ na podciąganie kapilarne.

Wytrzymałość na ściskanie zmalała bardzo znacznie ze wzrostem zawartości wilgoci w ABK. Na przykład suche próbki ABK o gęstości pozornej 520 kg/m³ miały wytrzymałość na ściskanie wynoszącą 4,3 MPa, a gdy wilgotność wzrosła do 10% wytrzymałość spadła do 3,7 MPa, natomiast w przypadku wilgotności 20% do 2,8 MPa.



Rys. 7. Udziały objętościowe porów o średnicy > 50 μm i o średnicy ≤ 50 μm w ABK o różnej gęstości pozornej

Fig. 7. Proportion of pores volume with radius > 50 μm and volume of pores with radius ≤ 50 μm in AAC with different bulk density

Obtained results confirm that increase of the AAC total porosity with decrease of bulk density occurring predominantly in the range of macropores, while pore structures show very low change for different bulk densities. The decrease of AAC bulk density is caused by the increase of gas bubbles content during green cake expansion which is equal to the volume increase of macropores.

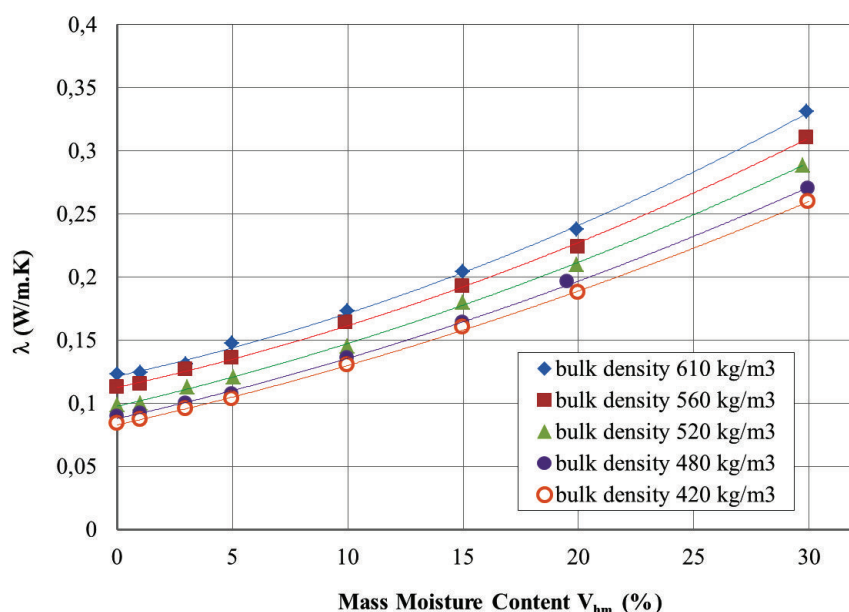
The results of measurements proved the dominant effect of moisture content on the physical properties of AAC, including the thermal conductivity coefficient.

Water absorption of AAC is correlated with pore structures. Decrease of bulk density and consequently increase of pores volume leads to the rise of water absorption. Similar results were obtained in the case of capillarity (Fig. 2). Capillarity was dependent not only on bulk density, but also on the direction of capillary action in relation to the green cake expansion during its maturing. Greater capillarity was found in the direction perpendicular to the green cake expansion than to parallel one. It can be explained by small differences in the shape of pores in different directions, which causes the differences in capillary action.

Compressive strength was significantly decreased with the moisture content increase of AAC. For example, dried AAC with bulk density 520 kg/m³ showed compressive strength of 4.3 MPa, but at 10% moisture content compressive strength was decreasing to 3.7 MPa and at moisture content of 20% to 2.8 MPa.

Varying pore structures and moisture content lead also to the change of thermal properties of AAC. Coefficient of thermal conductivity λ was rising drastically with the moisture content of AAC increase. For example, dry AAC with bulk density of 480 kg/m³ had the coefficient λ approximately of 0.09 W/m.K, but at 5% moisture content λ was increasing to 0.11 W/m.K, at 10% to $\lambda=0.14$ W/m.K, and at 30% moisture content to $\lambda=0.27$ W/m.K. AAC with higher bulk densities showed similar tendency. It is depicted in Fig. 2.

The relation between the coefficient of thermal conductivity λ and moisture content is nonlinear. Quadratic function, which much better correlated with measured values, was proved to be suitable function. However, the curvature of this function is relatively low - close to linear. The equations of correlation are listed in Fig. 8. These results are in agreement with the data of various authors (1, 2, 3, 6, 7) which found linear relation between thermal conductivity and moisture content of AAC. However, the nonlinear relation are also applied (4, 5). Obtained results confirm that this relation is slightly nonlinear and we can consider it to be linear at certain, relatively narrow, interval of moisture content.



Rys. 8. Zależność współczynnika przewodności cieplnej λ od wilgotności V_{hm} próbek ABK o różnej gęstości nasypowej

Fig. 8. The relation of the coefficient of thermal conductivity λ from moisture content V_{hm} of AAC with different bulk densities

Correlation formulae:

Bulk density 610 kg/m³: $\lambda = 0,00010V_{hm}^2 + 0,004V_{hm} + 0,1215$; $R^2 = 0,9990$

Bulk density 560 kg/m³: $\lambda = 0,00009V_{hm}^2 + 0,004V_{hm} + 0,1102$; $R^2 = 0,9964$

Bulk density 520 kg/m³: $\lambda = 0,00007V_{hm}^2 + 0,004V_{hm} + 0,0975$; $R^2 = 0,9990$

Bulk density 480 kg/m³: $\lambda = 0,00007V_{hm}^2 + 0,004V_{hm} + 0,0880$; $R^2 = 0,9995$

Bulk density 420 kg/m³: $\lambda = 0,00006V_{hm}^2 + 0,004V_{hm} + 0,0828$; $R^2 = 0,9996$

Zmienna struktura porowatości i wilgotność powodują także zmiany właściwości cieplnych ABK. Współczynnik przewodności cieplnej λ wzrasta znacznie z wilgotnością próbek ABK. Na przykład sucha próbka ABK o gęstości pozornej 480 kg/m³ ma współczynnik λ wynoszący około 0,09 W/mK, a przy wilgotności 5% λ rośnie do 0,11 W/mK, przy 10% do 0,14 W/mK aby dla 30% wilgotności osiągnąć wielkość 0,27 W/mK. Próbki ABK o większych gęstościach pozornych wykazywały podobną tendencję. Pokazano to na rysunku 8.

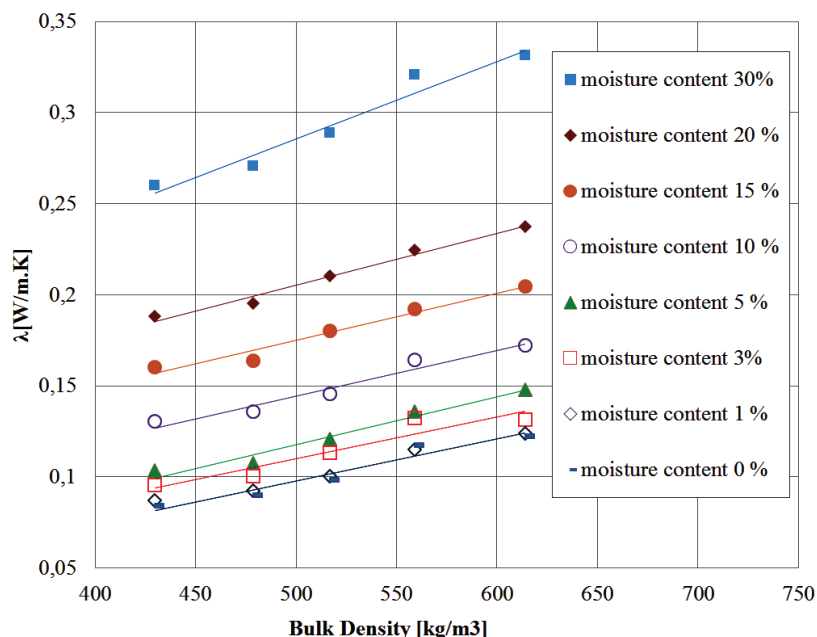
Zależność współczynnika przewodności cieplnej λ od wilgotności próbek jest nieliniowa. Zależność drugiego stopnia, która wykazuje znacznie lepszą korelację z wynikami pomiarowymi jest znacznie lepszą funkcją. Jednak krzywizna tej funkcji jest stosunkowo mała, bliska do zależności liniowej. Równania korelacyjne podano na rysunku 8. Wyniki te są zgodne z danymi innych autorów (1, 2, 3, 6, 7,), którzy znaleźli liniową zależność przewodności cieplnej od wilgotności ABK. Jednak zależność nieliniową podają także inni (4, 5). Wyniki doświadczalne potwierdzają, że ta zależność jest nieliniowa i może mieć liniowy przebieg w pewnym stosunkowo wąskim zakresie zawartości wilgoci.

The influence of bulk density on thermal conductivity of AAC is also significant. The factor of thermal conductivity is remarkably increasing with the bulk density rise. For example, the AAC in dried condition with bulk density of 480 kg/m³ showed $\lambda = 0.09$ W/m·K. The AAC with bulk density of 520 kg/m³ had $\lambda = 0.1$ W/m·K, the λ was equal to 0.11 W/m·K at 560 kg/m³, and at 610 kg/m³ the $\lambda = 0.12$ W/m·K. These differences became greater when moisture content increases.

Moisture content of AAC also is influencing remarkably volume thermal capacity (table 2). As the moisture content increases, the volume thermal capacity is rising too. We can state that the results of volume thermal capacity are correlating well with the data of thermal conductivity coefficient. Both are highly dependent on the degree of pores saturation with water. Since water is much better conductor of heat than air and also has much higher thermal capacity, the thermal properties are increasing with moisture content, as should be expected.

6. Conclusions

The results of experiments show the effect of bulk density and moisture content on the basic physical properties of autoclaved aerated



Rys. 9. Zależność przewodności cieplnej oraz gęstości pozornej ABK (w suchym środowisku) od zawartości wilgoci

Fig. 9. The relationship of the thermal conductivity and bulk density of AAC (in dried state) from different levels of moisture content

Wpływ gęstości pozornej na przewodność cieplna ABK jest także znaczna. Współczynnik przewodności cieplnej wzrasta znacznie ze wzrostem gęstości pozornej próbek. Na przykład w suchych warunkach ABK o gęstości pozornej wynoszącej 480 kg/m^3 ma $\lambda = 0,09 \text{ W/m.K}$. Natomiast ABK o gęstości pozornej 520 kg/m^3 ma $\lambda = 0,1 \text{ W/m.K}$, a wzrasta do $0,11 \text{ W/m.K}$ w przypadku gęstości 560 kg/m^3 , natomiast przy 610 kg/m^3 do $\lambda=0,12 \text{ W/m.K}$. Te różnice są większe w przypadku większej wilgotności próbek.

Zawartość wilgoci ma również duży wpływ na ciepło właściwe ABK (tablica 2). Wzrost zawartości wilgoci powoduje zwiększenie ciepła właściwego. Natomiast ciepło właściwe wykazuje dobrą korelację ze współczynnikiem przewodności cieplnej. Oba zależą w dużym stopniu od stopnia nasycenia porów wodą. W związku z tym, że woda jest znacznie lepszym przewodnikiem niż powietrze i ma także znacznie większe ciepło właściwe, właściwości cieplne wzrastają z zawartością wilgoci, czego należało oczekiwać.

6. Wnioski

Wyniki doświadczalne pokazują wpływ gęstości pozornej i zawartości wilgoci na podstawowe właściwości ABK. Szczególnie niekorzystny jest wpływ wilgotności na wytrzymałość na ścislenie i współczynnik przewodności cieplnej λ .

Uzyskane wyniki pozwalają na ustalenie funkcjonalnych zależności opisujących wpływ zawartości wilgoci w ABK na współczynnik przewodności cieplnej tego betonu.

Przyrząd ISOMET 2104 pozwala na pomiar współczynnika λ , nawet w przypadku znacznej wilgotności próbek ABK. Także tok postępowania w trakcie pomiarów nie jest skomplikowany. Te zalety wskazują na możliwość szerokiego stosowania tej metody pomiarowej w badaniach naukowych oraz w praktyce przemysłowej.

concrete. Significant negative effect of moisture content on the compressive strength and coefficient of thermal conductivity λ was confirmed.

The results enable to establish the functional dependencies between coefficient of thermal conductivity and moisture content of AAC.

ISOMET 2104 apparatus allows to measure the coefficient λ even at high moisture content of the AAC specimens. This ability along with the simplicity of test procedure creates premises for common usage of this device in scientific research and in everyday practice.

Literatura / References

1. M. Scheffler, P. Colombo, Cellular ceramics. Wiley-VCH Weinheim, 2005, pp. 645, ISBN-13: 978-3-527-31320-4.
2. M. A. Lacasse, D. J. Vanier, Durability of Building Materials and Components 8: Service life and durability of materials and components. 8-th International Conference on Durability of Building materials and Components, Vancouver, 1999, pp. 2954, ISBN 0-660-17737-4.
3. Xue Li Jin, Xiang Yu Luo, Qing Lin Meng, Effect of Equilibrium Moisture Contents on Insulating Performance of Autoclaved Aerated Concrete Blocks. Advanced Materials Research. Volume 216, pp. 479-484, March 2011.
4. B. Beťko, P. Tomašovič, Stavebná tepelná technika, Stavebná akustika. Vydavateľstvo STU Bratislava, 1993, pp. 305, ISBN 80-227-0595-0.
5. F. Mrlík, Vlhkostné problémy stavebných materiálov a konštrukcií. Vydavateľstvo Alfa Praha, 1985, pp. 269, ISBN 63-134-85.
6. R. Drochytka, J. Výborný, P. Košťatka, D. Pume, Pórobeton. Vydavateľstvo Vutium, Brno, 1999, pp. 155, ISBN 80-214-1476-6.
7. M. Halahyja, I. Chmúrny, Z. Sternová, Stavebná tepelná technika. Tepelná ochrana budov. Vydavateľstvo Jaga, Bratislava 1998, s. 223, ISBN 80-88905-04-4.
8. L. G. Dapkus, V. Stankevicius, Cellular concrete carbonation, Build. Res. Pract., **13**, 3, pp.184-187 (1985).
9. Určování podmínek pro stanovení trvanlivosti stavebních konstrukcí z pórobetonu Pozemní stavby, **4**, pp.153-154, 1989.
10. A. Georgiades, Ch. Ftikos, J. Marinos, Effect of micropore structure on autoclaved aerated concrete shrinkage, Cement and Concrete Research, **21**, 4, 1991, pp.655-662
11. F. Jacobs, G. Mayer, Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete. In: Wittmann FH, editor. Proceedings Advances in Autoclaved Aerated Concrete. A.A. Balkema, pp.71-76, 1992.
12. H. Kus, T. Carlsson, Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete, Cem. Concr. Res., **33**, 9, pp.1423-1432 (2003).
13. M. Matoušek, R. Drochytka, Fyzikálno-chemické stanovenie atmosférickej korózie pórobetonu, TP24, TSUS Bratislava 1986.
14. G. Schober, Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties, Cement Wapno Beton, Special Issue, pp.39-43 (2011).