

dr inż. Iga Jasińska¹⁾
ORCID: 0000-0003-3990-7497

Thermal conductivity of autoclaved sand-lime products containing glass fibers

Przewodność cieplna autoklawizowanych wyrobów wapienno-piaskowych zawierających włókna szklane

DOI: 10.15199/33.2025.10.22

Abstract. The aim of the study was to determine the effect of the content of zirconia-coated (AR) glass fibers, 24 mm in length, on the thermal conductivity coefficient of autoclaved sand-lime samples (silicates). Additionally, the density was measured and the pore size distribution of the obtained samples was analyzed using the mercury intrusion porosimetry method. The tests were conducted using fibers at mass fractions of 1%, 3%, and 5%. The obtained results allowed for the development of curves describing the influence of zirconia-coated glass fiber content on the λ values, as well as the relationship between density and the λ coefficient in samples modified with zirconia-coated glass fibers. At the same time, the results provided the basis for concluding that increasing the content of zirconia-coated glass fibers in the mass of autoclaved sand-lime samples contributes to a reduction in the thermal conductivity coefficient, while simultaneously increasing the porosity of the tested materials. Their presence in the mass of silicate products caused a general increase in the pore volume within the macropores with a diameter of 40 – 200 μm .

Keywords: sand-lime products; glass fibers with zirconium coating; thermal conductivity; porosimetry, porosity.

Streszczenie. Celem badań było określenie wpływu zawartości włókien szklanych z powłoką cyrkonową (AR) o długości 24 mm na wartość współczynnika przewodzenia ciepła autoklawizowanych wyrobów wapienno-piaskowych (silikatów). Dokonano również oznaczenia gęstości i badania rozkładu wielkości porów otrzymanych próbek za pomocą metody porozymetrii rtęciowej. Badania przeprowadzono z użyciem włókien, których udział masowy wynosił 1, 3 i 5%. Otrzymane wyniki badań pozwoliły na określenie krzywych opisujących wpływ zawartości włókien szklanych z powłoką cyrkonową na wartości λ oraz zależności pomiędzy gęstością a współczynnikiem λ próbek modyfikowanych włóknem szklanym z powłoką cyrkonową. Jednocześnie dały one podstawę do stwierdzenia, że zwiększenie udziału tych włókien w masie autoklawizowanych próbek wapienno-piaskowych sprzyja zmniejszeniu wartości współczynnika przewodzenia ciepła przy jednoczesnym zwiększeniu porowatości badanych wyrobów. Ich udział w masie wyrobów silikatowych spowodował ogólny przyrost objętości porów w obrębie makroporów o średnicy 40 – 200 μm .

Słowa kluczowe: wyroby wapienno-piaskowe; włókna szklane z powłoką cyrkonową; przewodność cieplna; porozymetria; porowatość.

In the face of increasing requirements concerning the energy efficiency of buildings and the necessity to reduce energy consumption for heating and cooling purposes, growing attention is being directed towards building materials with high thermal insulation performance. One of the important directions of development in this area involves the enhancement of widely used construction materials through modifications of their composition and structure. An example of such materials are autoclaved lime – sand products (silicates), which have long been valued for their technological advantages, such as durability, resistance to atmospheric factors, and non-combustibility. Their simple formulation (produced from natural raw materials) and the possibility of utilizing waste and secondary silica-bearing materials may further strengthen their position as an environmentally friendly construction material.

W obliczu zwiększających się wymagań dotyczących efektywności energetycznej budynków oraz konieczności redukcji zużycia energii na cele grzewcze i chłodzące coraz większą uwagę poświęca się materiałom budowlanym o dobrej izolacyjności termicznej. Jednym z istotnych kierunków rozwoju w tym obszarze jest doskonalenie popularnych i powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych przez modyfikację ich składu i struktury. Przykładem takich materiałów mogą być autoklawizowane wyroby wapienno-piaskowe (silikaty), które od lat cieszą się uznaniem ze względu na swoje zalety technologiczne, takie jak trwałość, odporność na działanie czynników atmosferycznych czy niepalność. Prosta receptura (wykonane z naturalnych surowców) oraz możliwość wykorzystania krzemionkowych surowców odpadowych i wtórnych mogą dodatkowo wpłynąć na umocnienie ich pozycji jako materiału przyjaznego środowisku.

W literaturze znane są wyniki badań nad modyfikacją składu wyrobów wapienno-piaskowych surowcami wtórnymi,

¹⁾ Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego; i.jasinska@urad.edu.pl

In the literature, research results are available regarding the modification of the composition of lime–sand products with secondary raw materials, including recycled glass cullet. One example is the use of glass sand as a substitute for quartz sand. Studies conducted by the authors [1, 2] confirmed the beneficial effect of this substitution on the consistency of the lime–silica mixture as well as on the density and compressive strength of the final specimens. Despite many advantages, a significant limitation of silicates remains their relatively high thermal conductivity coefficient. In the context of the trend towards developing materials that enable enhanced energy efficiency of buildings, there is a need to design materials with reduced thermal conductivity while maintaining their existing performance properties.

One promising research direction is the modification of the silicate structure by introducing additives that influence the development of porosity and microstructure, thereby improving the thermal insulation parameters of the material. Song et al. [3] demonstrated that the use of glass fibers in the amount of 1 wt.% in the mortar led to a gradual reduction of thermal conductivity with increasing hydration time and with higher curing temperatures of the specimens. This effect can be attributed to the increase in the volume of capillary and gel pores in the material's structure. Furthermore, the presence of fibers may promote the formation of microchannels within the raw mass, which influences heat transport in the material. The presence of glass fibers also affects the porous structure of the specimens.

Studies conducted by Wang et al. [4] indicate that both fiber length and curing temperature influence the thermal conductivity coefficient. The incorporation of fibers into the cementitious matrix also results in increased porosity of the material; however, excessive porosity may lead to a reduction in mechanical strength [5, 6], which is undesirable in the case of construction materials. Therefore, it becomes crucial to identify an optimal material solution that balances improvements in thermal performance with adequate load-bearing capacity. Research conducted by various authors confirms that it is possible to optimize both the amount and type of glass fibers so as to achieve a balance between thermal insulation and mechanical strength.

The application of glass fibers as an additive to autoclaved lime – sand products thus represents a significant step towards the development of novel building materials that combine durability, functional safety, and enhanced thermal insulation. Nevertheless, further experimental and modeling studies are required to gain a comprehensive understanding of the mechanisms by which fibers affect the microstructure and thermal properties of these materials.

Experiments

The scope of the study encompassed the determination of density, thermal conductivity coefficient (λ), and pore size distribution using mercury intrusion porosimetry for both reference specimens and those modified with glass

w tym pochodzących z recyklingu stłuczki szklanej. Przykładem może być sposób wykorzystania piasku szklanego jako substytutu piasku kwarcowego. Przeprowadzone przez autorów [1, 2] badania potwierdziły korzystny wpływ tej substytucji na konsystencję mieszanki wapienno-krzemionkowej oraz gęstość i wytrzymałość na ścislenie gotowych próbek. Pomimo wielu zalet, istotnym ograniczeniem silikatów pozostaje ich dosyć duży współczynnik przewodzenia ciepła. W kontekście dążenia do tworzenia materiałów pozwalających na zwiększenie efektywności energetycznej budynków, pojawia się potrzeba opracowania materiałów o obniżonej przewodności cieplnej z zachowaniem ich dotychczasowych właściwości użytkowych.

Jednym z obiecujących kierunków badań jest modyfikacja struktury silikatów przez wprowadzenie dodatków, które wpłyną na zwiększenie porowatości materiału, a tym samym poprawią jego parametry termoizolacyjne. Song i in. [3] wykazali, że zastosowanie włókien szklanych w ilości 1% wag. w zaprawie prowadziło do stopniowego zmniejszania przewodności cieplnej w miarę wydłużania czasu hydratacji oraz zwiększenia temperatury dojrzewania próbek. Efekt ten można tłumaczyć wzrostem objętości porów kapilarnych i żelowych w strukturze materiału. Ponadto, obecność włókien może sprzyjać powstawaniu mikrokanalików w masie surowcowej, co wpływa na transport ciepła w materiale. Obecność włókien szklanych wpływa również na strukturę porowatą próbek.

Badania przeprowadzone przez Wang i in. [4] wskazują, że na wartość współczynnika przewodzenia ciepła ma wpływ zarówno długość włókien, jak i temperatura dojrzewania próbek. Obecność włókien w matrycy cementowej powoduje również zwiększenie porowatości materiału, ale nadmierna porowatość może prowadzić do obniżenia jego wytrzymałości mechanicznej [5, 6], co jest niepożądane w przypadku materiałów konstrukcyjnych. Kluczowe staje się zatem znalezienie optymalnego rozwiązania materiałowego pomiędzy poprawą parametrów termicznych a zapewnieniem odpowiedniej nośności. Badania prowadzone przez różnych autorów potwierdzają, że istnieje możliwość zoptymalizowania ilości oraz rodzaju włókien szklanych w taki sposób, aby osiągnąć równowagę pomiędzy izolacyjnością cieplną a wytrzymałością mechaniczną.

Zastosowanie włókien szklanych jako dodatku do autoklawizowanych wyrobów wapienno-piaskowych stanowi więc istotny krok w kierunku tworzenia nowych materiałów budowlanych, łączących trwałość, bezpieczeństwo użytkowe i dobrą izolacyjność cieplną. Dalsze badania eksperymentalne i modelowe są jednak niezbędne do pełnego zrozumienia mechanizmów wpływu włókien na mikrostrukturę i właściwości cieplne materiałów.

Badania

Zakres badań obejmował określenie gęstości, współczynnika przewodzenia ciepła (λ) oraz rozkładu wielkości porów przy użyciu metody porozymetrii rtęciowej zarówno próbek referencyjnych, jak i modyfikowanych włóknami szklanymi. Wyniki te stanowią kontynuację badań przedstawionych w artykule [7].

Materiały i próbki. Probki referencyjne wykonano z mieszanki wapienno-piaskowej, składającej się z piasku (92%)

fibers. These results represent a continuation of the research presented in [7].

Materials and Samples. The reference specimens were prepared from a lime–sand mixture consisting of sand (92%) and hydrated lime (8%). The molar ratio of the initial mass was CaO/SiO_2 (C/S) = 0.09. The sand used in the study consisted of grains with diameters in the range of $0.063 \div 1.0$ mm and was classified as medium sand, with an equivalent diameter d_{50} of 0.31 mm. To prepare the reference samples (WP), the lime–sand mixture was mixed with water in the amount of 6 wt.% relative to the mass of the mixture. The resulting mass was formed into beams, compacted under a pressure of 20 MPa, and subjected to an eight-hour autoclaving process at 203°C.

The properties of the modified specimens were examined using samples containing 1, 3, and 5 wt.% glass fibers, designated as W1, W3, and W5, respectively. The prepared mixtures were shaped into beams with dimensions of $160 \times 130 \times 40$ mm and autoclaved under conditions identical to those of the reference specimens. The study employed alkali-resistant (AR) glass fibers with a zirconium-based coating, characterized by high chemical resistance in alkaline environments due to a high zirconia content (minimum 16%) and the presence of titanium oxide. The fibers had a diameter of $13 - 15 \mu\text{m}$ and a length of 24 mm, with a smooth surface, densely arranged in parallel bundles, and a density in the range of $2500 - 2600 \text{ kg/m}^3$.

Research Methods. Prior to testing, the specimens were conditioned to an air-dry state for 14 days at a temperature of 18°C and a relative humidity of 60 – 65%, in accordance with the requirements of PN-EN 772-1:11 [8]. The thermohygrometric conditions were continuously monitored. **Pore size distribution** was determined using a mercury intrusion porosimeter on prismatic specimens with dimensions of $10 \times 10 \times 20$ mm. For the assessment of pore size distribution, the pore classification introduced by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) was applied, distinguishing three pore size categories:

- micropores with diameters $< 2 \text{ nm}$ ($< 0.002 \mu\text{m}$);
- mesopores with diameters between $2 - 50 \text{ nm}$ ($0.002 - 0.05 \mu\text{m}$);
- macropores with diameters $> 50 \text{ nm}$ ($> 0.05 \mu\text{m}$).

The conducted investigations enabled the analysis of pore sizes ranging from 3 nm to 200 μm . This indicates that the pore size distribution covers the range of mesopores and macropores.

The determination of the **thermal conductivity coefficient** (λ) for both reference specimens and those with modified compositions was performed on samples with dimensions of $160 \times 130 \times 40$ mm, using a heat flow meter apparatus in accordance with ISO 8301 [9]. The apparatus, operating in a single-sample configuration, provides a measurement area of 100×100 mm. The specimen surfaces were ground to ensure the closest possible contact of the tested material with the measurement plate while maintaining parallelism of the face surfaces (160×130 mm). Each measurement was carried out in duplicate.

The density determination of the tested specimens was carried out in accordance with PN-EN 772-13:2001 [10]. Prior to testing, all extraneous material residues resulting from the manufacturing process were removed.

i wapna hydratyzowanego (8%). Stosunek molowy masy wyściowej wynosi CaO/SiO_2 (C/S) = 0,09. Wykorzystany w badaniach piasek składa się z ziaren o średnicy $0,063 \div 1,0$ mm i zaliczany jest do piasków średnich, których średnica zastępcza d_{50} wynosi 0,31 mm. W celu wykonania próbek referencyjnych (WP), mieszankę wapienno-piaskową zarobiono wodą w ilości 6% wag. w stosunku do masy mieszanki. Tak powstałą masę uformowano w beleczki, sprasowano je siłą 20 MPa i poddano ośmiogodzinnej autoklawizacji w temperaturze 203°C.

Właściwości próbek modyfikowanych zbadano na próbkach zawierających 1, 3 i 5% włókien szklanych, które oznaczono kolejno jako W1, W3 i W5. Przygotowaną masę uformowano w beleczki o wymiarach $160 \times 130 \times 40$ mm i poddano procesowi autoklawizacji w warunkach identycznych, jak w przypadku próbek referencyjnych. W badaniach wykorzystano włókna szklane z powłoką cyrkonową (AR), charakteryzujące się dużą odpornością chemiczną w środowisku alkalicznym, dzięki dużej zawartości tlenku cyrkonu (min. 16%) oraz tlenku tytanu. Są to włókna o średnicy od 13 do 15 μm i długości 24 mm, z gładką powierzchnią, gęsto ułożone w równoległe pakiety, których gęstość wynosi $2500 - 2600 \text{ kg/m}^3$.

Metody badań. Przed rozpoczęciem badań próbki były sezonowane do stanu powietrzno-suchego przez 14 dni w temperaturze 18°C i wilgotności względnej 60 – 65%, zgodnie z wymaganiami PN-EN 772-1:11 [8]. Warunki ciepło-wilgotnościowe były stale monitorowane. **Rozkład wielkości porów** określono za pomocą porozymetru rtęciowego na próbkach prostopadłościennych o wymiarach $10 \times 10 \times 20$ mm wyciętych z próbek, na których wykonywano badanie przewodności cieplnej. W ramach badań do oceny rozkładu wielkości porów posłużono się klasyfikacją wielkości porów, wprowadzoną przez Międzynarodową Unię Chemii Czystej i Stosowanej IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), która rozróżnia trzy klasy porów:

- mikropory o średnicy $< 2 \text{ nm}$ ($< 0,002 \mu\text{m}$);
- mezopory o średnicy $2 - 50 \text{ nm}$ ($0,002 - 0,05 \mu\text{m}$);
- makropory o średnicy $> 50 \text{ nm}$ ($> 0,05 \mu\text{m}$).

Przeprowadzone badania pozwoliły na analizę wielkości porów od 3 do 200 μm . Oznacza to, że rozkład wielkości porów obejmuje zakres mezoporów i makroporów.

Określenie wartości **współczynnika przewodzenia ciepła** λ , zarówno próbek o tradycyjnym, jak i modyfikowanym składzie, wykonano na próbkach o wielkości $160 \times 130 \times 40$ mm, wykorzystując aparat płytowy z czujnikami gęstości strumienia cieplnego, zgodnie z ISO 8301 [9]. Jest to aparat o układzie jednopróbkowym, którego pole pomiarowe wynosi 100×100 mm. Powierzchnie próbek wyrównano przez szlifowanie, aby zapewnić jak najbardziej przyległą powierzchnię badanego materiału do płytki pomiarowej z zachowaniem równoległości powierzchni licowych (160×130 mm). Badanie wykonano z dwukrotnym powtórzeniem pomiaru.

Badanie gęstości próbek przeprowadzono zgodnie z PN-EN 772-13:2001 [10]. Przed przystąpieniem do badania usunięto wszelkie zbędne elementy materiału, będące wynikiem procesu wytwarzania.

Analysis of Test Results

The results obtained for specimens modified with zirconium glass fibers revealed an increase in porosity with increasing fiber content, which is associated with the presence of open pores corresponding to mesopores and macropores. Their occurrence is related to the packing of granular fractions and fibers. It can therefore be stated that as the fiber content in the specimens increases, the packing density of the dry mix components decreases. In the tested samples, the largest increase in pore volume was observed for pores with diameters greater than 30 μm (in samples with 1% fiber content) and greater than 50 μm (in the case of sample W5), as indicated by the steep slopes of the obtained pore volume distribution curves as a function of pore diameter (Figure 1). In each specimen, macropores constitute the largest share of the total pore volume. The modification of silicate samples also led to the formation of mesopores, the amount of which decreased with increasing fiber content in the specimen mass. In the analyzed specimens, the average pore diameter (d_{50}) ranged from 2.6 to 34.2 μm .

The porosity of the tested materials increased with fiber content, from 29.75% in sample W1 to 34.05% in sample W5. This increase is primarily associated with the packing characteristics resulting from the fibrous fraction introduced into the mass, consisting of coated quartz grains. The physical parameters of the pore space, providing a quantitative assessment, are presented in Table 1.

In the obtained porosity curves (Figure 1), it can be observed that the presence of fibers causes the greatest increase in pores with diameters larger than 30 μm , as evidenced by the steepest slope of the curves in this size range. The share of pores with diameters smaller than 30 μm increases already at a fiber

Analiza wyników badań

Wyniki otrzymane z próbek modyfikowanych cyrkonowym włóknem szklanym wykazały zwiększenie porowatości wraz z rosnącym udziałem włókien, co związane jest z występowaniem porów otwartych o wielkości odpowiadającej mezoporom oraz makroporom. Ich obecność związana jest z upakowaniem frakcji ziarnistych i włókien. Można zatem stwierdzić, że wraz z zwiększającą się ilością włókien w masie próbek upakowanie składników suchej mieszanki maleje. W badanych próbkach największy przyrost objętości porów stanowią te, których średnica jest większa od 30 μm (w próbkach z udziałem włókien 1%) oraz o średnicy większej od 50 μm (w przypadku próbki W5), na co wskazuje duże nachylenie otrzymanych krzywych rozkładu objętości porów w zależności od ich średnicy (rysunek 1). W każdej z próbek największy udział w objętości mają makropory. Modyfikacja próbek silikatowych przyczyniła się do powstania mezoporów, których ilość zmniejsza się wraz ze wzrostem udziału włókien w masie próbki. W analizowanych próbkach przeciętna średnica porów (d_{50}) wynosi 2,6 ÷ 34,2 μm .

Porowatość badanych materiałów zwiększa się wraz ze wzrostem udziału włókien od 29,75% w próbce W1 do 34,05% w próbce W5. Wzrost ten wiąże się głównie z upakowaniem składników wynikającym z zastosowanych frakcji włóknistej w masie, składającej się z obtoczonych ziaren kwarcu. Fizyczne parametry przestrzeni porowej stanowiące jednocześnie ocenę ilościową, przedstawiono w tabeli 1.

Na otrzymanych wykresach porowatości (rysunek 1) widzimy, że udział włókien powoduje największy przyrost porów o średnicy większej od 30 μm , o czym świadczy największy wzrost nachylenia krzywych w tym zakresie średnic. Udział porów o śred-

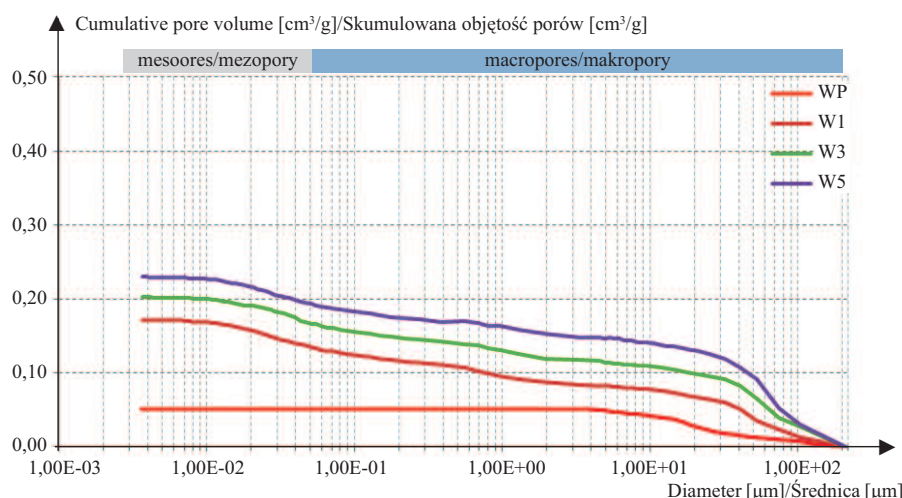


Fig. 1. Cumulative pore volume distribution curve for products modified with zirconia glass fiber

Rys. 1. Krzywa skumulowana rozkładu objętości porów wyrobów modyfikowanych cyrkonowym włóknem szklanym

Table 1. Physical parameters of the pore structure – quantitative assessment

Tabela 1. Parametry fizyczne przestrzeni porowej – ocena ilościowa

Material/ Material	Apparent density ρ_{poz} [kg/m³]/ Gęstość pozorna ρ_{poz} [kg/m³]	Effective porosity P_e [%]/ Porowatość efektywna P_e [%]	Average pore diameter d_{50} [μm]/ Przeciętna średnica porów d_{50} [μm]	Share of [%]/Udział [%]	
				mesopores/mezoporów	macropores/makroporów
WP	1728	8,72	21	0	100
W1	1731	29,75	2,6	21	79
W3	1585	32,22	17,4	18	82
W5	1477	34,05	34,2	16	84

content of 1% (W1 line), whereas a higher fiber content in the material does not result in a significant increase in the number of pores of this size. This is indicated by the nearly parallel course of the curves in Figure 1.

Thermal conductivity tests (Table 2) showed that the average thermal conductivity coefficient (λ) of specimens modified with 1% zirconium-coated glass fibers was nearly 34% lower compared to the reference specimens. A further increase in fiber content in the specimen mass contributed to an increase in λ , which thus varied inversely with bulk density. In samples containing 5% fibers, the thermal conductivity coefficient was approximately 23% lower than that of the reference specimens.

Table 2. Results of thermal conductivity coefficient and sample density tests

Tabela 2. Wyniki badań współczynnika przewodzenia ciepła oraz gęstości próbek

Material/ Material	Thermal conductivity coefficient λ [W/(m·K)]/ Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]	Average thermal conductivity λ [W/(m·K)]/ Średnia wartość współczynnika λ [W/(m·K)]	Bulk density ρ [kg/m³]/ Gęstość objętościowa ρ [kg/m³]
WP	0,527	0,528	1679,1
	0,529		
W1	0,340	0,339	1797,1
	0,337		
W3	0,372	0,370	1649,8
	0,367		
W5	0,409	0,407	1505,3
	0,404		

In conducted tests provided the basis for plotting the curve of the relationship between the thermal conductivity coefficient (λ) and the content of zirconium glass fibers in the mass of the modified specimens. The statistically significant relationship can be described by a linear function according to the following equation:

$$\lambda_w = 0,32 + 0,017 \cdot x_w \pm 0,003$$

where:

λ_w – thermal conductivity coefficient of specimens modified with zirconium-coated glass fibers;

x_w – fiber content (W) in the modified specimen.

This curve represents the relationship within the glass fiber dosage range of 1–5%, excluding the results obtained for the reference specimens. The adopted model explains 99% of the variability in bulk density. Its graphical representation is shown in Figure 2.

A statistically significant relationship was also found between bulk density and the thermal conductivity coefficient (λ) of the specimens modified with zirconium glass fibers (Figure 3), which can be described by a linear function according to the following equation:

$$\lambda_w = 0,76 - 0,0002 \cdot \rho_w \pm 0,003$$

where:

λ_w – thermal conductivity coefficient of the lime-sand product modified with zirconium glass fibers;

ρ_w – bulk density of the lime-sand product modified with glass fibers.

The adopted model explains 99% of the variability in bulk density.

By combining the observed increase in the thermal conductivity coefficient with the relationships obtained from the porosity analysis, it can be assumed that the reduction in

nicy mniejszej od 30 μm zwiększa się już przy udziale włókien 1% (linia W1), natomiast większy udział włókien w masie wyrobów nie powoduje znacznego wzrostu liczby porów o takiej średnicy. Świadczy o tym niemal równoległy przebieg linii na rysunku 1.

Badania przewodności cieplnej (tabela 2) wykazały, że średnia wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ badanych próbek, modyfikowanych włóknem szklanym z powłoką cyrkonową, w ilości 1%, jest mniejsza od wartości λ próbek referencyjnych o ok. 34%. Dalszy wzrost udziału włókien w masie próbki przyczynia się do zwiększenia wartości współczynnika przewodzenia ciepła, a więc rośnie on odwrotnie proporcjonalnie w stosunku do gęstości objętościowej. W próbkach zawierających 5% włókien jest on mniejszy o ok. 23% od próbek referencyjnych.

Przeprowadzone badania dały podstawę do wykreślenia krzywej zależności współczynnika przewodzenia ciepła λ od udziału cyrkonowych włókien szklanych w masie modyfikowanych próbek. Istotną statystycznie zależność opisuje funkcja liniowa wg wzoru:

$$\lambda_w = 0,32 + 0,017 \cdot x_w \pm 0,003$$

gdzie:

λ_w – współczynnik przewodzenia ciepła próbek modyfikowanych włóknem szklanym z powłoką cyrkonową;

x_w – udział włókien (W) w modyfikowanej próbce.

Krzywa ta odwzorowuje zależność w przedziale dozowania włókien szklanych od 1 do 5%, z wyłączeniem wyników uzyskanych z badań na próbkach referencyjnych. Przyjęty model wyjaśnia zmienność gęstości objętościowej w 99%. Jej graficzne odwzorowanie przedstawiono na rysunku 2.

Istotną statystycznie okazała się również zależność gęstości objętościowej od współczynnika przewodności cieplnej λ wyrobów modyfikowanych cyrkonowym włóknem szklanym (rysunek 3), którą opisuje funkcja liniowa wg wzoru:

$$\lambda_w = 0,76 - 0,0002 \cdot \rho_w \pm 0,003$$

gdzie:

λ_w – współczynnik przewodzenia ciepła wyrobu wapienno-piaskowego modyfikowanego cyrkonowym włóknem szklanym;

ρ_w – gęstość objętościowa wyrobu wapienno-piaskowego modyfikowanego włóknem szklanym.

Przyjęty model wyjaśnia zmienność gęstości objętościowej w 99%. Łącząc zwiększenie współczynnika przewodności cieplnej z zależnościami otrzymanymi w przypadku badania porowatości można przypuszczać, że zmniejszenie przewodności cieplnej przy udziale włókien 1% nastąpiło w efekcie pojawienia się

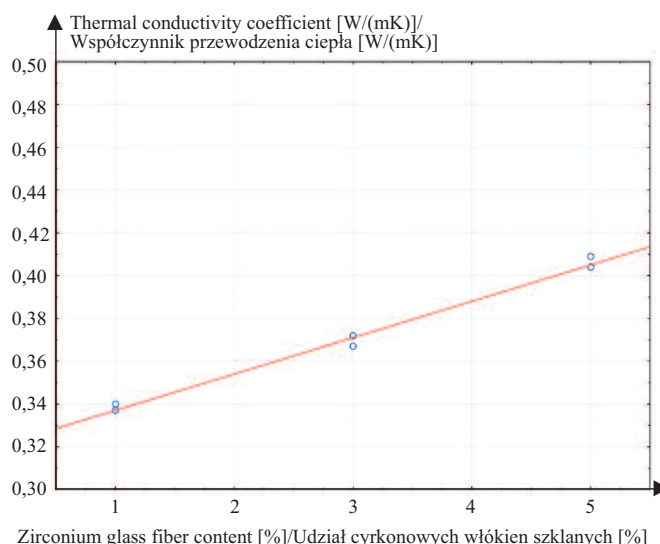


Fig. 2. Influence of zirconia-coated glass fibers content in sample mass on the thermal conductivity

Rys. 2. Wpływ zawartości włókien szklanych z powłoką cyrkonową w masie próbki na przewodność cieplną

thermal conductivity at a fiber content of 1% resulted from the formation of a large number of pores with diameters smaller than 30 μm . The subsequent increase in λ with higher fiber content may be attributed to the growth of macropores larger than 30 μm .

Conclusions

1. The incorporation of glass fibers into the mass of silicate products contributes to reduced packing density of the mixture components, which in turn leads to an increase in the porosity of the final product.

2. Increasing the glass fiber content in autoclaved lime-sand specimens resulted in an overall growth of pore volume within the range of macropores with diameters of 40 – 200 μm .

3. The addition of zirconium-coated glass fibers promotes a reduction in the thermal conductivity coefficient while simultaneously increasing the porosity of the tested specimens, which is beneficial from the perspective of thermal insulation performance.

Received: 09.06.2025

Revised: 04.08.2025

Published: 23.10.2025

Literature

- [1] Stepień A. Recycling in Building Materials: Analysis of the Possibilities and Results of Using Recycled Glass Sand in Autoclaved Materials. *Ener.* 2023; <https://doi.org/10.3390/en16083529>.
- [2] Stepień A, Potrzebszcz-Sut B, Prentice DP, Oey TJ, Balonis M. The Role of Glass Compounds in Autoclaved Bricks. *Buil.* 2020; <https://doi.org/10.3390/buildings10030041>.
- [3] Song P, Peng X, Zheng R, Xia J. Material Properties and Mechanical Performances of Manufactured Factory-Produced Glass Fiber-Reinforced Autoclaved Aerated Concrete Panel. *Build.* 2024; <https://doi.org/10.3390/buildings14092895>.
- [4] Wang W, Wang H, Chang K, Wang S. Effect of High Temperature on the Strength and Thermal Conductivity of Glass Fiber Concrete. *Con and Buil Mat.* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118387>.
- [5] Xu M, Wang A, Liu X. Experimental and Theoretical Investigation into the Thermal Conductivity and Heating-Softening Bending of Glass-Fiber-

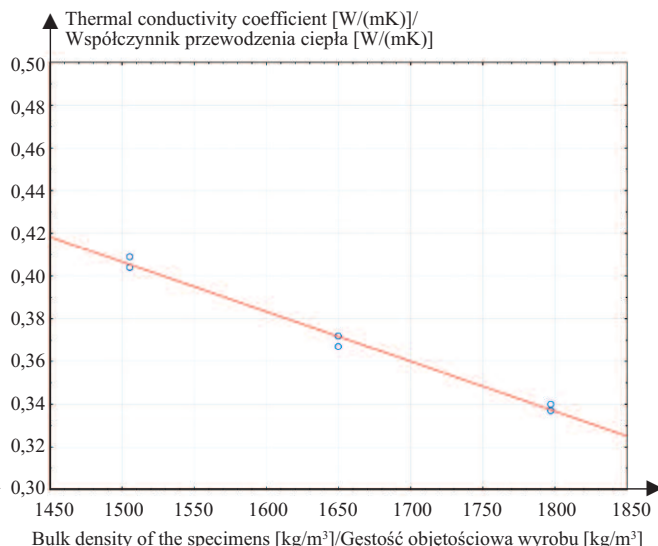


Fig. 3. Relationship between thermal conductivity and bulk density of samples containing zirconia-coated glass fibers

Rys. 3. Zależność przewodności cieplnej od gęstości objętościowej próbek zawierających włókna szklane z powłoką cyrkonową

dużej liczby porów o średnicy mniejszej od 30 μm . Dalsze zwiększenie wartości λ przy zwiększającym się udziale włókien może być spowodowany wzrostem makroporów większych od 30 μm .

Wnioski

1. Udział włókien szklanych w masie wyrobów silikatowych przyczynia się do słabszego upakowania składników mieszanki, co ma wpływ na zwiększenie porowatości wyrobu końcowego.

2. Zwiększający się udział włókien szklanych w masie autoklawizowanych próbek wapienno-piaskowych spowodował ogólny przyrost objętości porów w obrębie makroporów o średnicy 40 – 200 μm .

3. Zawartość włókien szklanych z powłoką cyrkonową sprzyja zmniejszeniu wartości współczynnika przewodzenia ciepła przy jednoczesnym zwiększeniu porowatości badanych próbek, co jest korzystne z punktu widzenia izolacyjności termicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 09.06.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 04.08.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

-Reinforced Polypropylene Rebars. *Poly.* 2025; <https://doi.org/10.3390/polym17050595>.

[6] Dey AM, Tongtha S, Chindaprasit S. Utilization of Solid Waste in the Production of Autoclaved Aerated Concrete: A Review. *Inter Jour of Conc Stru and Mat.* 2022; <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00569-x>.

[7] Jasińska I, Dachowski R, Jaworska-Wędzińska M. Thermal Conductivity of Sand-Lime Products Modified with Foam Glass Granulate. *Mat.* 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14195678>.

[8] PN-EN 772-1 Metody badania elementów murowych – Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie. 2011.

[9] ISO 8301 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus. 1991.

[10] PN-EN 772-13 Metody badania elementów murowych – Część 13: Określenie współczynnika przewodzenia ciepła (λ) w warunkach laboratoryjnych. 2001.