

Wpływ dodatku napowietrzającego na przewodność cieplną zapraw geopolimerowych

Air entrance additive effect on geopolymer mortar thermal conductivity

Maja Kępnia^{1,*}, Piotr Prochoń¹, Wojciech Piątkiewicz¹

¹Faculty of Civil Engineering, Warsaw University of Technology

*Corresponding author: M. Kępnia e-mail: maja.kepnia@pw.edu.pl

Streszczenie

Artykuł dotyczy badań nad zrównoważonymi materiałami budowlanymi - zaprawami aktywowanymi alkaliami o dużej odporności termicznej. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem bezcementowego spoiwa z popiołów lotnych ze spalania węgla, metakaolinitu i zeolitu, aktywowanego alkalicznie [geopolimeru] z zastosowaniem piasku i pyłu perlitowego oraz mikrosfer jako dodatków potencjalnie zwiększających izolacyjność termiczną kompozytów. Celem badań była weryfikacja wpływu tych modyfikatorów na współczynnik przewodności cieplnej, wytrzymałość na ścislenie i mikrostrukturę zapraw bezcementowych. Wyniki pokazały, że najbardziej skutecznym dodatkiem okazał się piasek perlitowy w ilości 30%. Pozostałe badane wypełniacze lekkie nie zmieniły w znaczny sposób przewodności cieplnej badanych zapraw.

Słowa kluczowe: geopolimer, przewodność cieplna, dodatek napowietrzający, zaprawa bezcementowa

Summary

The article deals with research on sustainable building materials - alkali-activated mortars with high temperature resistance. A cement-free alkali-activated binder [geopolymer] based on alkali-activated fly ash from coal combustion using perlite, perlite dust and cenospheres as filler. The object of the analysis was to study the effect of fillers on the coefficient of thermal conductivity, compressive strength and microstructure of the cementless mortars. The results showed that the most effective addition was perlite sand in the amount of 30%. The other tested lightweight fillers did not significantly change the thermal conductivity of the tested mortars

Keywords: geopolymer, thermal conductivity, air-entraining additive, cement-free mortar.

1. Wprowadzenie

Materiały aktywowane alkaliami [AAM] to grupa kompozytów nieorganicznych, o budowie amorficznej, złożonych ze związków wapnia, glinu i krzemu. Analiza i badanie ich właściwości ma swój początek w późnych latach 70-tych (1). Kompozyty z AAM uzyskuje się przez dodanie aktywatora alkalicznego do materiału pucolanowego w odpowiednich warunkach pielęgnacyjnych. Otrzymane tworzywo posiada, poza zbliżonymi właściwościami do kompozytów ze spoiw cementowych, również dużą odporność chemiczną i termiczną. Podstawowe zagadnienia związane ze strukturą geopolimerów, metodami ich otrzymywania oraz opisem możliwych prekursorów geopolimeryzacji wraz z rodzajami aktywatorów przedstawili w swoich publikacjach Davidovits (1, 3, 11) i Provis (24), a w Polsce zespoły badawcze z Akademii Górniczo-Hutniczej i Politechniki Krakowskiej.

1. Introduction

Alkali-activated materials [AAMs] are a group of binders characterized by an amorphous, inorganic structure based on calcium-aluminum-silicon compounds. The analysis and study of their properties began in the late 1970s (1). Composites with AAMs are obtained by adding an alkaline activator to the pozzolanic material under appropriate curing conditions. The resulting material is characterized, in addition to properties similar to those of cementitious composites, by good chemical and thermal resistance. The basic issues related to the structure of geopolymers, methods of obtaining them and a description of possible geopolymerization precursors along with types of activators were presented by Davidovits (1, 3, 11) and Provis (24) and in Poland by research teams from the AGH University of Science and Technology and the Cracow University of Technology.

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań można stwierdzić, że materiały alkalicznie aktywowane z natury wykazują lepszą odporność ogniową w porównaniu do kompozytów z cementu portlandzkiego (2). Davidovits (3) zauważył, że tworzywa geopolimerowe zapewniają doskonałe właściwości ognioodporne do 1200°C ze względu na dwa czynniki:

- Nanoporowatości, która umożliwia fizycznie i chemicznie związanej wodzie migrację i odparowanie w pożarze bez uszkodzenia matrycy geopolimerowej [wytrzymałość resztkowa na ściskanie betonu geopolimerowego 90 MPa wynosiła 20 MPa po 3 godzinach w temperaturze 1100°C].
- Właściwości endotermiczne związanej wody. Płyta o grubości 10 mm wystawiona na działanie płomienia o temperaturze 1000°C osiągnęła temperaturę nienagrzanej powierzchni od 180 do 300°C po 30 minutach ekspozycji, w zależności od rodzaju spoiwa geopolimerowego.

W badaniu przeprowadzonym przez Zhao i in. (4) potwierdzono, że przy tych samych właściwościach mechanicznych kompozyty geopolimerowe wykazywały większą odporność ogniową niż kompozyty z cementu portlandzkiego. Stwierdzono, że geopolimer ma więcej wzajemnie połączonych porów, co pozwala, gdy materiał jest ogrzewany, na szybsze usuwanie pary wodnej z matrycy spoiwa i organiczny wzrost ciśnienia wewnętrznego. Ali i in. (5) stwierdzili, że dla temperatury 1200°C [krzywa węglowodorowa pożaru] geopolimerowe panele z popiołu lotnego zachowały 60% swojej wytrzymałości po wystawieniu na działanie wysokich temperatur bez odprysków.

W literaturze opisano zastosowanie aktywowanych alkaliami spoiw, jako matrycy cementowej (6-8), materiałów odpornych na wysokie temperatury (9-11), materiałów termoizolacyjnych (12-15), betonów do magazynowania energii cieplnej (16) i prekursorów do formowania ceramiki (17). Mają one również zastosowanie w produkcji zaawansowanych technologicznie kompozytów (18, 19) i w medycynie (20). Buchler (10) zilustrował zastosowanie materiałów geopolimerowych w wysokotemperaturowej filtracji powietrza. Liefke (21) zademonstrował przemysłowe zastosowanie spienionych polimerów nieorganicznych do ochrony przeciwpożarowej, pochłaniania dźwięku i izolacji termicznej [TROLIT Foam]. Geopolimery wykazują również potencjał przemysłowy jako spoiwo do produkcji lekkich betonów ognioodpornych lub powłok do ochrony przeciwpożarowej (22-24). Wszystkie przedstawione powyżej przykłady pokazują wysoki potencjał materiałów aktywowanych alkaliami do produkcji kompozytów odpornych na ciepło.

2. Materiały i metody

W ramach badań oceniono wpływ modyfikacji kompozytu geopolimerowego trzema dodatkami potencjalnie zwiększającymi izolacyjność termiczną: pyłem perlitowym, piaskiem perlitowym i mikrosferami. Celem badań była optymalizacja zakresów dozowania poszczególnych składników o krytycznym wpływie na przewodność cieplną. Badania przeprowadzono na zaprawach geopolimerowych o składzie na 1 m³:

Based on the research conducted to date, it can be concluded that geopolymers inherently exhibit better fire resistance compared to Portland cement-based binders (2). Davidovits (3) noted that geopolymer binders provide excellent fire resistance properties up to 1200°C due to two factors:

- Nanoporosity, which allows physically and chemically bound water to migrate and evaporate in a fire without damaging the geopolymer matrix [the residual compressive strength of a 90 MPa geopolymer cement was 20 MPa after 3 hours at 1100°C].
- Endothermic properties of bound water. A 10-mm-thick panel exposed to a 1000 °C flame reached a non-heated surface temperature of 180 to 300 °C after 30 minutes of exposure, depending on the type of geopolymer binder].

In a study by Zhao et al. (4), it was confirmed that for the same mechanical properties, geopolymer composites showed better fire resistance than those with Portland cement. It was found that the geopolymer has more interconnected pores, which allows, when the material is heated, a faster extraction of water vapor from the binder matrix and an organic increase in internal pressure. For a temperature of 1200 °C [the fire hydrocarbon curve], Ali et al. (5) found that the geopolymer fly ash panels retained 60% of their strength after exposure to high temperatures without spalling.

The literature reports the use of alkali-activated binders as cement matrix (6-8), high temperature resistant materials (9-11), thermal insulation materials (12-15), concretes for thermal energy storage (16) and precursors for ceramic molding (17). They also have applications in the production of high-tech composites (18, 19) and in medicine (20). Buchler (10) illustrated the use of geopolymer materials in the field of high temperature air filtration. Liefke (21) demonstrated the industrial use of foamed inorganic polymers for fire protection, sound absorption and thermal insulation [TROLIT Foam]. Geopolymers also show industrial potential as a binder for the production of lightweight fire-resistant concretes or coatings for fire protection (22-24). All of the examples presented above demonstrate the high potential of alkali-activated materials for the production of heat-resistant composites.

2. Materials and methods

The influence of modification of the geopolymer composite was subjected to the study with three additives potentially increasing thermal insulation: perlite powder, perlite sand and cenospheres. The aim of the experiment was to optimize the dosing ranges of individual components with a critical impact on thermal conductivity. The tests were carried out on geopolymer mortars with a composition per 1 m³:

- 500 kg of precursors mix [metakaolin - 50 kg, zeolite - 50 kg and fly ash - 400 kg],
- 110 kg of calcium compound,
- 15 kg of admixtures influencing rheology,

- 500 kg spoiwa [metakaolin – 50 kg, zeolit – 50 kg i popiół lotny – 400 kg],
 - 110 kg dodatku o dużej zawartości wapnia,
 - 15 kg domieszek wpływających na reologię,
 - 315 kg aktywatorów alkalicznych [roztwór wodny wodorotlenku sodu – 30% 275 kg, szkło wodne – 40 kg],
 - piasek naturalny, pył perlitowy, piasek perlitowy i mikrosfery zgodnie z planem eksperymentu.
- 315 kg of alkaline activators [sodium hydroxide – 30% aqueous solution – 275 kg, water glass – 40 kg],
 - natural sand, perlite powder, perlite sand and cenospheres according to the experimental plan.

Skład chemiczny popiołu lotnego, perlitu i mikrosfer przedstawiono w tablicy 1.

Do analizy czynnikowej wybrano trzy zmienne składu: udział piasku perlitowego w kg na m³ kompozytu, udział pyłu perlitowego w kg na m³ kompozytu, udział mikrosfer w kg na m³ kompozytu. Każda ze zmiennych była badana na jednym z trzech poziomów: dolnym, środkowym i górnym, jak pokazano w tablicy 2.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY PREKURSORÓW GEOPOLIMERYZACJI ORAZ DODATKÓW MODYFIKUJĄCYCH KOMPOZYT

CHEMICAL COMPOUND OF GEOPOLYMERIZATION PRECURSOR AND MODIFYING COMPOSITE ADDITIVES

Skład chemiczny Chemical compound perlit / perlite		Materiał / Materials		
		popiół lotny fly ash	mikrosfery cenospheres	
Straty prażenia LOI	[%]	2.35	5.39	0.92
SiO ₂	[%]	73.37	51.63	59.50
Al ₂ O ₃	[%]	13.17	24.60	33.89
Fe ₂ O ₃	[%]	2.05	6.44	1.98
TiO ₂	[%]	0.17	1.04	1.04
MnO	[%]	0.05	0.09	0.05
CaO	[%]	1.14	3.51	1.10
MgO	[%]	0.29	2.88	0.39
Na ₂ O	[%]	2.27	1.18	0.42
K ₂ O	[%]	5,56	2.92	0.63
P ₂ O ₅	[%]	0.04	0.33	0.50
Cr ₂ O ₃	[%]	0.01	0.03	0.01
ZrO ₂	[%]	0.01	0.02	0.03a

Doświadczenie przeprowadzono z wykorzystaniem ułamkowego planu czynnikowego dla trzech zmiennych, którym przypisano trzy poziomy wartości. Aby oszacować błąd wynikający z metody badawczej, macierz doświadczenia została wzbogacona o trzy procesy ze zmiennymi ustawionymi na poziomie centralnym. Zawartość naturalnego piasku określano każdorazowo w celu wypełnienia 1 m³ kompozytu. Pełny plan doświadczenia, zmienne składu wraz z wynikami pomiarów zestawiono w tablicy 3.

W tym badaniu niepożądaną cechą kompozytu wskazującą na krytyczną interakcję zmiennych

The chemical composition of fly ash, perlite and cenospheres is shown in Table 1.

For the factor analysis, three composition parameters were selected: the proportion of perlite sand in kg per m³ of composite, the proportion of perlite powder in kg per m³ of composite, the proportion of cenospheres in kg per m³ of composite. Each of the variables was studied at one of three levels: lower, middle and upper [Table 2].

The experiment was carried out using a randomized fractional factorial plan for three variables, which were assigned three levels of value. To estimate the error resulting from the study procedure, the experiment matrix was enriched with three processes with variables set at central levels. The natural sand content was determined each time to fill 1 m³ of the composite. The full experimental plan, composition variables, together with the measurement results are summarized in Table 3.

In this study, the undesirable feature of the composite indicating the critical interaction of dependent variables was thermal conductivity higher than 0.7 W/(m·K). The test was performed on slab-shaped specimens about 40 mm thick and measuring 300 mm by 300 mm. With FOX 314 plate apparatus, the thermal conductivity measurements were conducted in a stabilized state using the “hot plate” method. Upper and lower plates had a temperature difference of 20 K, while the sample temperature was 10°C. Thermal Field Emission Scanning Electron Microscope [FE-SEM Zeiss EVO-40] was used for morphology analysis of the mortar samples. The specimens were coated in vacuum conditions with a thin gold film. The images were taken at varying magnifications under high vacuum and accelerating voltage of 5 kV.

3. Results and discussion

For none of the experimental compositions was there a failure to achieve the critical value of thermal conductivity. A significance analysis of the independent variables was carried out for the results obtained. Pareto analysis was chosen [Fig. 1]. The results of the

Tablica 2 / Table 2

ANALIZOWANE CZYNNIKI ORAZ WARTOŚCI POZIOMÓW ANALIZY

TEST FACTORS AND ASSIGNED VALUE LEVELS

Poziom zmiennej Factor level	Zmienne / Factor		
	Piasek perlitowy Perlite sand [PS], kg	Pył perlitowy Perlite powder [PP], kg	Mikrosfery Cenospheres [C], kg
Górny / Upper	30	50	50
Środkowy / Middle	15	25	25
Dolny / Lower	0	0	0

ZMIENNE SKŁADU KOMPOZYTU W PLANIE EKSPERYMENTU WRAZ Z WYNIKAMI BADAŃ

VARIABLE PARAMETERS OF COMPOSITE COMPOSITION IN THE EXPERIMENT PLAN AND THE EXPERIMENT RESPONSE

	Składniki / Components				Wyniki / Experiment response	
	Piasek naturalny Natural sand, kg	Mikrosfery Cenospheres, kg	Proszek perlitowy Perlite powder, kg	Pył perlitowy Perlite sand, kg	Przewodność cieplna Thermal conductivity, W/(mK)	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa
1	1100	0	0	0	0.684±0.071	6.4±0.2
2	400	0	25	30	0.347±0.004	5.1±0,3
3	443	0	50	15	0.439±0.014	6.0±0.5
4	515	25	0	30	0.408±0.001	5.2±0.7
5	560	25	25	15	0.558±0.009	6.5±0.2
6	601	25	50	0	0.467±0.001	7.7±0.7
7	670	50	0	15	0.380±0.002	6.5±0.6
8	715	50	25	0	0.466±0.005	6.6±0.3
9	17	50	50	30	0.343±0.010	5.3±0.2
C1	560	25	25	15	0.507±0.034	7.0±0.2
C2	560	25	25	15	0.478±0.001	5.3±0.5
C3	560	25	25	15	0.436±0.030	4.2±0.1

zależnych była przewodność cieplna powyżej 0,7 W(m·K). Badanie przeprowadzono na próbkach w kształcie płyty o grubości około 40 mm i wymiarach 300 mm na 300 mm. Pomiaru przewodności cieplnej przeprowadzono za pomocą aparatu płytowego FOX 314 w stanie ustabilizowanym przy użyciu metody „gorącej płyty”. Górna i dolna płyta miały różnicę temperatur 20 K, podczas gdy temperatura próbki wynosiła 10°C. Skaningowy mikroskop elektronowy z emisją termiczną [FE-SEM Zeiss EVO-40] został wykorzystany do analizy mikrostruktury próbek zaprawy. Próbki zostały pokryte cienką warstwą złota. Zdjęcia wykonano przy różnych

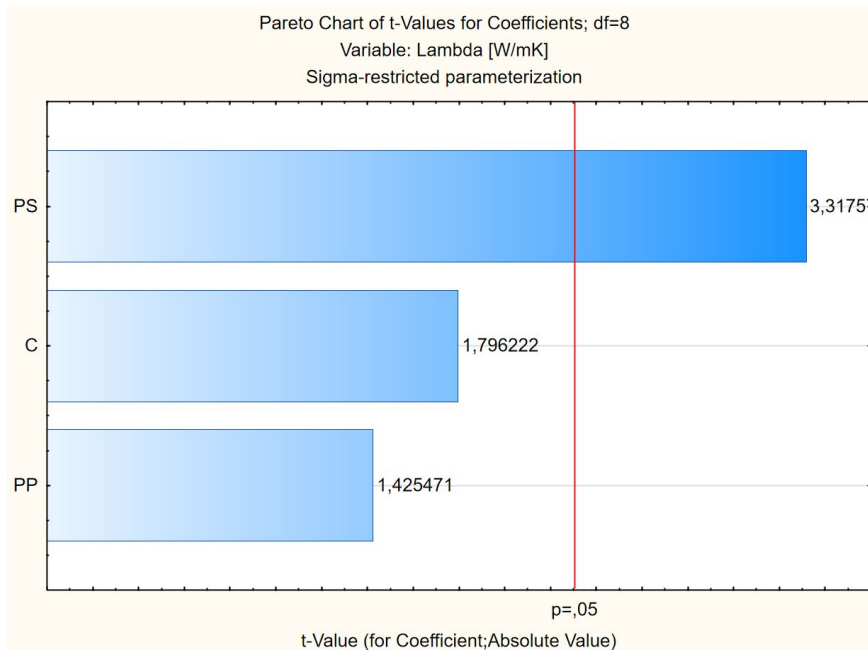
analizy wskazując, że modyfikacja z perlitowym piaskiem [PS] jest statystycznie istotna dla przewodności cieplnej kompozytu.

As the perlite sand content increases, the thermal conductivity of the composite decreases significantly, which is related to the high porosity of the additive. The effect of cenospheres and perlite powder content on the thermal conductivity is not significant [Fig. 2].

Also, for none of the experimental compositions was there a failure to achieve the critical value of compressive strength. A significance analysis of the independent variables was carried out for the results obtained.

The Pareto analysis was chosen [Fig. 3]. The results of the analysis indicate that modification with perlite powder [PP], perlite sand [PS], and cenospheres are statistically important for the thermal conductivity of the composite.

As the perlite sand content increases, the compressive strength of the composite decreases significantly. With increasing cenosphere content, the compressive strength increases slightly [Fig. 4]. The effect of perlite powder dosage is negligible - within the limits of the standard deviation of the measurement results. The research did not observe a simple relationship between compressive strength and thermal conductivity coefficient. The results suggest that the properties of the materials used, such as cenospheres and perlite powder, have a significant influence on both parameters [Fig. 5]. Therefore, further studies are needed to explore the optimal composition and dosage of these materials for achieving the desired performance of composite.



Rys. 1. Analiza Pareto dla przewodności cieplnej

Fig. 1. Pareto analysis of thermal conductivity

powiększeniach w warunkach wysokiej próżni i napięcia przyspieszającego 5 kV.

3. Wnioski i dyskusja

Dla żadnego ze składów nie osiągnięto krytycznej wartości przewodności cieplnej. Dla uzyskanych wyników przeprowadzono analizę istotności zmiennych niezależnych stosując analizę Pareto [rys. 1]. Wyniki analizy wskazują, że jedynie modyfikacja piaskiem perlitowym [PS] jest statystycznie istotna dla przewodności cieplnej kompozytu.

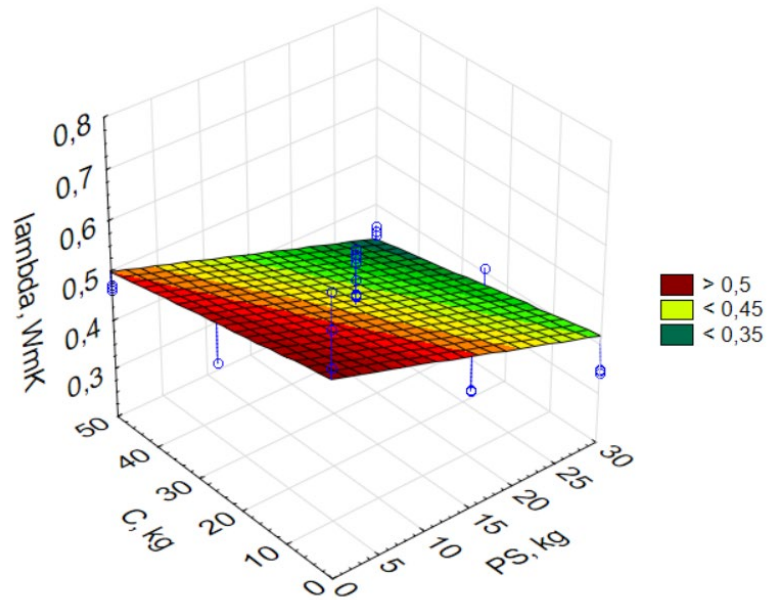
Wraz ze wzrostem zawartości piasku perlitowego przewodność cieplna kompozytu znacznie spada. Jest to związane z dużą porowatością dodatku. Wpływ zawartości mikrosfer i pyłu perlitowego na przewodność cieplną nie jest znacząca statystycznie [rys. 2].

Również dla żadnego ze składów nie osiągnięto krytycznej wartości wytrzymałości na ściskanie. Podobnie jak dla współczynnika przewodności cieplnej dla uzyskanych wyników wytrzymałości na ściskanie wykonano analizę istotności zmiennych niezależnych stosując analizę Pareto [rys. 3]. Wyniki analizy wskazują, że modyfikacja pyłem perlitowym [PP], piaskiem perlitowym [PS] i cenosferami jest statystycznie istotna dla wytrzymałości na ściskanie kompozytu.

Wraz ze wzrostem zawartości piasku perlitowego wytrzymałość na ściskanie kompozytu znacznie spada. Przeciwnie zmiany obserwuje się wraz ze wzrostem zawartości mikrosfer – nieznaczny wzrost wytrzymałość na ściskanie [rys. 4]. Wpływ dozowania pyłu perlitowego jest pomijalny - w granicach odchylenia standardowego wyników pomiarów. W badaniach nie zaobserwowano prostej zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a współczynnikiem przewodności cieplnej.

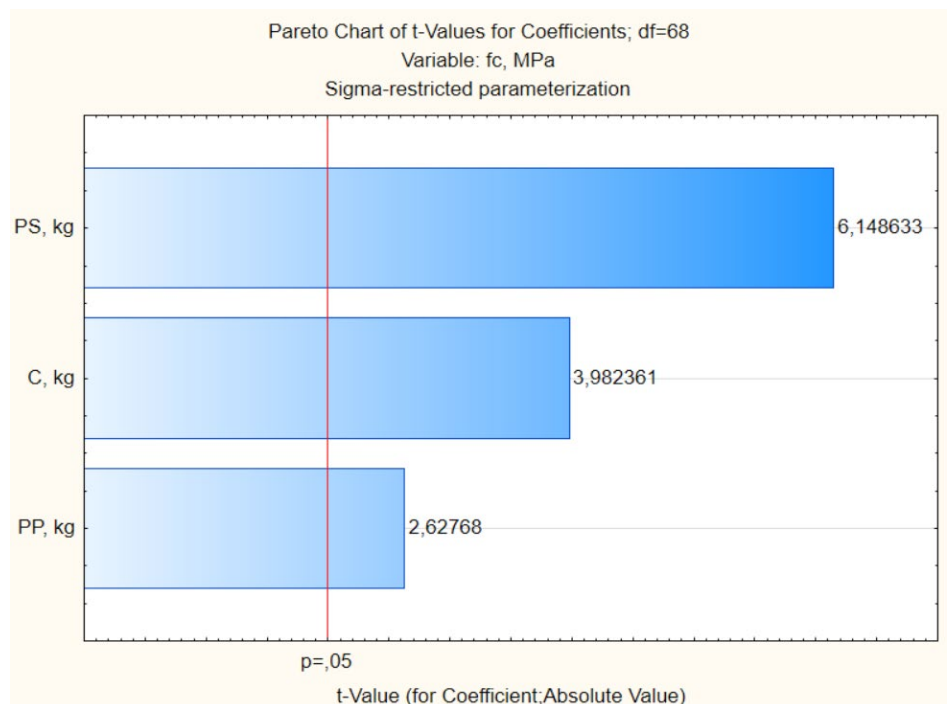
Wyniki sugerują, że właściwości zastosowanych materiałów, takich jak mikrosfery i proszek perlitowy, mają znaczący wpływ na obie właściwości [rys. 5]. Dlatego potrzebne są dalsze badania w celu określenia optymalnego składu i dozowania tych materiałów w celu osiągnięcia pożądanych właściwości kompozytu.

Zaprawy geopolimerowe o najniższej przewodności cieplnej [zaprawa nr 2 i 9] oraz zaprawa referencyjna nr 1 zostały wybrane



Rys. 2. Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od zawartości piasku perlitowego oraz mikrosfer

Fig. 2. Thermal conductivity depending on perlite sand and cenospheres content



Rys. 3. Analiza Pareto dla wytrzymałości na ściskanie

Fig. 3. Pareto analysis of compressive strength

Geopolymer mortars with the lowest thermal conductivity [mortar no. 2 and 9] and reference mortar no. 1 were selected for SEM analysis [Fig. 5]. Compared to other mortars reference composition [mortar no. 1] formed a more visually homogenous gel microstructure with a denser, less porous matrix and less visible interfacial transition zone between the gel phase and aggregate. Still mortar no. 2 had a mostly uniform microstructure with easily observed per-

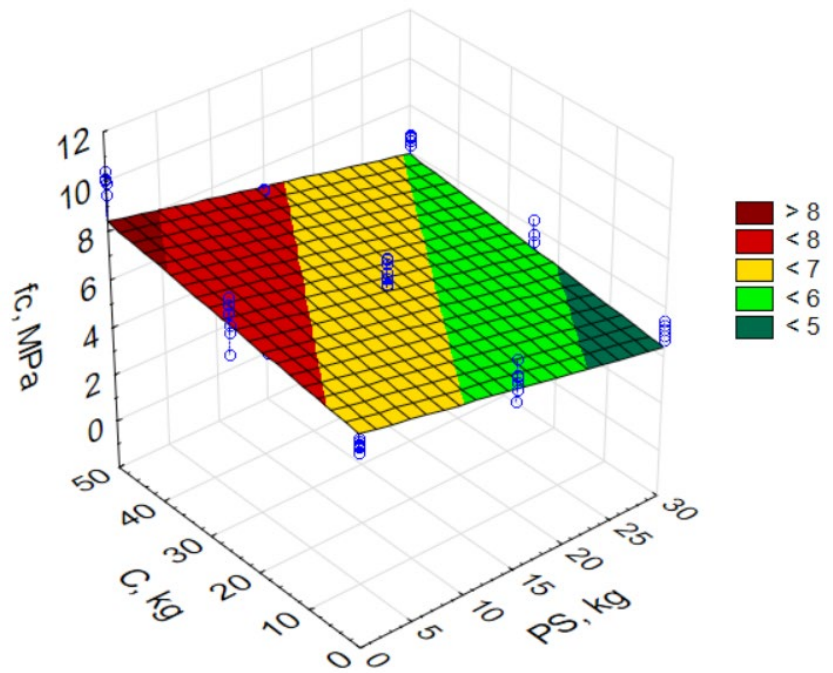
do analizy mikrostruktury metodą skaningowej mikroskopii optycznej [rys. 5]. W porównaniu z innymi zaprawami skład referencyjny [zaprawa nr 1] posiadał bardziej jednorodną wizualnie mikrostrukturę żelową z gęstszą, mniej porowatą matrycą i mniej widoczną międzyfazową strefą przejściową między fazą żelową a kruszywem. Zaprawa nr 2 miała w większości jednolitą mikrostrukturę z łatwo obserwowalnymi cząstkami piasku perlitowego, podczas gdy mikrostruktura zaprawy nr 9 była porowata i posiadała dużo pustych przestrzeni między ziarnami mikrosfer, piasku perlitowego i proszku perlitowego. Bardziej porowatą mikrostrukturę zanotowano w analizowanych zaprawach wraz ze wzrostem dodatków napowietrzających w miejsce naturalnego piasku. Wpływa to na inne właściwości mechaniczne materiału, jak wspomniano przez Yanga i in. (25). Poprzez analizę obrazów SEM i wyników przewodności cieplnej optymalny poziom piasku perlitowego ustalono na 30 kg/m³.

4. Wnioski

Przedstawione badania wskazują, że możliwa jest modyfikacja kompozytu geopolimerowego za pomocą składników zwiększających jego izolacyjność termiczną. Największy wpływ na przewodzenie ciepła miała modyfikacja kompozytu piaskiem perlitowym. W badanych zaprawach stwierdzono zwiększenie porowatości struktury wraz ze zwiększeniem ilości dodatków napowietrzających zastępujących naturalny piasek. Korelacja ta może negatywnie wpływać na inne właściwości mechaniczne analizowanej zaprawy geopolimerowej. Dzięki analizie statystycznej i zdjęciom SEM udało się ustalić optymalny poziom piasku perlitowego w składzie zaprawy geopolimerowej na 30 kg/m³. Poziom optymalnej zawartości mikrosfer i proszku perlitowego w zaprawach geopolimerowych wymaga dalszych badań z uwzględnieniem zmian wytrzymałości zapraw na ściskanie i zginanie.

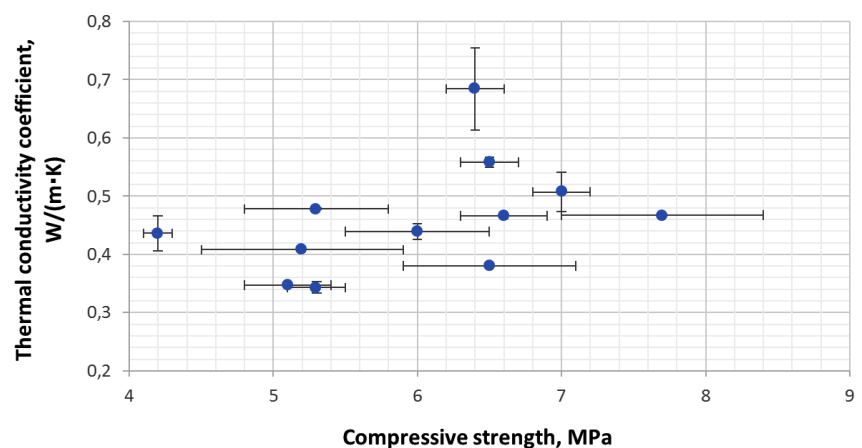
Podziękowania

Autorzy pragną wyrazić wdzięczność za wsparcie finansowe projektu przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Lider nr LIDER/49/0187/L-11/19/NCBR/2020 „Zrównoważone materiały – zaprawy aktywowane alkalicznie – do szczególnych zastosowań osłonowych w budownictwie”.



Rys. 4. Zależność wytrzymałości na ściskanie od zawartości piasku perlitowego oraz mikrosfer

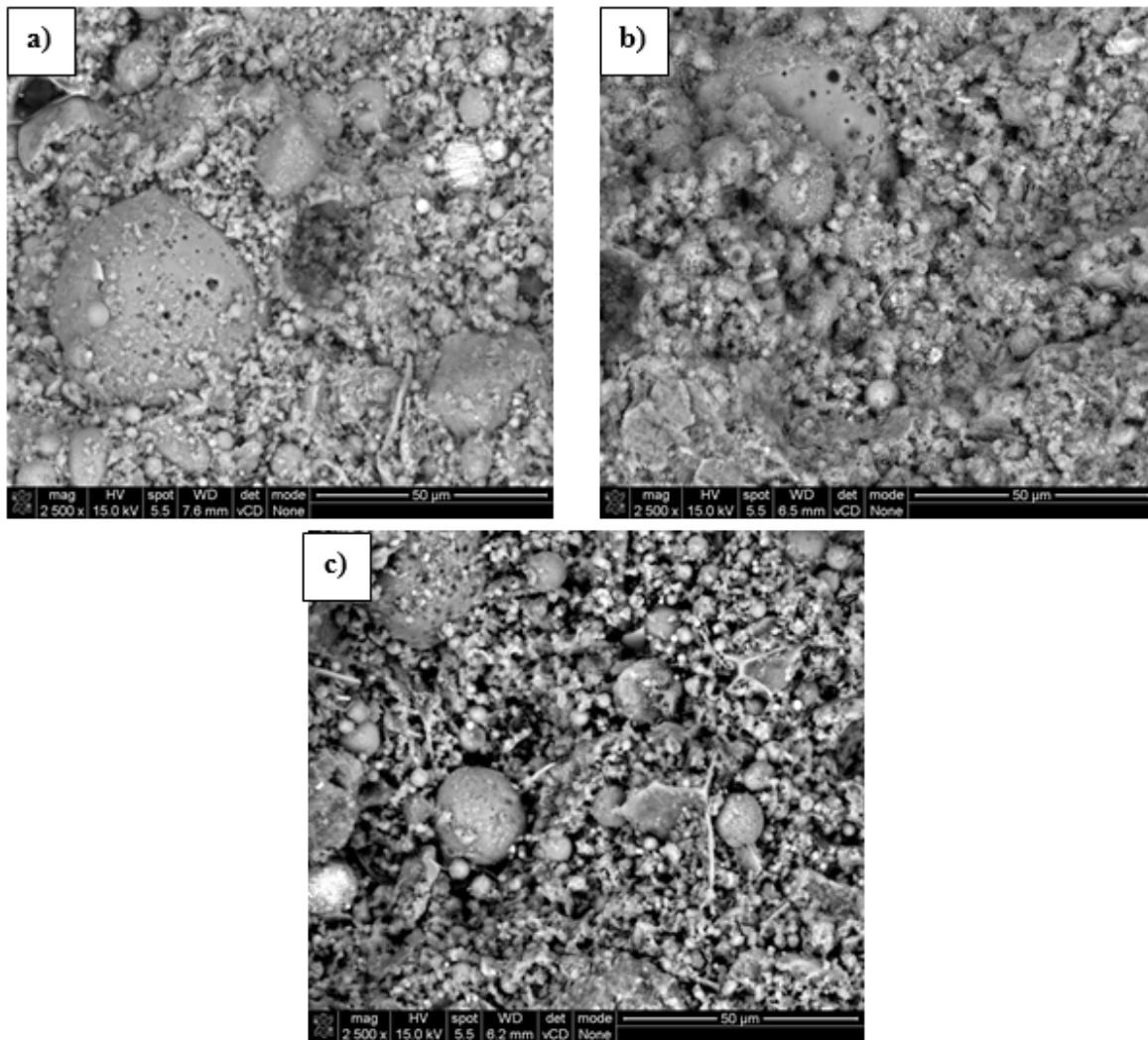
Fig. 4. Compressive strength depending on perlite sand and cenospheres content



Rys. 5. Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie, a współczynnikiem przewodzenia ciepła

Fig. 5. The relationship between compressive strength and thermal conductivity coefficient

lite sand particles whereas the microstructure of mortar no. 9 were porous and abundant in voids between particles of cenospheres, perlite sand and perlite powder. The more porous microstructure is observed in analysed mortars with the increase of air entrance additives in place of natural sand. This affects other mechanical properties of the material as mentioned by Yang et al. (25). Through the analysis of SEM images and results of thermal conductivity the optimal level of perlite sand was established on 30 kg/m³.



Rys. 6. Obrazy SEM zapraw geopolimerowych ze składem: a) nr 1, b) nr 2 i c) nr 9

Fig. 6. SEM pictures of geopolymer mortars with the composition: a) no. 1 b) no. 2 c) no. 9

Literatura / References

1. Davidovits J.: Geopolymer Chemistry and Applications, Geopolymer Institute, 2020, p. 698;
2. M. Lahoti, K.H. Tan, E.H. Yang, A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. *Constr. Build. Mater.* **221** 514–526 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.076>
3. Davidovits J.: Fire proof geopolymeric cements Proceedings of Second International Conference Geopolymere, 1999, p. 165-169;
4. R. Zhao, J.G. Sanjayan, Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Mag. Concr. Res.* **63** (3), 163-173 (2011). <https://doi.org/10.1680/macrc.9.00110>
5. A.Z. Mohd Ali, J. Sanjayan, M. Guerrieri, Performance of geopolymer high strength concrete wall panels and cylinders when exposed to a hydrocarbon fire. *Constr. Build. Mater.* **137** 195–207 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.099>
6. D.M.A. Huiskes, A. Keulen, Q.L. Yu, H.J.H. Brouwers, Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete. *Mater. Des.* **89** 516–526 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.167>.
7. J.T. Gourley, G.B. Johnson, Developments in geopolymer precast concrete. J. Davidovits (ed.), *World Congress Geopolymer*, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 2005, p. 139-143.

4. Conclusions

The research presented here indicates that it is possible to modify a geopolymer composite with components that increase its thermal insulation. Modification of the composite with perlite sand had the greatest effect on heat conduction. The increase of air entrance additives in place of natural sand in examined mortars caused more porous microstructure. This negatively affect mechanical properties of the analysed geopolymer mortar. Thanks to statistical analysis and SEM images it was possible to establish the optimal level of perlite sand in the geopolymer mortar composition on 30 kg/m³. The level of cenospheres and perlite powder in geopolymer mortars need to be further examined and established in relation to changes of compressive and flexural strength of mortars.

Acknowledgments

The authors would like to express their appreciation for the support of the sponsors the National Center for Research and Development Project Lider No LIDER/49/0187/L-11/19/NCBR/2020 “Sustainable materials – alkali-activated mortars - for specific shielding performance in civil engineering”.

8. Z. Pan, J.G. Sanjayan, B. V. Rangan, An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *J. Mater. Sci.* **44** 1873–1880 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3243-z>
9. V.F.F. Barbosa, K.J.D. MacKenzie, Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Mater. Res. Bull.* **38** 319–331 (2003). [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(02\)01022-X](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(02)01022-X)
10. C. Büchler, Fire safety in industrial buildings and nuclear power plants with air-filters made of geopolymer composite Second International Conference Geopolymer, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 1999, p. 181-188;
11. J. Davidovits, Geopolymers, *J. Therm. Anal.* **37** (8), 1991, p. 1633-1656;
12. B. Liguori, I. Capasso, V. Romeo et al., Hybrid geopolymeric foams with diatomite addition: effect on chemico-physical properties. *J. Cell. Plast.* **53**(5) 525-536 (2017).
13. R.M. Novais, L.H. Buruberry, G. Ascensao et al., Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity. *J. Cleaner Prod.* **119**, 99-107 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.083>
14. W.D.A. Rickard, L. Vickers, A. van Riessen, Performance of fibre reinforced, low density metakaolin geopolymers under simulated fire conditions. *Appl. Clay Sci.* **73**, 71–77 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.10.006>.
15. J. Temuujin, W. Rickard, M. Lee, A. Van Riessen, Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings. *J. Non. Cryst. Solids.* **357**, 1399–1404 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.09.063>.
16. F. Colangelo, R. Cioffi, G. Roviello, I. Capasso, D. Caputo, P. Aprea, B. Liguori, C. Ferone, Thermal cycling stability of fly ash based geopolymer mortars. *Compos. B* **129**, 11–17 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.029>.
17. J.L. Bell, P.E. Driemeyer, W.M. Kriven, Formation of Ceramics from Metakaolin-Based Geopolymers: Part I—Cs-Based Geopolymer. *J. Am. Cer. Soc.* **92**, 1-8 (2009). <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02790.x>
18. D. Ribero, W.M. Kriven, Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Basalt Chopped Strand Mat or Woven Fabric. *J. Am. Cer. Soc.* **99**(4), 1192-1199 (2016). <https://doi.org/10.1111/jace.14079>
19. J. Giancaspro, P.N. Balaguru, R.E. Lyon R. Lopez-Anido, Use of Inorganic Polymer to Improve the Fire Response of Balsa Sandwich Structures. *J. Mater. Civ. Eng.* **18**(3), 390-397 (2006). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:3\(390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:3(390))
20. E. Jämstorp, J. Forsgren, S. Bredenberg et al., Mechanically strong geopolymers offer new possibilities in treatment of chronic pain. *J. Controlled Release*, **146**(3), 370-377 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2010.05.029>
21. E. Liefke, Industrial applications of foamed inorganic polymers Second International Conference Geopolymer, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 1999, p. 189-199
22. E. Kamseu, C. Djangang, P. Veronesi, A. Fernanda, U.C. Melo, V.M. Sglavo, C. Leonelli, Transformation of the geopolymer gels to crystalline bonds in cold-setting refractory concretes: Pore evolution, mechanical strength and microstructure. *Mater. Des.* **88**, 336–344 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.151>.
23. D.S. Perera, R.L. Trautman, Geopolymers with the Potential for Use as Refractory Castables. *ATMMMP* **7**(2), 187-190 (2005). <https://doi.org/10.2240/azojomo0173>
24. J.L. Provis, J.S.J. van Deventer, *Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications* Woodhead Publishing, 2009.
25. T. Yang, H. Zhu, Z. Zhang, Influence of fly ash on the pore structure and shrinkage characteristics of metakaolin-based geopolymer pastes and mortars. *Constr. Build. Mater.* **153**, 284–293 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.067>.