

dr inż. Agnieszka Rutecka¹⁾
ORCID: 0000-0002-0029-071X

Thermal parameters for different types of insulation and structural boards

Parametry termiczne różnych typów płyt izolacyjnych i konstrukcyjnych

DOI: 10.15199/33.2025.12.26

Abstract. The article presents determined thermal conductivity coefficients, volumetric heat capacity, specific heat and thermal diffusivity of the tested materials. The weakest parameters such as specific heat and thermal conductivity were obtained for Portland cement reinforced with cellulose fibres. The parameters were improved by the presence of wood fibres or shavings in the materials, demonstrating the best ability to heat accumulation. Mineral wool have the best (the lowest) values of thermal conductivity coefficients and the highest (the most unfavourable) values of thermal diffusivity, indicating the worst ability to heat accumulation of the material.

Keywords: thermal conductivity; specific heat; thermal diffusivity; structural boards; insulation boards.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyznaczone współczynniki przewodzenia ciepła, objętościową pojemność cieplną, ciepło właściwe oraz dyfuzyjność termiczną przebadanych materiałów. Najsłabsze parametry, takie jak ciepło właściwe i przewodność cieplna uzyskano w przypadku materiału z cementu portlandzkiego zbrojonego włóknami celulozowymi. Parametry te poprawił dodatek włókien lub wiórów drewnianych i materiały te wykazały się najlepszą zdolnością do akumulacji ciepła. Wełna mineralna charakteryzowała się natomiast najmniejszą wartością współczynnika przewodzenia ciepła przy jednocześnie największej (najbardziej niekorzystnej) wartości dyfuzyjności termicznej, świadczącej o małej zdolności do akumulacji ciepła.

Słowa kluczowe: przewodność cieplna; ciepło właściwe; dyfuzyjność termiczna; płyty konstrukcyjne; płyty izolacyjne.

Nowadays it is very important to focus on thermal conditions of houses. One of insulation material is graphite doped expanded polystyrene (GEPS) investigated a.o. by Lakatos and Csik [1]. It is based on polystyrene and graphite powder added during the polymerization. It has approximately 20% lower thermal conductivity in comparison to graphite-free insulations. During investigations the material was heat treated to simulate artificially its degradation process. Subsequently, thermal conductivity and specific heat capacity was measured, before and after annealing.

Materials like a graphite-expanded polystyrene GEPS, as well as modern aerogels, were investigated by Lakatos in [2]. Aerogel 1 is an insulating material based entirely on mineral raw materials. Aerogel 2 is made from silica aerogel, and a non-woven blanket of carbon and fiberglass and can be used at 650°C. Sandwiches as a combination of GEPS insulation and aerogel 1 or aerogel 2 were also investigated. Thermal conductivity increase with increased test temperature was noticed. The highest values of thermal conductivity were obtained for GEPS, then aerogel 2 and the lowest values for aerogel 1, which means that the latest material has the best properties regarding thermal conductivity.

Obecnie duży nacisk kładzie się na efektywność energetyczną budynków. Jednym ze stosowanych materiałów do izolacji termicznej jest polistyren ekspandowany z dodatkiem grafitu (GEPS) przebadany przez m.in. Lakatos and Csik [1]. Składa się on z polistyrenu i proszku grafitowego dodawanego podczas polimeryzacji. Taki materiał izolacyjny ma ok. 20% lepszą przewodność cieplną niż styropian bez dodatku grafitu. Symulując proces sztucznej degradacji, materiał był poddawany obróbce termicznej, a następnie przeprowadzono pomiary współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego przed i po wyżarzaniu.

Materiały izolacyjne, takie jak polistyren ekspandowany z dodatkiem grafitu GEPS oraz nowoczesne aerozele, zostały przebadane przez m.in. Lakatos [2]. Aerożel 1 jest materiałem izolacyjnym bazującym na surowcach mineralnych, natomiast aerożel 2 składa się z krzemionkowego aerożelu oraz z maty z włókniny węglowej i z włókna szklanego. Należy podkreślić, że aerożel 2 może być stosowany w temperaturze 650°C. Kombinacje izolacji typu sandwich z GEPS i aerożel 1 oraz GEPS i aerożel 2 zostały również przebadane. Zaobserwowano zwiększenie przewodności cieplnej wraz ze wzrostem temperatury. Największe wartości przewodności cieplnej otrzymano w przypadku GEPS, następnie aerożelu 2 i najmniejsze dla aerożelu 1. Oznacza to, iż ten ostatni z wymienionych materiałów ma najlepsze właściwości, biorąc pod uwagę współczynnik przewodzenia ciepła.

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; agnieszka.rutecka@pw.edu.pl

The specific heat capacity also increased with temperature increase in the case of GEPS and (slightly) in the case of aerogel 1, while the measured value for aerogel 2 was about constant. The highest values of heat capacity were observed for GEPS and the lowest for aerogel 1.

Diffusivity was calculated using thermal conductivity, specific heat capacity and density of the materials (1):

$$D_T = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} = \frac{\lambda}{c_{\text{eff}}} \quad (1)$$

where:

c_p – specific heat capacity;

c_{eff} – effective (volumetric) heat capacity;

λ – thermal conductivity;

D_T – diffusivity;

ρ – density.

The thermal conductivity characterizes ability of material to conduct heat, while the diffusivity is used in non-steady or transient cases where heat passes quickly for material with high diffusivity, relative to its volumetric (effective) heat capacity. The lowest values of thermal conductivity and diffusivity (which results in better insulation properties of the material and ability to store heat inside insulation) were obtained for aerogel 1 and aerogel 2, much higher for sandwich structures and the highest for GEPS.

Polyisocyanurate (PIR), a type of closed-cell polymeric foam, an improved version of polyurethane (PUR), was investigated a.o. by Lakatos et al [3]. The material can be used as insulation thanks to its good thermal parameters comparable to thermal parameters of aerogel insulations. Specific heat capacity and thermal conductivity were measured and higher heat capacity was observed for the PIR insulations in comparison to EPS and aerogel 1 and 2. At the same time, minimum of thermal conductivity for the PIR at 10 K was observed and the value was lower than the one observed for EPS and similar to the one observed for aerogels. The authors [4] tested thermal properties of aerogels and their vacuumed forms in terms of their applicability and environmental impact.

Thermal conductivity and specific heat capacity are parameters that describe, among others, thermal properties of insulation and structural materials. The thermal conductivity coefficient tells us how much heat flows through a cubic meter of a given material in one second with a temperature difference of one degree Celsius (1 K) between its two opposite surfaces under steady-state heat flow conditions [5]. Specific heat, on the other hand, tells us how much heat is needed to heat one kilogram of a substance by one degree Celsius. The higher specific heat, the better accumulation of heat in material is observed [6]. In structural materials specific heat affects the thermal inertia of a building, that is its ability to delay temperature changes.

Thermal capacity is the ability to absorb and accumulate heat from the environment. Materials with high thermal capacity are able to accumulate excess heat, preventing the interior of the building from overheat and reducing the need for cooling. The heat stored in a material is released during

Wartość ciepła właściwego wymienionych materiałów również zwiększała się wraz ze wzrostem temperatury w przypadku GEPS i nieznacznie w przypadku aerożelu 1, podczas gdy w przypadku aerożelu 2 utrzymywała się na prawie stałym poziomie. Największą wartość ciepła właściwego uzyskano w przypadku GEPS, a najmniejszą – aerożelu 1.

Dyfuzyjność termiczna, została obliczona na podstawie przewodności cieplnej, ciepła właściwego i gęstości badanych materiałów (1):

$$D_T = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} = \frac{\lambda}{c_{\text{eff}}} \quad (1)$$

gdzie:

c_p – ciepło właściwe;

c_{eff} – efektywna (objętościowa) pojemność cieplna;

λ – współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność cieplna);

D_T – dyfuzyjność termiczna; ρ – gęstość.

Przewodność cieplna charakteryzuje zdolność materiału do przewodzenia ciepła, natomiast dyfuzyjność jest używana w przypadku stanu nieustalonego lub chwilowego, gdy ciepło przepływa szybko przez materiał o wysokiej dyfuzyjności, odpowiednio do swojej efektywnej pojemności cieplnej. Najmniejsze wartości przewodności i dyfuzyjności cieplnej, a co za tym idzie dobre właściwości izolacyjne materiału i zdolność do magazynowania ciepła wewnątrz izolacji, zostały uzyskane w przypadku aerożeli 1 i 2, znacznie większe – struktur sandwichowych, a największe GEPS.

Polizocyanuran (PIR), czyli rodzaj pianki polimerowej o zamkniętych komórkach, został przebadany m.in. przez Lakatos i in. [3]. Materiał ten może być stosowany jako izolacja dzięki swoim dobrym parametrom termicznym porównywalnym z parametrami termicznymi aerożeli. Ciepło właściwe i przewodność cieplna zostały pomierzone i wyższe wartości ciepła właściwego zaobserwowano dla izolacji PIR w porównaniu z EPS i aerożelami 1 i 2. Jednocześnie minimalna wartość przewodności cieplnej izolacji PIR została zaobserwowana w temperaturze 10°C i była ona mniejsza niż izolacji EPS i porównywalna z wartościami otrzymanymi w przypadku aerożeli. Autorzy [4] zbadali właściwości termiczne aerożeli i ich form próżniowych pod kątem możliwości zastosowania oraz wpływu na środowisko.

Współczynnik przewodzenia ciepła i ciepło właściwe to parametry opisujące m.in. właściwości materiałów izolacyjnych i konstrukcyjnych. Współczynnik przewodzenia ciepła mówi o tym, ile ciepła przepłynie przez metr sześcienny danego materiału w ciągu jednej sekundy przy różnicy temperatury między jego dwoma przeciwległymi powierzchniami, wynoszącej jeden stopień Celsjusza (1 K) w warunkach ustalonego przepływu ciepła [5]. Ciepło właściwe mówi nam natomiast o tym, ile ciepła potrzeba do ogrzania jednego kilograma substancji o jeden stopień Celsjusza. Im większe ciepło właściwe, tym materiał lepiej magazynuje ciepło [6]. W materiałach budowlanych, ciepło właściwe wpływa na bezwładność cieplną budynku, czyli jego zdolność do opóźniania zmiany temperatury.

the cold season, reducing the amount of energy needed to heat the interior.

Heat accumulation is the ability of a material to accumulate and store a certain amount of thermal energy, which is then released by that material to its surroundings [7]. Excess heat can be stored in the material and used when there is a heat deficit. The aim is to maintain the optimum temperature inside buildings from the point of view of the so-called thermal comfort, enabling comfortable functioning during unfavorable outdoor conditions. In [7], an analysis was conducted of the heat accumulation capacity of construction material such as concrete made using crushed stone obtained from sanitary ceramics waste. It was found that such concrete has an advantage over traditional ceramics.

The temperature dependence of thermal conductivity and specific heat capacity commonly used insulations such as Expanded Polystyrene EPS, Extruded Polystyrene XPS, Cellulose fibers, Mineral Wool, Polyisocyanurate (PIR) was investigated by Yousefi et al. in [8]. In the work by Ricciu et al. [9], the thermal characteristics of insulating materials were presented, with heat capacity being one of the important parameters of building materials, and several methods of its determination were given. Bouguerra et al. [10] discussed experimental and theoretical methods for determining thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of wood composites. Asdrubali et al. [11] presented thermal characteristics such as thermal conductivity and specific heat of natural and recycled materials, including reeds, sugarcane bagasse, and date palms. Hostler et al. [12] compared the thermal conductivity of clay-based aerogels, while Baetens et al. [13] presented an overview of insulation made of aerogels, taking into account its thermal conductivity. Jelle [14] presented the advantages and disadvantages of insulating building materials – both traditional ones, such as mineral wool, and new ones, such as nanomaterials – taking into account their thermal conductivity. Nematollahi et al. [15] determined thermal conductivity as one of the parameters describing the properties of geopolymer composites.

Wakili et al. in [16] described the method to obtain the specific heat capacity using HFM (*heat flow meter apparatus*) which is designed to evaluate the thermal conductivity. The authors measured two specimens of the same material with thermocouples on both sides to be put together and sandwiched between the two plates. They proved that the specific heat capacity of thermal insulation materials can be determined with the same equipment (HFM) that is used to determine the thermal conductivity.

Investigations, using guarded hot plate apparatus (GHP) which is commonly used to determine thermal conductivity and is much better controlled than a heat flow meter apparatus (HFM) and has greater precision, were made to determine specific heat capacity of building insulation materials [17]. The authors present several other methods to determine the specific heat capacity of insulating materials. To compare the results obtained by the authors,

Pojemność cieplna to zdolność pobierania i akumulowania ciepła pochodzącego z otoczenia. Materiały o dużej pojemności cieplnej są w stanie wchłaniać nadwyżkę ciepła, co powoduje, iż wnętrze budynku nie nagrzewa się zbyt szybko oraz nie wymaga chłodzenia. Ciepło zakumulowane w materiale emitowane jest z przegród w okresie chłodnym, co przyczynia się do redukcji ilości energii potrzebnej do ogrzania pomieszczenia.

Akumulowanie ciepła to zdolność materiału do gromadzenia i magazynowania w jego wnętrzu określonej ilości energii cieplnej, oddawanej następnie przez ten materiał do otoczenia [7]. Nadmiar ciepła może być gromadzony w materiale i wykorzystany w momencie deficytu ciepła. Chodzi o utrzymanie wewnątrz obiektów temperatury optymalnej z punktu widzenia tzw. komfortu cieplnego, umożliwiającej wygodne funkcjonowanie podczas niekorzystnych warunków zewnętrznych. W [7] przeprowadzono analizę zdolności do akumulacji cieplnej materiału konstrukcyjnego, jakim jest beton wykonany z użyciem kruszywa uzyskanego z odpadów ceramiki sanitarnej. Stwierdzono przewagę tak sporządzonego betonu nad ceramiką tradycyjną.

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego od temperatury w przypadku ogólnie stosowanych materiałów izolacyjnych, takich jak polistyren ekspandowany EPS, polistyren ekstrudowany XPS, włókna celulozowe, włókna mineralne i poliizocyjanuran PIR zostały przedstawione w pracy Yousefi i in. [8]. W pracy Ricciu i in. [9] zaprezentowano charakterystykę termiczną materiałów izolacyjnych, przedstawiając ciepło właściwe jako jeden z ważniejszych parametrów materiałów budowlanych i podano kilka metod jej wyznaczania. Bouguerra i in. [10] omówili eksperymentalne i teoretyczne metody wyznaczania przewodności cieplnej, dyfuzyjności termicznej i ciepła właściwego kompozytów drewnianych. Asdrubali i in. [11] przedstawili charakterystyki termiczne, takie jak przewodność cieplna i ciepło właściwe naturalnych i recyklingowych materiałów m.in. z trzciny, wyłók z trzciny cukrowej czy palm daktylowych. Hostler i in. [12] porównali wartości przewodności cieplnej aerożeli na bazie gliny, podczas gdy Baetens i in. [13] zaprezentowali przegląd izolacji wykonanych z aerożeli z uwzględnieniem przewodności cieplnej. Jelle [14] przedstawił zalety i wady izolacyjnych materiałów budowlanych zarówno tradycyjnych, takich jak np. wełna mineralna oraz nowych, jak np. nanomateriały izolacyjne, z uwzględnieniem wartości przewodności cieplnej. Nematollahi i in. [15] wyznaczyli przewodność cieplną jako jeden z parametrów opisujących właściwości kompozytów geopolimerowych.

Wakili i in. w pracy [16] opisali metodę wyznaczania ciepła właściwego przy użyciu HFM (*heat flow meter apparatus*), w celu oceny współczynnika przewodności cieplnej. Autorzy przeprowadzili pomiary na dwóch próbkach, wykonanych z tego samego materiału, z termoparami po obu stronach pomiędzy płytami aparatu. Wykazali, że ciepło właściwe materiału wykorzystywanego jako izolacja termiczna może być wyznaczone przy użyciu tego samego sprzętu/aparatu (HFM), jaki jest używany do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła.

the only way would be to measure the same material by all the different methods, which would require more elaborate investigations.

Materials

Mineral wool as an insulation material, which is a reference material for FOX instrument, and four structural materials were initially investigated to evaluate their thermal conductivity and specific heat capacity.

Mineral wool – **reference material**, an insulating material of mineral origin, in this case glass wool produced from quartz sand, used in construction for thermal and acoustic insulation of interior and exterior walls, ceilings, floors, roofs, and attics.

Material 1 – Cement-fiber board (Portland cement with cellulose fibers) [18]. Incombustible, moisture and weather resistant, naturally biostable, easy-to-work-with structural and cladding board made of Portland cement reinforced with cellulose fibers. Can be used both outdoors or indoors providing protection from weather factors. Environment, nature and human friendly. Such boards are used in constructions requiring materials with high mechanical resistance, resistance to low temperatures and freeze-thaw cycles.

Material 2 – Cement-bonded particle board – (Portland cement with coniferous wood chips (shavings)) [19]. Like cement-fiber board, it is an incombustible, moisture and weather resistant, naturally biostable, environment, nature and human friendly board made of Portland cement reinforced with wood chips (shavings). It is mainly a structural board, giving rigidity to frame structures, resistant to loads, deflections and mechanical damage, and frost resistant. Cement-bonded particle boards are made of Portland cement (65% share of ingredients by weight), wood chips/shavings (24% by weight), water (8,5% of weight) and mineral hydration additives (water glass) (by weight 2,5%).

Material 3 – Gypsum-fiber board with special fiberglass veil [20]. A versatile, easy-to-install, fireproof, durable, damage and weather resistant, innovative structural board that features a reinforced core for effective moisture protection and a special orange-colored fiberglass veil for exterior cladding, among other applications. It enables higher energy efficiency and thermal insulation of buildings.

Material 4 – Gypsum-fiber board – made of mineral gypsum and wood fibers [21]. A board with high bending and abrasion resistance and favorable thermal and acoustic insulation performance, as well as high fire resistance and smooth surface. Easy to process and environmentally friendly. Consists of mineral gypsum (83%), wood fibers (15%) and water (2%). Power Gypsum building board is also called gypsum particleboard since the fibers are chemically unprocessed fine splinters. Among other things, it can be used as cladding for interior partitions and ceilings, as well as interior and exterior load-bearing wall structures.

Badania przy użyciu GHP (*guarded hot plate apparatus*), który jest powszechnie używany do pomiaru przewodności cieplnej, ponieważ jest łatwiejszy w użyciu i dokładniejszy niż HFM, zostały wykonane w celu wyznaczenia ciepła właściwego materiałów izolacyjnych [17]. Autorzy przedstawili kilka innych metod używanych do wyznaczania ciepła właściwego. W celu porównania uzyskanych wyników jedynym sposobem jest przeprowadzenie pomiarów tego samego materiału przy użyciu różnych metod.

Materiały

W ramach wstępnych badań współczynnika przewodzenia ciepła i ciepła właściwego przebadano materiał izolacyjny, jakim jest wełna mineralna, która stanowiła próbkę wzorcową w aparacie FOX oraz cztery materiały konstrukcyjne.

Wełna mineralna – **próbka wzorcowa**, to izolacyjny materiał pochodzenia mineralnego, w tym przypadku wełna szklana wyprodukowana z piasku kwarcowego, stosowana w budownictwie do izolacji termicznej i akustycznej ścian zewnętrznych i wewnętrznych, stropów, podłóg, dachów i stropodachów.

Material 1 – płyta cementowo włóknowa (cement portlandzki z włóknami celulozowymi) [18]. Jest to niepalna, odporna na wilgoć i warunki atmosferyczne, naturalnie biostabilna, łatwa w obróbce płyta konstrukcyjna i okładzinowa wykonana z cementu portlandzkiego wzmocnionego włóknami celulozowymi. Może być stosowana zarówno w warunkach zewnętrznych, jak i wewnętrznych, zapewniając ochronę przed czynnikami atmosferycznymi. W składzie nie zawiera substancji szkodliwych dla zdrowia ludzkiego ani środowiska. Tego typu płyty wykorzystywane są w konstrukcjach wymagających dużej wytrzymałości mechanicznej oraz odporności, na niską temperaturę i cykle zamarzania i odmarzania.

Material 2 – płyta cementowo-drzazgowa (cement portlandzki z iglastymi wiórami drzewnymi) [19]. Podobnie jak płyta cementowo-włóknowa jest niepalna, odporna na wilgoć i warunki atmosferyczne, naturalnie biostabilna, przyjazna dla środowiska (wykonana z cementu portlandzkiego wzmocnionego wiórami drzewnymi). Jest to płyta przede wszystkim konstrukcyjna nadająca sztywność konstrukcjom szkieletowym, niezwykle odporna na obciążenia, ugięcia i uszkodzenia mechaniczne oraz mrozoodporna. Płyta cementowo-drzazgowa to płyta wykonana z cementu portlandzkiego (65% w masie finalnego produktu), z wiórów drewnianych, zwanych również drzazgami lub zrębkami (24% w masie), wody (8,5% w masie) i szkła wodnego (2,5% w masie).

Material 3 – płyta gipsowo-włóknowa ze specjalnym welonem z włókna szklanego [20]. Wszechstronna, łatwa w instalacji, ognioodporna, trwała, odporna na uszkodzenia i warunki atmosferyczne, innowacyjna płyta konstrukcyjna, która ma wzmocniony rdzeń, skutecznie chroniący przed wilgocią oraz specjalny welon z włókna szklanego w kolorze pomarańczowym przeznaczony m.in. do obłożeń zew-

Research methods

The thermal conductivity and specific heat capacity were measured using the FOX 314 Heat Flow Meter. The FOX 314 is an instrument for measuring mainly thermal conductivity according to ASTM C518 [22] and ISO 8301 [23].

The FOX 314 is used also to measure thermal volumetric heat capacity. During the test the value of temperature for both plates is set on the same level of temperature. The total amount of heat per surface unit is measured [J/m^2] as absorbed both by the sample and by the HFM instrument. The heat absorbed by the instrument is subtracted automatically. The value of volumetric heat capacity is calculated and given in $J/(m^3K)$.

Tests were performed on samples with mean dimensions around $300 \times 300 \times 28$ mm for specimen from reference material (mineral wool); for four structural materials the sample dimensions were $300 \times 200 \times (12 - 25)$ mm (different specimens thickness). The specimens were placed between two plates in the test stack and a temperature gradient was established over the thickness of the material. In the case of thermal conductivity measurements, temperatures on plates were equal to $25^\circ C$ for upper plate and $35^\circ C$ for lower plate, which gave mean temperature equal to $30^\circ C$. Heat Flux Transducer integrated over the entire active area (100×100 mm) to provide representative measurements of the total heat flow. A thermocouple was bonded in the center of each transducer. An external thermocouple option was also used and thermocouples were attached directly to the sample surfaces. Specific heat measurements were also performed. Temperatures of the plates surfaces were set at $15^\circ C$ for the first pre-conditioning setpoint for initial measurement and at $25^\circ C$ during the second setpoint for the proper measurement, resulting in an average temperature of $20^\circ C$. Photographs 1 and 2 show the apparatus used to measure thermal conductivity and specific heat with and without external thermocouples.

nętrnych. Umożliwia uzyskanie dużej efektywności energetycznej i izolacyjności termicznej budynków.

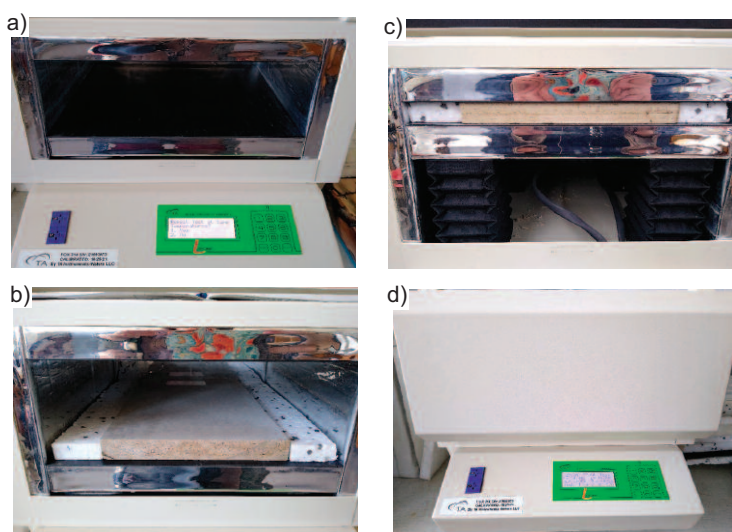
Material 4 – płyta gipsowo-włókna, wykonana z naturalnego gipsu kopalnego i włókien drzewnych [21]. Płyta o dużej wytrzymałości na zginanie, odporna na ścieranie. Ma korzystne parametry termoizolacyjne i akustyczne oraz dużą odporność ogniową i gładką powierzchnię. Wygodna w obróbce oraz przyjazna dla środowiska. Składa się z naturalnego gipsu kopalnego (83%), włókien drzewnych (15%) i wody (2%). Włókna w jej składzie to nieprzetworzone chemicznie drobne drzazgi, dlatego też płyta ta nazywana jest płytą gipsowo-drzazgową. Może być stosowana m.in. jako okładzina wewnętrznych ścian działowych i sufitów, a także do konstrukcji wewnętrznych i zewnętrznych ścian nośnych.

Metody badań

Przewodność cieplna i ciepło właściwe zostały zmierzone przy użyciu aparatu do pomiaru przepływu ciepła FOX 314, który jest głównie przeznaczony do pomiaru przewodności cieplnej zgodnie z normą ASTM C518 [22] i ISO 8301 [23].

Aparat FOX służy również do pomiaru pojemności cieplnej objętościowej (objętościowego ciepła właściwego). W trakcie tego pomiaru wartości temperatury obu płyt ustala się na tym samym poziomie. Oprogramowanie oblicza całkowitą ilość ciepła na jednostkę powierzchni [J/m^2] pochłoniętego zarówno przez próbkę, jak i przez urządzenie, wykorzystując zarejestrowane sygnały. Ciepło pochłonięte przez urządzenie jest automatycznie odejmowane. Wartość objętościowego ciepła właściwego jest obliczana i podawana w $J/(m^3K)$.

Testy przeprowadzono na próbkach o średnich wymiarach ok. $300 \times 300 \times 28$ mm w przypadku próbki wzorcowej z wełny mineralnej oraz $300 \times 200 \times (12 - 25)$ mm (różna grubość poszczególnych próbek) dla próbek z czterech materiałów konstrukcyjnych. Próbki były umieszczane pomiędzy dwoma płytami aparatu w celu ustalenia odpowiedniego gradientu temperatury na całej grubości materiału. W przypadku pomiaru przewodności cieplnej temperatura wynosiła $25^\circ C$ na płycie górnej i $35^\circ C$ na płycie dolnej, co dawało średnią temperaturę $30^\circ C$. Przetwornik przepływu ciepła działa na całym aktywnym polu (100×100 mm), aby dostarczyć reprezentatywne pomiary całkowitego przepływu ciepła. W centralnej części każdego z przetworników umieszczona jest termopara. Podczas badań zastosowano również opcję zewnętrznych termopar przymocowanych bezpośrednio do powierzchni próbek, aby wyeliminować ewentualny opór warstwy powietrza, jaka może znajdować się na powierzchni próbek. Oprócz pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła przeprowadzono pomiary ciepła właściwego. Temperatura powierzchni płyt została ustalona na poziomie $15^\circ C$ w przypadku pierwszego ustawienia warunków wstępnych pomiaru początkowego i $25^\circ C$ podczas drugiego ustawienia pomiaru właściwego, co daje średnią temperaturę $20^\circ C$. Fotografie 1 i 2 przedstawiają aparaturę wykorzystaną do pomiaru przewodności ciepła i ciepła właściwego bez i z użyciem zewnętrznych termopar.



Fot. 1. Experiment conducted without external thermocouples: a) FOX apparatus before specimen installation; b) with specimen installed without external thermocouples; c) specimen between two heating plates prepared for testing; d) FOX apparatus during the test

Fot. 1. Doświadczenie przeprowadzane bez zewnętrznych termopar: a) aparat FOX przed instalacją próbki; b) aparat FOX z zainstalowaną próbką bez zewnętrznych termopar; c) próbka pomiędzy dwoma płytami grzewczymi przygotowana do badania; d) aparat FOX podczas trwania badania

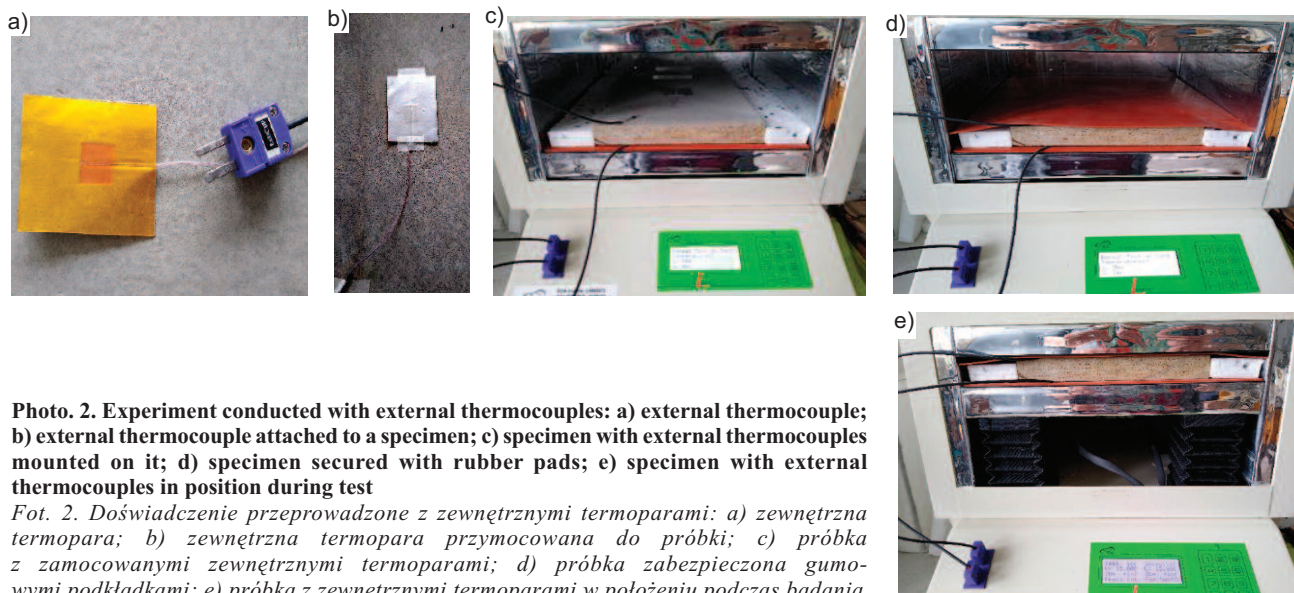


Photo. 2. Experiment conducted with external thermocouples: a) external thermocouple; b) external thermocouple attached to a specimen; c) specimen with external thermocouples mounted on it; d) specimen secured with rubber pads; e) specimen with external thermocouples in position during test

Fot. 2. Doświadczenie przeprowadzone z zewnętrznymi termoparami: a) zewnętrzna termopara; b) zewnętrzna termopara przymocowana do próbki; c) próbka z zamocowanymi zewnętrznymi termoparami; d) próbka zabezpieczona gumowymi podkładkami; e) próbka z zewnętrznymi termoparami w położeniu podczas badania

Results and discussion

Preliminary thermal conductivity tests were carried out on the reference material and four structural boards with and without external thermocouples (Figures 1 ÷ 5). The results are shown in Table 1. The thermal conductivity measured with and without thermocouples does not differ significantly. In the case of the reference material (mineral wool), the results are almost

Wyniki badań i dyskusja

W ramach wstępnych badań wykonano pomiary przewodności cieplnej materiału wzorcowego i czterech materiałów konstrukcyjnych bez i z zewnętrznymi termoparami (rysunki 1 ÷ 5). Wyniki przedstawiono w tabeli 1. Pomiary przewodności cieplnej przeprowadzone bez i z termoparami nie różnią się znacznie. W przypadku materiału wzorcowego z wel-

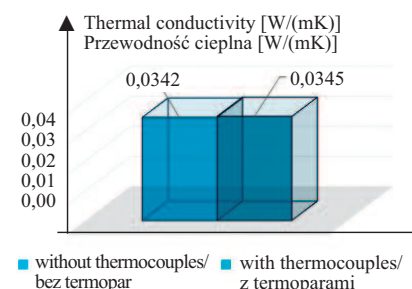


Fig. 1. Thermal conductivity for the reference material (mineral wool)

Rys. 1. Przewodność cieplna materiału wzorcowego (wełny mineralnej)

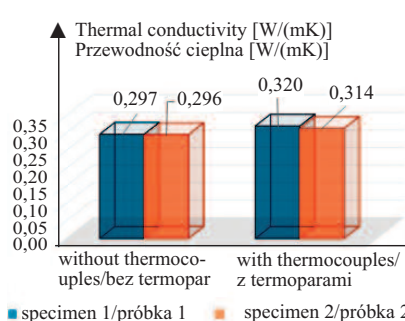


Fig. 2. Thermal conductivity for material: 1 – cement-fiber board (Portland cement with cellulose fibers)

Rys. 2. Przewodność cieplna materiału: 1 – płyta cementowo-włóknowa (cement portlandzki z włóknami celulozowymi)

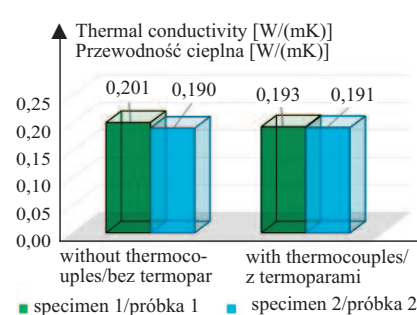


Fig. 3. Thermal conductivity for material: 2 – Particle-cement board (Portland cement with wood shavings)

Rys. 3. Przewodność cieplna materiału: 2 – płyta cementowo-drzazgowa (cement portlandzki z wiórami drzewnymi)

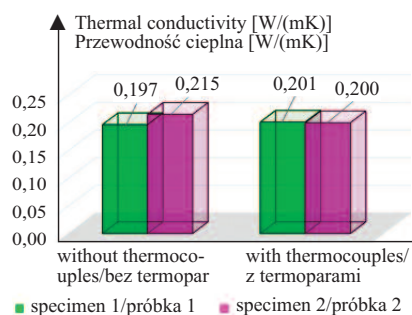


Fig. 4. Thermal conductivity for material 3 – Gypsum-fiber board with special fiberglass veil

Rys. 4. Przewodność cieplna materiału 3 – płyta gipsowo-włóknowa ze specjalnym welonem z włókna szklanego

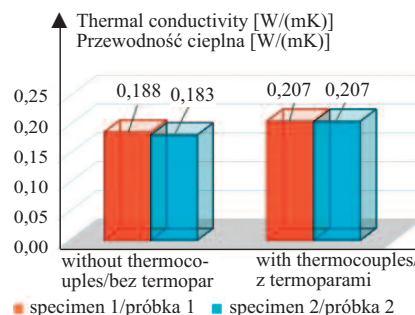


Fig. 5. Thermal conductivity for material 4 – Gypsum-fiber board: Mineral gypsum with wood fibers

Rys. 5. Przewodność cieplna materiału: 4 – płyta gipsowo-włóknowa wykonana z naturalnego gipsu kopalnego z włóknami drzewnymi

Table 1. Thermal conductivity determined for individual materials without and with external thermocouples

Tabela 1. Przewodność cieplna poszczególnych materiałów bez i z zewnętrznymi termoparami

Material/Material	Test (p) Specimen (P)/ Próba (p)/ Próbką (P)	Thermal conductivity [W/(m·K)]/Przewodność cieplna [W/(m·K)]	
		without thermocouples/bez termopar	with thermocouples/z termoparami
Reference material/Materiał wzorcowy	p1	0,03424	0,03453
		Certificate: 0.03434/Certyfikat: 0,03434	
Material 1/Materiał 1	P1	0,2967	0,3201
	P2	0,2960	0,3135
Material 2/Materiał 2	P1	0,2005	0,1928
	P2	0,1903	0,1913
Material 3/Materiał 3	P1	0,1966	0,2013
	P2	0,2153	0,2001
Material 4/Materiał 4	P1	0,1882	0,2072
	P2	0,1832	0,2067

identical and close to the value stated in the FOX producer certificate.

The volumetric heat capacity tests were conducted without external thermocouples (Table 2, Figure 6). Good agreement between the measurements of individual samples was observed for the reference material and for two different samples of the materials in question.

The specific heat of the materials was determined (Figure 7) using the density values measured during the tests. Only results without external thermocouples were taken into account. The lowest specific heat value was obtained for mineral wool, and the highest for material 2, i.e., cement-bonded particle board – Portland cement with coniferous wood chips. The higher the specific heat value, the better the material's ability to accumulate heat.

The lowest (the most favorable) thermal conductivity was obtained for mineral wool, and the highest in the case of material 1, i.e., Portland cement with cellulose fibers (Figure 8). The three remaining materials were characterized by very similar thermal conductivity values.

ny mineralnej są prawie identyczne i zgodne z wartością przewodności cieplnej tego materiału podanej w certyfikacie.

Badania objętościowej pojemności cieplnej zostały wykonane bez termopar zewnętrznych (tabela 2, rysunek 6). Zaobserwowano dobrą zgodność pomiarów poszczególnych prób w przypadku materiału wzorcowego i badanych próbek danego materiału.

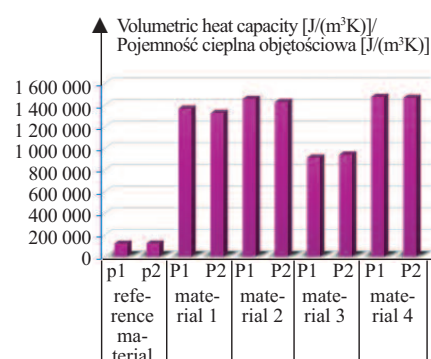
Wyznaczono ciepło właściwe poszczególnych materiałów (rysunek 7), korzystając z gęstości pomierzonej podczas badań. Pod uwagę wzięto jedynie wyniki materiałów przebadanych bez zewnętrznych termopar. Najmniejszą wartość ciepła właściwego otrzymano w przypadku wełny mineralnej, a największą materiału 2, czyli płyty cementowo-drzazgowej wykonanej z cementu portlandzkiego z wiórami drzewnymi. Im większa wartość ciepła właściwego, tym lepsza zdolność materiału do akumulowania ciepła.

Najmniejszą, a więc najbardziej korzystną przewodność cieplną otrzymano w przypadku wełny mineralnej, a największą w przypadku materiału 1, czyli cementu portlandzkiego zbrojonego włóknami celulozowymi (rysunek 8). Pozostałe trzy materiały charakteryzują się podobnym współczynnikiem przewodzenia ciepła.

Table 2. Effective (volumetric) heat capacity (volumetric specific heat) determined for individual materials without external thermocouples

Tabela 2. Efektywna (objętościowa) pojemność cieplna (objętościowe ciepło właściwe) wyznaczona w przypadku poszczególnych materiałów bez termopar zewnętrznych

Material/Material	Test (p) Specimen (P)/ Próba (p)/ Próbką (P)	Volumetric heat capacity [J/(m³K)]/ Pojemność cieplna objętościowa [J/(m³K)]
Reference material/ Materiał wzorcowy	p1	121 024
	p2	121 703
Material 1/Materiał 1	P1	1 367 978
	P2	1 326 819
Material 2/Materiał 2	P1	1 457 706
	P2	1 429 436
Material 3/Materiał 3	P1	915 170
	P2	942 336
Material 4/Materiał 4	P1	1 475 609
	P2	1 467 703

**Fig. 6. Volumetric heat capacity determined for individual specimens of materials for tests without external thermocouples**

Rys. 6. Pojemność cieplna objętościowa poszczególnych próbek materiałów wyznaczona w badaniu bez termopar zewnętrznych

Thermal diffusivity was calculated according to equation (1). The highest and less favorable value of thermal diffusivity was obtained for mineral wool, and the lowest for material 2 and 4 reinforced with wood fibers and chips (Figure 9). These two materials are characterized by a significantly slower heat flow through a barrier made of them, which results in better heat accumulation in the material. Considering the relationship between diffusivity and thermal conductivity (Figure 10), materials 2 and 4 have similar thermal conductivity, but material 3 has higher diffusivity, resulting in lower ability of heat accumulation. The material with the weakest thermal parameters is material 1 reinforced with cellulose fibers, which has the highest thermal conductivity and high level of thermal diffusivity.

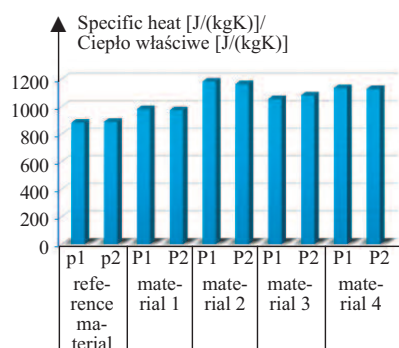


Fig. 7. Specific heat determined for individual specimens of materials for tests without external thermocouples

Rys. 7. Ciepło właściwe poszczególnych próbek materiałów do badań bez termopar zewnętrznych

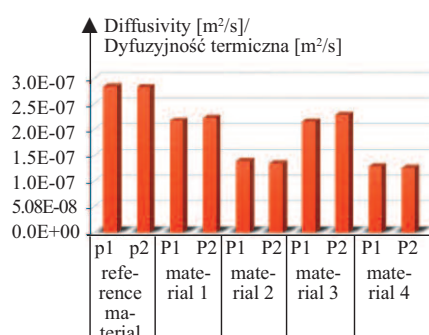


Fig. 9. Diffusivity determined for individual specimens of materials for tests without external thermocouples

Rys. 9. Dyfuzyjność termiczna poszczególnych próbek materiałów do badania bez termopar zewnętrznych

Conclusions

Thermal conductivity investigations carried out with and without external thermocouples yielded similar results, regardless of whether external thermocouples were used during test or not. It was observed that tests carried out on two different specimens made of the same material obtained very similar results, especially concerning volumetric heat capacity.

The highest (most favorable) values of specific heat were obtained for materials 2 and 4, which were reinforced with wood fibers and chips. The lowest specific heat was observed for the mineral wool – the reference material.

Dyfuzyjność cieplną obliczono wg wzoru (1). Największą i najmniej korzystną wartość dyfuzyjności termicznej otrzymano w przypadku wełny mineralnej, a najmniejszą uzyskały materiały 2 i 4 zbrojone włóknami i wiórami drzewnymi (rysunek 9). Te dwa materiały charakteryzują się dużo wolniejszym przepływem ciepła przez przegrodę z nich wykonaną, a co za tym idzie lepszą akumulacją ciepła w materiale. Biorąc pod uwagę zależność dyfuzyjność – przewodność cieplna (rysunek 10) materiały 2–4 charakteryzuje podobny współczynnik przewodności cieplnej, ale materiał 3 wykazuje wyższą dyfuzyjność, a co za tym idzie mniejszą zdolność do akumulowania ciepła. Materiałem o najsłabszych parametrach cieplnych jest materiał 1 zbrojony włóknami celulozowymi, który charakteryzuje się największą wartością przewodności i wysokim poziomem dyfuzyjności termicznej.

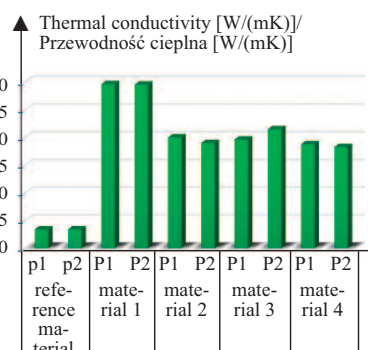


Fig. 8. Thermal conductivity determined for individual specimens of materials for tests without external thermocouples

Rys. 8. Przewodność cieplna poszczególnych próbek materiałów w przypadku badań bez termopar zewnętrznych

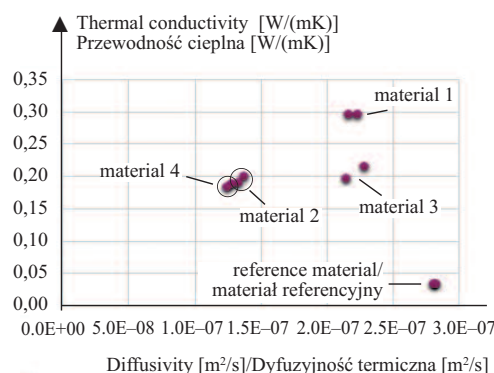


Fig. 10. Thermal conductivities in the function of the diffusivities

Rys. 10. Przewodność cieplna w funkcji dyfuzyjności termicznej

Podsumowanie

Badania przewodności cieplnej przeprowadzone bez i z zewnętrznymi termoparami wykazały zbliżone wyniki niezależnie od tego, czy podczas badań zastosowane zostały zewnętrzne termopary, czy nie. Zaobserwowano dużą zbieżność wyników badań przeprowadzonych na dwóch różnych próbkach wykonanych z tego samego materiału szczególnie w przypadku wyników objętościowej pojemności cieplnej.

Największe (najbardziej korzystne) wartości ciepła właściwego otrzymano w przypadku materiałów 2 i 4 wzmacnia-

The lowest and most favorable thermal conductivity was obtained for the reference material. The highest (least favorable) thermal conductivity coefficient was observed for material 1 reinforced with cellulose fibers.

The highest and least favorable thermal diffusivity value was recorded for the reference material – the mineral wool, which compared to the other tested materials has good insulating properties but simultaneously low heat accumulation capacity. On the other hand, materials 2 and 4 are characterized by good ability of heat accumulation, as they obtained the lowest value of thermal diffusivity among all tested materials, and high value of specific heat. Material 1 reinforced with cellulose fibers has diffusivity on the same level as material 3, which outputs give mean ability of heat accumulation in comparison to the other materials tested. Additionally, material 1 is characterized by low insulating properties as a result of its high value of thermal conductivity coefficient.

In practical application, materials 2 and 4 containing wood fibers/chips would accumulate heat better and provide better thermal insulation than the other two structural materials.

Further research is planned on the thermal conductivity and specific heat of the structural boards, tested at different temperatures.

The publication was financed by a subsidy from the dean of the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology.

Received: 14.08.2025

Revised: 17.09.2025

Published: 23.12.2025

nych włóknami i drzazgami drzewnymi. Najmniejsze ciepło właściwe wykazał materiał wzorcowy z wełny mineralnej.

Najmniejszą i najbardziej korzystną przewodność ciepłą uzyskano w przypadku wzorcowego materiału. Największy (najmniej korzystny) współczynnik przewodzenia ciepła ma materiał 1 wzmacniany włóknami celulozowymi.

Największą i najmniej korzystną wartość dyfuzyjności termicznej odnotowano w przypadku materiału wzorcowego z wełny mineralnej, który charakteryzuje dobra izolacyjność, ale niewielka zdolność do akumulacji ciepła w porównaniu z pozostałymi badanymi materiałami. Materiał 2 i materiał 4 mają dobrą zdolność do akumulacji ciepła, o czym świadczą najmniejsza wartość dyfuzyjności termicznej spośród uzyskanych w badaniu i duże wartości ciepła właściwego. Materiał 1 zbrojony włóknami celulozowymi ma dyfuzyjność na poziomie materiału 3, co świadczyłoby o średniej zdolności do akumulacji tych materiałów w porównaniu z pozostałymi, z tym że materiał 1 dodatkowo charakteryzuje mała izolacyjność związana z dużą wartością współczynnika przewodzenia ciepła.

W praktycznym zastosowaniu materiały 2 i 4 najlepiej akumulowałyby ciepło i stanowiłyby lepszą izolację termiczną niż dwa pozostałe materiały konstrukcyjne, co związane jest z zawartością w tych materiałach włókien/drzazg drzewnych.

Planowana jest kontynuacja badań przewodności cieplnej i ciepła właściwego przedstawionych w artykule płyt konstrukcyjnych dla różnych temperatur.

Publikacja została sfinansowana z subwencji dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 14.08.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 17.09.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Lakatos A, Csik A. Multiscale Thermal Investigations of Graphite Doped Polystyrene Thermal Insulation. *Polymers*, tom 14, nr 8, p. 1606, 2022.
- [2] Lakatos A. Thermal insulation capability of nanostructured insulations and their combination as hybrid insulation system. *Case Studies in Thermal Engineering*, tom 41, p. 102630, 2023.
- [3] Lakatos A, M. Csontos M, Csik A. Investigation of Both Thermal Parameters and Applications of Closed-Cell Plastic Thermal Insulation Foams with Building Energetic Aspects. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023-12.
- [4] Szabo A, Lakatos A. Thermal analysis of aerogels and their vacuum-formed forms, their potential uses, and their effects on the environment. *Case Studies in Thermal Engineering*, tom 56, 2024.
- [5] Kaliszuk-Wietecha A. Budownictwo zrównoważone – Wybrane zagadnienia z fizyki budowli, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2017.
- [6] Garbalińska H, Bochenek M. Izolacyjność termiczna a akumulacyjność cieplna wybranych materiałów ściennych. *Czasopismo Techniczne. Architektura*, pp. 89-96, 2011.
- [7] Zegardło B, Halicka A. Analiza właściwości cieplnych betonu z kruszywem. *Budownictwo i Architektura*, tom 9, pp. 39-49, 2011.
- [8] Yousefi Y, Tariku F. Thermal Conductivity and Specific Heat Capacity of Insulation materials at Different Mean Temperatures, w *J. Phys.: Conf. Ser.* 2069 012090, 2021.
- [9] Ricciu R, Besalduch LA, Galatioto A, Ciulla G. Thermal characterization of insulating materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; Tomy 1 z 382, Part 2, nr ISSN 1364-0321, pp. 1765-1773.
- [10] Bouguerra A, Ait-Mokhtar A, Amiri O, Diop M. Measurement of thermal conductivity thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *Int Comm Heat Mass Transf*, tom 28 (8), pp. 1065-1078, 2001.
- [11] Asdrubali A, D'Alessandro F, Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustain Mater Technol*. 2015; tom 4, pp. 1-17.
- [12] Hostler, S Abramson A, Gawryla M, Bandi S, Schiraldi D. Thermal conductivity of a clay-based aerogel. *Int J Heat Mass Transf*. 2008; tom 52, pp. 665-669.
- [13] Baetens R, Jelle B, Gustavsen A. Aerogel insulation for building applications: a state-of-the-art review. *Energy Build.* 2011; tom 43, pp. 761-769.
- [14] Jelle B. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy Build*, tom 43, pp. 2549-2563, 2011.
- [15] Nematollahi B, Ranade R, Sanjayan J, Ramakrishnan S. Thermal and mechanical properties of sustainable lightweight strain hardening geopolymer composites. *Arch Civil Mech Eng*. 2017; tom 17 (1), pp. 55-64.
- [16] Ghazi Wakili K, Binder B, Vonbank R. A simple method to determine the specific heat capacity of thermal insulations used in building construction. *Energy and Buildings*, pp. 413-415, 2003.
- [17] Ghazi Wakili K, Rädle W, Rohner T. Measuring the Specific Heat Capacity of Thermal Insulation Materials Used in Buildings by Means of a Guarded Hot Plate Apparatus. *International Journal of Thermophysics*. 2023.
- [18] Karta Techniczna – płyta cementowo-włóknowa.
- [19] Karta techniczna – płyta cementowo-drzazgowa.
- [20] Karta techniczna – płyta gipsowo-włóknowa z włóknem szklanym.
- [21] Karta techniczna – płyta gipsowo-włóknowa z włókien drzewnych.
- [22] ASTM C518 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.
- [23] ISO 8301 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus”.