

dr inż. Piotr Narloch¹⁾
ORCID: 0000-0002-5112-4498

Thermal insulation properties of mycelium-based composites used in construction

Właściwości termoizolacyjne kompozytów na bazie grzybni stosowanych w budownictwie

DOI: 10.15199/33.2025.12.24

Abstract. The article presents a comprehensive review and evaluation of the properties of mycelium-based insulation composites as an alternative to conventional thermal insulation materials. The manufacturing process is discussed in detail, including the preparation of a lignocellulosic substrate, mycelium inoculation, incubation, and thermal stabilization. Particular attention is given to the influence of the substrate type and fungal species on the resulting composites' structure, porosity, and thermal conductivity. A literature-based analysis revealed that, under appropriate conditions, materials with thermal conductivity values ranging from 0.032 to 0.082 W/(m·K) can be achieved, featuring full biodegradability and a low carbon footprint. Compared with conventional materials (EPS, XPS, mineral wool), mycelium composites exhibit a significantly more favorable environmental profile, the potential for utilizing locally available plant waste, and the absence of toxic emissions during disposal. The findings confirm the potential of these materials as components for sustainable and circular construction.

Keywords: mycelium composites; mycelium-based materials; natural insulation materials; thermal conductivity, bio-insulation.

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd i ocenę właściwości kompozytów izolacyjnych na bazie grzybni jako alternatywy dla konwencjonalnych materiałów termoizolacyjnych. Omówiono proces wytwarzania materiału obejmujący przygotowanie lignocelulozowego substratu, inokulację grzybnią, inkubację oraz stabilizację termiczną. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi rodzaju substratu i gatunku grzyba na strukturę, porowatość oraz przewodność cieplną uzyskiwanych kompozytów. Analiza danych literaturowych wykazała, że przy zastosowaniu odpowiednich warunków możliwe jest uzyskanie materiałów o przewodności cieplnej 0,032 – 0,082 W/(m·K), pełnej biodegradowalności i małym śladzie węglowym. W porównaniu z materiałami konwencjonalnymi (EPS, XPS, wełna mineralna), kompozyty grzybiowe charakteryzują się znacznie korzystniejszym bilansem środowiskowym, możliwością wykorzystania lokalnych odpadów roślinnych i brakiem toksycznych emisji na etapie utylizacji. Wyniki potwierdzają potencjał tych materiałów jako komponentu budownictwa zrównoważonego i cyrkularnego.

Słowa kluczowe: kompozyty grzybiowe; kompozyty na bazie grzybni; naturalne materiały izolacyjne; przewodność cieplna; bioizolacja.

The current intensification of the climate crisis has highlighted the significant impact of the construction sector on global greenhouse gas emissions. It is estimated that this industry is responsible for approximately 35% of global CO₂ emissions and generates between 45% and 65% of landfill waste [1]. In view of these figures, there is an increasing need to implement sustainable practices in construction aimed at reducing both operational emissions associated with building use and embodied emissions resulting from building materials throughout their entire life cycle – from production, transport, and installation to end-of-life disposal. Conventional thermal insulation materials, such as mineral wool and polymer foams, are characterized by a low thermal conductivity coefficient (0.030 – 0.040 W/(m·K)) and high insulation efficiency. However, their production is highly energy-intensive and relies on non-renewable raw materials, resulting in a significant

Współczesne nasilenie kryzysu klimatycznego uwidoczniło istotny wpływ budownictwa na globalną emisję gazów cieplarnianych. Szacuje się, że sektor ten odpowiada za ok. 35% światowej emisji CO₂ oraz generuje 45 – 65% odpadów składowanych na wysypiskach [1]. W obliczu tych danych jest coraz większa potrzeba wdrażania zrównoważonych praktyk w budownictwie, których celem jest redukcja zarówno emisji operacyjnych związanych z eksploatacją budynków, jak i emisji związanych z materiałami budowlanymi, obejmujących cały cykl życia materiałów – od produkcji, przez transport, montaż, aż po utylizację. Konwencjonalne materiały termoizolacyjne, takie jak wełna mineralna oraz pianki polimerowe, charakteryzują się małym współczynnikiem przewodzenia ciepła (0,030 – 0,040 W/(m·K)) i dużą efektywnością izolacyjną, ale ich produkcja jest bardzo energochłonna i bazuje na surowcach nieodnawialnych, co skutkuje dużym śladem węglowym. Ponadto, materiały te generują istotne wyzwania środowiskowe związane z końcem cyklu życia, w tym trudności w recyklingu i ograniczoną biodegradowalność [2].

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; piotr.narloch@pw.edu.pl

carbon footprint. Moreover, these materials pose serious environmental challenges at the end of their life cycle, including recycling difficulties and limited biodegradability [2].

In response to these challenges, there has been growing interest in materials based on biological manufacturing processes that align with the principles of sustainable development and the circular economy. One of the innovative solutions in this field is **mycelium-based insulation composites**, which in recent years have begun to find application in construction as an alternative to conventional insulating materials. These composites are formed through the colonization of lignocellulosic agricultural residues by fungal mycelium, which grows throughout the substrate to create a lightweight, porous, and biologically cohesive material. Due to its structure, this material exhibits low thermal conductivity, making it a promising solution for building envelope insulation.

This article discusses the manufacturing process of mycelium-based composites and identifies key factors affecting their thermal conductivity. Particular attention is paid to the importance of fungal species selection and substrate type, which determine the porous structure of the composite and, consequently, its physical and mechanical properties.

Manufacturing Process of Mycelium-Based Composites

Mycelium-based composites are produced through the controlled colonization of lignocellulosic waste biomass by mycelium from selected filamentous fungi. The process utilizes the natural ability of mycelium to permeate organic substrates and form a three-dimensional bonding network that, once stabilized by drying, exhibits thermal insulation properties. Photo 1 presents a schematic representation of the manufacturing process of prefabricated mycelium-based insulation materials.

The first stage involves the selection and preparation of the substrate, typically composed of plant-based raw materials such as wheat straw, hemp shives, sawdust, or wood chips. This biomass is shredded, moistened (to 60 – 70% moisture content), and subjected to sterilization or pasteurization (thermal or steam) to eliminate undesira-

W odpowiedzi na wymienione wyzwania zwiększa się zainteresowanie materiałami wytwarzanymi w procesach biologicznych, które wpisują się w ideę zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki o obiegu zamkniętym. Jednym z innowacyjnych rozwiązań są **kompozyty izolacyjne na bazie grzybni**, które w ostatnich latach zaczęły znajdować zastosowanie w budownictwie jako alternatywa dla konwencjonalnych materiałów izolacyjnych. Kompozyty te powstają w wyniku kolonizacji lignocelulozowych odpadów roślinnych przez grzybnie, która przerastając materiał, tworzy lekki, porowaty i biologicznie spójny kompozyt. Dzięki strukturze, materiał ten ma małą przewodność cieplną, co czyni go obiecującym rozwiązaniem w kontekście izolacji termicznej przegród budowlanych.

W artykule omówiono proces wytwarzania kompozytów na bazie grzybni oraz zidentyfikowano kluczowe czynniki wpływające na ich przewodność cieplną. Szczególną uwagę poświęcono znaczeniu doboru gatunku grzyba oraz rodzaju podłoża, które determinują strukturę porowatą kompozytu, a w konsekwencji jego właściwości fizyczne i mechaniczne.

Proces wytwarzania kompozytów

Kompozyty na bazie grzybni powstają w wyniku kontrolowanej kolonizacji odpadowej biomasy lignocelulozowej przez grzybnie wyselekcjonowanych grzybów strzępkowych. Proces ten wykorzystuje naturalną zdolność grzybni do przerastania organicznego podłoża i formowania trójwymiarowej, spajającej sieci, która po utwardzeniu (przez suszenie) wykazuje właściwości termoizolacyjne. Na fotografii 1 przedstawiono schematyczny przebieg procesu wytwarzania prefabrykowanych materiałów izolacyjnych z grzybni.

Etap pierwszy obejmuje dobór i przygotowanie substratu, najczęściej w postaci surowców roślinnych, takich jak słoma pszenna, paździerz konopne, trociny czy wióry drzewne. Biomasa ta jest rozdrabniana, nawilżana (do 60 – 70% wilgotności) i poddawana sterylizacji lub pasteryzacji (termicznej lub parowej), aby wyeliminować niepożądane mikroorganizmy konkurujące z grzybnia [3].

Następnie przeprowadza się inokulację, polegającą na zaszczepieniu przygotowanego substratu żywą grzybnia. Uzyskaną mieszaninę

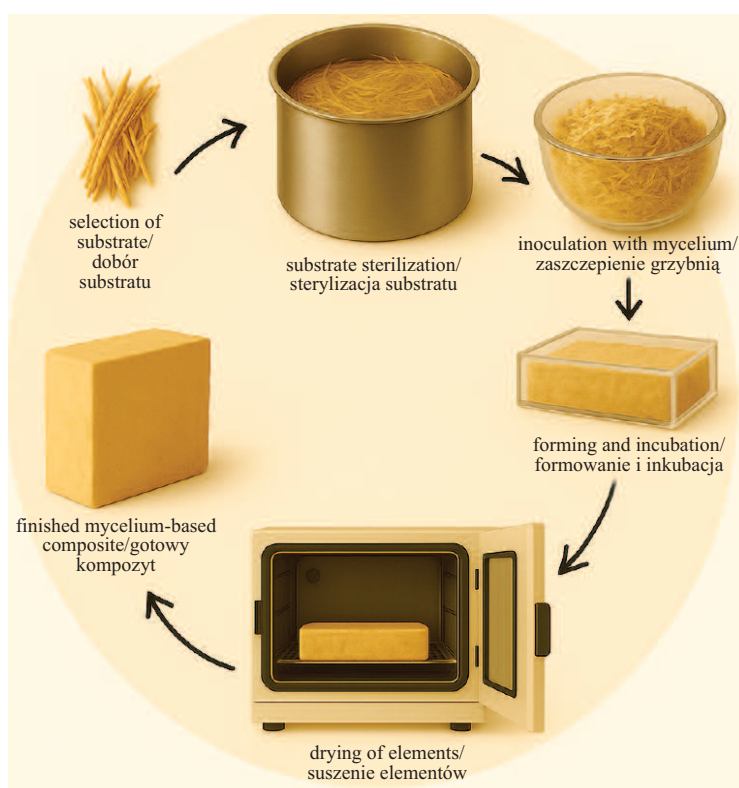


Photo. 1. Process of preparing prefabricated mycelium-based insulation materials

Fot. 1. Proces przygotowania prefabrykowanych materiałów izolacyjnych z grzybni

ble microorganisms that might compete with the fungal mycelium [3]. Next, inoculation is carried out, consisting of introducing live mycelium into the prepared substrate. The obtained mixture is placed into molds of defined shape corresponding to the intended building components. During the incubation phase, which usually lasts 10 – 14 days at temperatures of 20 – 27 °C and high relative humidity, the mycelium intensively colonizes the substrate, partially decomposes it, and grows throughout, forming a structure that serves as a natural binder [4].

After the biological growth phase, the deactivation stage follows – the material is dried or heat-treated at 60 – 90°C for 12 – 48 hours, halting fungal activity and stabilizing the structure. The final moisture content is reduced below 10%, which increases durability and resistance to microbial growth. Optionally, additional treatments such as pressing, trimming, or impregnation with natural hydrophobic agents can be applied [5].

Both the lignocellulosic substrate and the fungal mycelium significantly affect the physical properties of the resulting composite. Plant fibers, due to their inherent air porosity, exhibit favorable thermal insulation properties. The fungal hyphae colonizing the substrate fill the voids between biomass particles, may form a compact surface layer, and introduce structural biopolymers such as chitin and β -glucans. These compounds possess thermal properties different from cellulose, directly influencing the overall thermal conductivity of the composite [6].

This method is characterized by a low carbon footprint, high biodegradability, and the possibility of using local waste raw materials. The final material exhibits thermal insulation performance comparable to conventional insulation materials, low bulk density, and good acoustic insulation, making it a promising alternative to synthetic insulations in sustainable construction [7, 8].

Thermal Conductivity of the Composite

Fungal Species Used. Differences in hyphal morphology, colonization rate, and enzymatic degradation capability of lignocellulosic substrates directly influence the porosity and thermal conductivity of the resulting material. Fungal species belonging to the Basidiomycota phylum (Figure 1) are parti-

umieszcza się w formach o zdefiniowanym kształcie, odpowiadającym projektowanemu elementowi budowlanemu. W fazie inkubacji, trwającej zazwyczaj 10 – 14 dni w temperaturze 20 – 27°C i przy dużej wilgotności względnej, grzybnia intensywnie kolonizuje substrat, częściowo go degraduje i zarasta, tworząc strukturę pełniącą funkcję naturalnego spoiwa [4].

Po zakończeniu wzrostu biologicznego następuje etap dezaktywacji – materiał jest suszony lub wygrzewany w temperaturze 60 – 90°C przez 12 – 48 h, co zatrzymuje rozwój grzyba i stabilizuje strukturę. Wilgotność końcowa zostaje zmniejszona poniżej 10%, co zwiększa trwałość i odporność materiału na rozwój mikroorganizmów. Opcjonalnie stosuje się dodatkowe zabiegi, takie jak prasowanie, docinanie czy impregnacja naturalnymi środkami hydrofobowymi [5].

Zarówno substrat lignocelulozowy, jak i grzybnia istotnie wpływają na właściwości fizyczne uzyskanego kompozytu. Włókna roślinne, ze względu na obecność porów powietrznych, wykazują dobre właściwości termoizolacyjne. Strzępki grzybni kolonizujące substrat wypełniają przestrzenie pomiędzy cząstkami biomasy i mogą formować zwartą warstwę powierzchniową, a ponadto wprowadzają składniki strukturalne, takie jak chityna i β -glukany. Związki te charakteryzują się odmiennymi właściwościami termicznymi niż celuloza, co bezpośrednio wpływa na przewodność cieplną całego kompozytu [6].

Metoda ta charakteryzuje się małym śladem węglowym, dużą biodegradowalnością i możliwością wykorzystania lokalnych surowców odpadowych. Gotowy materiał wykazuje właściwości termoizolacyjne, porównywalne z konwencjonalnymi izolacjami, mały ciężar objętościowy oraz dobrą izolacyjność akustyczną [7, 8].

Przewodność cieplna kompozytu

Stosowane gatunki grzybów różnią się morfologią strzępek, tempem kolonizacji oraz zdolnościami enzymatycznego rozkładu lignocelulozowych podłoży, co przekłada się bezpośrednio na strukturę porowatą materiału oraz jego przewodność cieplną. Gatunki grzybów należące do typu Basidiomycota (rysunek 1) charakteryzują się szczególnie korzystnymi właściwościami w kontekście wytwarzania kompozytów na bazie grzybni. Wynika to z wielu cech biologicznych i biochemicznych sprzyjających zarówno skutecznej kolonizacji substratów lignocelulozowych, jak i formowaniu stabilnych struktur kompozytowych.

Szczególne uwagę badaczy zwracają grzyby białej zgnilizny z grupy Basidiomycota, mające unikatową zdolność do rozkładu ligniny – składnika, który pozostaje odporny na działanie większości mikroorganizmów. Jedynie wąska grupa grzybów białej zgnilizny potrafi efektywnie degradować zarówno ligninę, jak i polisacharydy ścian komórkowych roślin. Gatunki należące do rzędów Agaricales i Polyporales zostały zidentyfikowane jako szczególnie obiecujące w produkcji biokompozytów na bazie grzybni [2].

Spośród licznych gatunków największy potencjał wykazuje *Pleurotus ostreatus* (bocznik ostrygowaty), który wytwarza silnie rozgałęzioną, włóknistą sieć strzępek dostosowywaną pod względem właściwości fizyczno-chemicznych w zależności od warunków inkubacji oraz rodzaju podłoża [3]. Kompozyty bazujące na tym gatunku cechują się jednymi z najniższych

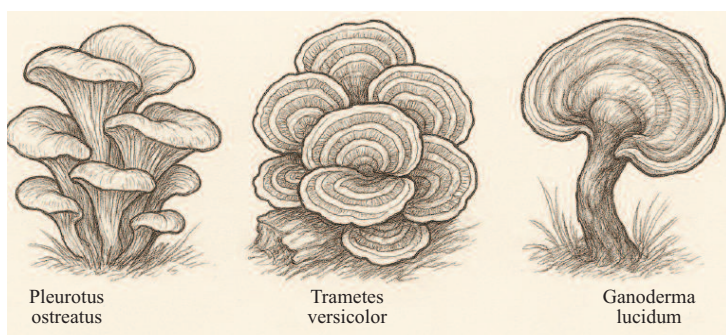


Fig. 1. Overview of fungal species used in insulation composites
Rys. 1. Zestawienie grzybów mających zastosowanie w kompozytach izolacyjnych

cularly suitable for the production of mycelium-based composites due to their biological and biochemical characteristics that enable effective substrate colonization and the formation of stable composite structures.

Special attention has been paid to white-rot fungi of the Basidiomycota group, which possess a unique ability to degrade lignin – a component resistant to most microorganisms. Only a narrow range of white-rot fungi can efficiently decompose both lignin and the polysaccharides of plant cell walls. Species belonging to the orders Agaricales and Polyporales have been identified as particularly promising for mycelium-based biocomposite production [2].

Among numerous species, *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom) shows the greatest potential, producing a highly branched, fibrous hyphal network whose physicochemical properties can be adapted depending on incubation conditions and substrate type [3]. Composites based on this species exhibit some of the lowest thermal conductivity values. For example, *P. ostreatus* composites grown on wheat straw achieve exceptionally low thermal conductivity of $0.032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ at a density of 56.6 kg/m^3 [9]. These composites also show good acoustic properties, with sound absorption between 87 – 99% at 1000 Hz [10]. Similarly promising results have been obtained for *Trametes versicolor* (turkey tail fungus), which demonstrates selective biodegradation of softwood components, preferentially decomposing hemicellulose and lignin while preserving the cellulose structure [11]. Composites produced with this species show thermal conductivity in the range of $0.0404 - 0.0578 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, depending on the substrate used, and compressive strength between $0.28 - 1.32 \text{ MPa}$ [12].

Ganoderma lucidum (reishi mushroom) exhibits high mechanical strength and the ability to decompose hard lignin-rich residues. Insulating composites based on this species have a thermal conductivity range of $0.048 - 0.053 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ at a density of $131 - 142 \text{ kg/m}^3$ (straw substrate) [13]. Although its conductivity is slightly higher than that of other species, these materials demonstrate improved mechanical performance, achieving compressive strengths between $0.5 - 1.5 \text{ MPa}$ [14].

The selection of an appropriate substrate is crucial for the physical and mechanical properties of the final composite. Different types of lignocellulosic biomass vary in chemical composition, fiber structure, and susceptibility to fungal colonization, directly affecting porosity, thermal conductivity, and strength. Photo 2 presents the most commonly used lignocellulosic substrates in mycelium-based composites, while Figure 2 illustrates thermal conductivity results obtained for various substrate – fungus combinations.

Wheat straw is one of the most extensively studied substrates due to its long fibers and porous structure, which facilitate the formation of lightweight, highly porous composites. Composites based on wheat straw exhibit excellent thermal insulation properties. For *Pleurotus ostreatus*, the thermal conductivity is $\lambda = 0.032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ at 56.6 kg/m^3 , whereas for *Trametes versicolor* it is $\lambda = 0.0419 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ at 94 kg/m^3 [9, 12]. Pre-treatment of straw with a 1% NaOH solu-

wartości współczynnika przewodzenia ciepła. Kompozyty wytwarzane przez ten gatunek grzyba na bazie słomy pszennej charakteryzują się wyjątkowo małym współczynnikiem przewodzenia ciepła, wynoszącym $0,032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ przy gęstości $56,6 \text{ kg/m}^3$ [9]. Kompozyty te wykazują również dobre właściwości akustyczne z absorpcją dźwięku na poziomie 87 – 99% przy częstotliwości 1000 Hz [10]. Równie obiecujące rezultaty uzyskuje się w przypadku *Trametes versicolor* (wrośniaka różnobarwnego), który wykazuje zdolność do selektywnej biodegradacji komponentów drewna iglastego, preferencyjnie rozkładając hemicelulozę i ligninę z jednoczesnym zachowaniem struktury celulozowej [11]. Kompozyty z grzybni tego gatunku charakteryzują się przewodnością cieplną $0,0404 - 0,0578 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ w zależności od zastosowanego substratu. Materiały te wykazują również dobrą wytrzymałość na ściskanie, a mianowicie $0,28 - 1,32 \text{ MPa}$ [12].

Ganoderma lucidum (lakownica lśniąca) charakteryzuje się dużą wytrzymałością mechaniczną oraz zdolnością do rozkładu twardych ligninowych odpadów. Kompozyty izolacyjne na bazie tego gatunku mają przewodność cieplną $0,048 - 0,053 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ przy gęstości substratu słomianego $131 - 142 \text{ kg/m}^3$ [13]. Choć przewodność cieplna jest nieco większa niż poprzednich gatunków, a ponadto materiały te wyróżniają się lepszymi właściwościami mechanicznymi, osiągając wytrzymałość na ściskanie $0,5 - 1,5 \text{ MPa}$ [14].

Wybór odpowiedniego substratu ma istotny wpływ na właściwości fizyczne i mechaniczne końcowego kompozytu. Różne typy biomasy lignocelulozowej wykazują zróżnicowany skład chemiczny, strukturę włókien oraz stopień podatności na kolonizację przez grzybnie, co bezpośrednio wpływa na porowatość, przewodność cieplną i wytrzymałość materiału. Na fotografii 2 przedstawiono najczęściej stosowane substraty lignocelulozowe stosowane w kompozytach na bazie grzybni, a rysunek 2 ilustruje przewodność cieplną kompozytów uzyskaną z wykorzystaniem poszczególnych substratów oraz omówionych gatunków grzybów.

Słoma pszena stanowi jeden z najczęściej badanych substratów lignocelulozowych ze względu na długie włókna i porowatą strukturę sprzyjającą tworzeniu lekkich, wysokoporowatych kompozytów, które osiągają bardzo dobre właściwości termoizolacyjne. W przypadku *Pleurotus ostreatus* przewodność cieplna wynosi $\lambda = 0,032 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ przy gęstości $56,6 \text{ kg/m}^3$, natomiast w przypadku *Trametes versicolor* $\lambda = 0,0419 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ przy gęstości 94 kg/m^3 [9, 12]. Istotne znaczenie ma wstępna obróbka słomy przez odkrzemianie roztworem 1% NaOH, która usuwa ok. 35% krzemu i znacznie poprawia właściwości materiału [15]. Słoma niepoddana takiej obróbce wytwarza materiały o gęstości $192 - 277 \text{ kg/m}^3$, co negatywnie wpływa na właściwości izolacyjne.

Konopie przemysłowe dostarczają zdrewniałych paździerz, które okazały się znakomitą substratem do materiałów grzybowych. Kompozyty na bazie paździerzy konopnych są lekkie i bardzo porowate ($76,7 \pm 2,0\%$), dzięki czemu w przypadku *Trametes versicolor* osiągają $\lambda = 0,0404 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ przy gęstości 99 kg/m^3 [12]. Materiały te charakteryzują się również dosyć dużą wytrzymałością na ściskanie, a mianowi-

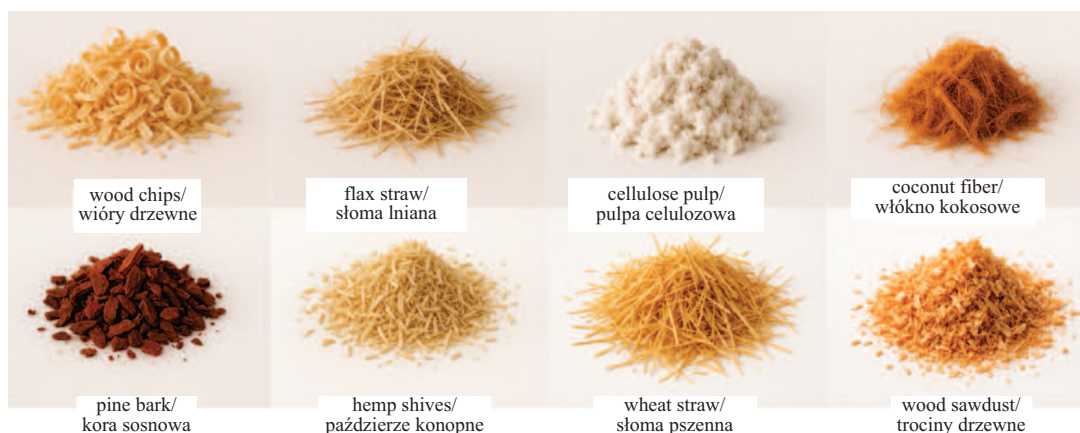


Photo 2. Common substrates used in mycelium-based composites

Fot. 2. Popularne substraty w kompozytach na bazie grzybní

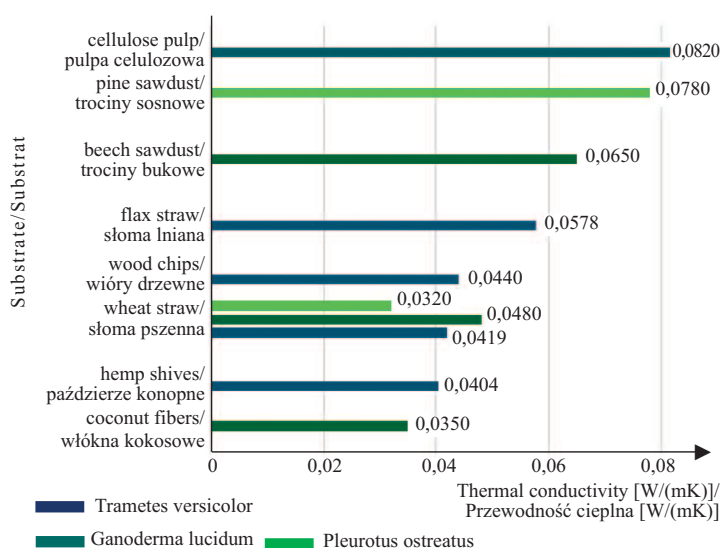


Fig. 2. Thermal conductivity of composites depending on substrate type and fungal species [9, 10, 12 – 14, 17, 19, 20]

Rys. 2. Przewodność cieplna kompozytów w zależności od substratu i gatunku grzyba [9, 10, 12 – 14, 17, 19, 20]

tion (desilication) removes approximately 35% of silicon and significantly improves thermal performance [15]. Untreated straw results in materials with densities between 192 – 277 kg/m³, negatively affecting insulation performance.

Industrial hemp provides woody shives (stem cores) that have proven to be excellent substrates for fungal materials. Hemp-shive-based composites are lightweight and highly porous ($76.7 \pm 2.0\%$), achieving a low thermal conductivity of $\lambda = 0.0404$ W/(m·K) at 99 kg/m³ for *Trametes versicolor* [12]. These materials also exhibit relatively high compressive strength (0.51 – 1.19 MPa) [16]. Flax straw, containing both fibers and shives, is similar to hemp but has a finer structure and higher cellulose content.

Composites made from flax show thermal conductivity of $\lambda = 0.0578$ W/(m·K) at a density of 135 kg/m³ (*Trametes versicolor*) [12]. Their compressive strength ranges from

0.51 – 1.19 MPa [16]. Paździerz konopne są chłonne i łatwo kolonizowane przez grzybní, choć wymagają odpowiedniej wilgotności w początkowej fazie wzrostu.

Słoma lniana, obejmująca włókna i paździerz, stanowi substrat zbliżony do konopi, ale o drobniejszej strukturze i większej zawartości celulozy. Kompozyty na jej bazie charakteryzują się przewodnością cieplną $\lambda = 0.0578$ W/(m·K) przy gęstości 135 kg/m³ w przypadku *Trametes versicolor* [12]. Wytrzymałość na ściskanie materiałów lnianych wynosi 0.28 – 1.32 MPa, co jest porównywalne z innymi substratami lignocelulozowymi. Kompozyty lniane wyróżniają się ponadto jasną barwą, brakiem zapachu oraz dobrą izolacyjnością akustyczną.

Włókno kokosowe (coir), pozyskiwane z kory i łupiny orzecha kokosowego, jest interesującym substratem do kompozytów ze względu na sprężystość, odporność na biodegradację oraz niewielką przewodność cieplną. Kompozyty na bazie włókna kokosowego i grzybní *Ganoderma lucidum* wykazują bardzo dobre właściwości izolacyjne, wynikające z dużej porowatości struktury i efektywnego spajania fazy lignocelulozowej przez grzybní. W badaniach eksperymentalnych uzyskano przewodność cieplną kompozytów z dominującym udziałem włókien kokosowych, rzędu 0.035 ± 0.008 W/(m·K) [17]. Struktura materiału cechowała się dużą mikro- i mezoporowatością, sprzyjając efektywnej izolacji cieplnej w temperaturze zbliżonej do eksploatacyjnej. Kompozyty te zachowały przy tym korzystną biodegradowalność i mały ślad środowiskowy. Ich ograniczeniem pozostaje niewielka wytrzymałość mechaniczna, typowa w przypadku luźnych i silnie porowatych struktur biokompozytowych [17].

Kora sosnowa stanowi wyzwanie jako substrat do wykonywania kompozytów grzybníowych ze względu na obecność naturalnych związków antygrzybiczych, takich jak taniny i żywice. Charakteryzuje się mniejszą wartością odżywczą w porównaniu z innymi substratami lignocelulozowymi, co skutkuje ograniczoną i często nierównomierną kolonizacją przez grzybní oraz wydłużonym czasem inkubacji. Mimo tych ograniczeń, badania wykazują możliwość wykorzystania kory jako komponentu w mieszankach substrato-

0.28 – 1.32 MPa, comparable to other lignocellulosic substrates. Flax composites are also characterized by a light color, neutral odor, and good acoustic insulation.

Coconut fiber (coir), derived from coconut husk, is an attractive substrate due to its elasticity, biodegradation resistance, and relatively low thermal conductivity. Composites made from coir and *Ganoderma lucidum* exhibit excellent insulation performance resulting from high porosity and efficient bonding of the lignocellulosic phase by the mycelium. Experimental studies report thermal conductivity values around 0.035 ± 0.008 W/(m·K) for composites with a dominant coir content [17]. The material structure showed high micro- and mesoporosity, enhancing thermal insulation under near-operational temperature conditions. However, their mechanical strength remains relatively low, typical of loose and highly porous biocomposites [17].

Pine bark poses challenges as a substrate due to the presence of antifungal compounds such as tannins and resins. Its lower nutritional value compared to other substrates results in limited and uneven colonization and prolonged incubation times. Nevertheless, studies confirm that bark can be used as a component in substrate mixtures, improving moisture and fire resistance owing to its natural hydrophobic properties [18].

Cellulose pulp, derived from recycled paper or as a by-product of the paper industry, has a high cellulose content and fine structure favorable for mycelial growth. Composites based on this substrate exhibit higher density ($250 - 370$ kg/m³) and thermal conductivity in the range of $0.08 - 0.09$ W/(m·K), placing them among heavier insulation materials. Their compact structure, however, provides higher compressive strength ($0.15 - 0.45$ MPa) than that of lightweight polymer foams [19].

Wood sawdust is a popular substrate due to its availability as a by-product of wood processing. Pine sawdust-based composites display higher density (≈ 343 kg/m³) and improved mechanical properties, achieving compressive strength up to 0.75 MPa for *Pleurotus ostreatus* [20]. However, their increased density results in higher thermal conductivity, limiting their efficiency for high-performance insulation applications.

Wood chips form composites with porosity exceeding 90% for *Trametes versicolor*, achieving a thermal conductivity of $\lambda = 0.044$ W/(m·K) and compressive strength of 0.14 MPa [12]. Due to their larger particle size, mycelium tends to grow mainly on their surface, resulting in less uniform internal filling.

Comparison with Conventional Insulation Materials

Conventional insulation materials differ significantly in production processes and environmental properties. Expanded (EPS) and extruded polystyrene (XPS) are derived from petrochemical sources, while mineral wool is produced in an energy-intensive melting process at temperatures exceeding 1500°C [21]. In contrast, **mycelium-based**

wych, gdzie działa jako dodatek zwiększający odporność na wilgoć i ogień dzięki naturalnym właściwościom hydrofobowym [18].

Pulpa celulozowa (miazga drzewna), pozyskiwana z recyklingu makulatury lub jako produkt uboczny przemysłu papierniczego, charakteryzuje się dużą zawartością celulozy i drobną strukturą sprzyjającą intensywnemu wzrostowi grzybnii. Kompozyty na jej bazie mają gęstość $250 - 370$ kg/m³ oraz przewodność cieplną $0,08 - 0,09$ W/(m·K), co plasuje je wśród cięższych materiałów izolacyjnych. Jednocześnie zagęszczona struktura zapewnia wytrzymałość na ściskanie ($0,15 - 0,45$ MPa), przewyższającą typowe wartości w przypadku lekkich pianek izolacyjnych [19].

Trociny drzewne stanowią popularny substrat kompozytów grzybninowych ze względu na łatwą dostępność jako odpad z przemysłu drzewnego. Kompozyty na bazie trocin sosnowych charakteryzują się gęstością ok. 343 kg/m³ i odpowiednio lepszymi właściwościami mechanicznymi, osiągając wytrzymałość na ściskanie do $0,75$ MPa w przypadku *Pleurotus ostreatus* [20]. Ze względu na zwiększoną gęstość, materiały te wykazują większą przewodność cieplną w porównaniu z substratami włóknistymi (rysunek 2), co stanowi istotne ograniczenie w kontekście wymagań dotyczących maksymalnej efektywności termoizolacyjnej.

Wióry drzewne tworzą kompozyty o porowatości przekraczającej 90% w przypadku *Trametes versicolor*, osiągając przewodność cieplną $\lambda = 0,044$ W/(m·K) przy wytrzymałości na ściskanie $0,14$ MPa [12]. Ze względu na duże wymiary cząstek, grzybnia trudniej penetruje ich wnętrze i zwykle rozwija się przede wszystkim na powierzchni, co skutkuje mniej jednolitym wypełnieniem.

Porównanie z konwencjonalnymi materiałami izolacyjnymi

Tradycyjne materiały termoizolacyjne charakteryzują się znacząco odmiennymi procesami produkcyjnymi i właściwościami ekologicznymi. Polistyren ekspandowany (EPS) i ekstrudowany (XPS) wytwarzane są z surowców petrochemicznych, podczas gdy wełna mineralna powstaje w energochłonnym procesie przetapiania surowców mineralnych w temperaturze przekraczającej 1500°C [21]. W przeciwieństwie do materiałów konwencjonalnych, **kompozyty na bazie grzybnii** stanowią w pełni odnawialny zasób, wpisujący się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym, pod warunkiem lokalnego pozyskiwania surowców oraz zastosowania niskoemisyjnych technologii przetwórczych [22, 23].

Ocena wpływu środowiskowego w całym cyklu życia wykazuje wyraźną przewagę kompozytów na bazie grzybnii nad konwencjonalnymi materiałami izolacyjnymi. Charakteryzują się one wyjątkowo małą energią wbudowaną oraz jednym z najniższych potencjałów ocieplenia globalnego (Global Warming Potential, GWP) spośród analizowanych rozwiązań. Ślad węglowy polistyrenów ekspandowanego (EPS) i ekstrudowanego (XPS) może przekraczać wartości typowe

composites represent a fully renewable resource consistent with circular economy principles – provided local raw materials and low-emission processing technologies are used [22, 23].

Life cycle assessment (LCA) studies demonstrate a clear environmental advantage of mycelium-based composites over conventional insulation materials. They exhibit extremely low embodied energy and among the lowest Global Warming Potential (GWP) values reported. The carbon footprint of EPS and XPS may exceed that of mycelium composites by up to two orders of magnitude, primarily due to petrochemical synthesis and the use of high-GWP blowing agents [21].

Mycelium-based insulation composites are fully biodegradable under industrial composting and natural conditions, with degradation times not exceeding a few months. This process enriches the soil with organic matter and contributes to carbon sequestration. Polystyrene materials, by contrast, have very limited biodegradability, and their thermal disposal can release styrene and pyrolysis products of flame retardants, posing risks to the environment and public health [24]. Mineral wool, while partially recyclable, presents occupational hazards due to respirable fibers emitted during installation and removal [23].

Summary

This paper presents a comprehensive analysis of mycelium-based insulation composites as an innovative and sustainable solution for energy-efficient construction. It details the biological manufacturing process, including substrate preparation, inoculation, incubation, and thermal stabilization. Based on peer-reviewed data, it has been demonstrated that the physical and thermal properties of the composites depend primarily on the fungal species and substrate type.

The best insulation performance ($\lambda = 0.032\text{--}0.044\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) is achieved using fibrous substrates such as wheat straw and hemp shives colonized by *Pleurotus ostreatus* and *Trametes versicolor*. These species form composites with high porosity, low density, and good acoustic insulation. *Ganoderma lucidum* produces materials with higher mechanical strength (up to 1.5 MPa) but slightly higher thermal conductivity.

Compared with conventional insulation materials such as EPS, XPS, or mineral wool, mycelium-based composites exhibit a significantly lower carbon footprint, lower embodied energy, and full biodegradability. Utilizing local agricultural residues and low-emission processing technologies, these materials align with the goals of sustainable development and the circular economy. Their application could substantially reduce the environmental impact of the construction sector, particularly in the context of its transition toward climate neutrality.

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

Received: 04.09.2025
Revised: 06.10.2025
Published: 23.12.2025

w przypadku kompozytów grzybniovych nawet stukrotnie, co wynika gównie z energochłonnej petrochemicznej syntezy oraz zastosowania gazów spieniających o wysokim potencjale cieplarnianym [21].

Kompozyty izolacyjne na bazie grzybni wykazują pełną biodegradowalność w warunkach kompostowania przemysłowego oraz naturalnej biodegradacji, z czasem rozkładu nieprzekraczającym kilku miesięcy. Proces ten prowadzi do wzbogacenia gleby w materię organiczną, przyczyniając się do sekwestracji węgla w glebie. Materiały polistyrenowe charakteryzują się natomiast bardzo ograniczoną biodegradowalnością, a ich utylizacja termiczna może prowadzić do emisji styrenu oraz produktów pirolizy środków uniepalniających, stanowiących potencjalne zagrożenie dla środowiska naturalnego i zdrowia publicznego [24]. Wełna mineralna, pomimo możliwości częściowego recyklingu, stwarza problemy związane z emisją respirabilnych włókien podczas montażu i demontażu [23].

Podsumowanie

Artykuł przedstawia kompleksową analizę kompozytów izolacyjnych na bazie grzybni jako innowacyjnego i zrównoważonego rozwiązania dla budownictwa energooszczędnego. Opisano szczegółowo biologiczny proces wytwarzania tych materiałów, obejmujący przygotowanie lignocelulozowych substratów, inokulację grzybnią, inkubację oraz proces stabilizacji termicznej. Na podstawie danych z literatury wykazano, że właściwości fizyczne i termiczne kompozytów zależą przede wszystkim od doboru gatunku grzyba oraz rodzaju podłoża.

Najlepsze parametry izolacyjne ($\lambda = 0,032\text{--}0,044\text{ W/m}\cdot\text{K}$) uzyskuje się w przypadku zastosowania substratów włóknistych, takich jak słoma pszenna i paździerz konopne, kolonizowanych przez *Pleurotus ostreatus* i *Trametes versicolor*. Gatunki te tworzą kompozyty o większej niż poprzednio porowatości, małej gęstości i dobrej izolacyjności akustycznej. Z kolei *Ganoderma lucidum* pozwala na uzyskanie materiałów o wyższej wytrzymałości mechanicznej (do 1,5 MPa), przy nieco podwyższonej przewodności cieplnej.

W porównaniu z konwencjonalnymi materiałami izolacyjnymi, takimi jak EPS, XPS czy wełna mineralna, kompozyty grzybniove wyróżniają się znacznie mniejszym śladem węglowym, niższą energią wbudowaną oraz pełną biodegradowalnością. Dzięki możliwości wykorzystania lokalnych surowców odpadowych i niskoemisyjnej technologii produkcji, materiały te wpisują się w cele zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym. Ich zastosowanie może w znacznym stopniu ograniczyć środowiskowy wpływ budownictwa, szczególnie w kontekście transformacji sektora w kierunku neutralności klimatycznej.

Wszystkie ilustracje zamieszczone w artykule zostały opracowane autorsko i posiadają pełne prawa do wykorzystania w celach komercyjnych i publikacyjnych.

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

Artykuł wpłynął do redakcji: 04.09.2025 r.
Otrzymał poprawiony po recenzjach: 06.10.2025 r.
Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Lima L, Trindade E, Alencar L, Alencar M, Silva L. Sustainability in the Construction Industry: A Systematic Review of the Literature. *J. Clean. Prod.* 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125730.
- [2] Babenko M, Kononets Y, Bartos P, Pont U, Spalek F, Zoubek T, Kriz P. Perspectives of Insulating Biodegradable Composites Derived from Agricultural Lignocellulosic Biomass and Fungal Mycelium: A Comprehensive Study of Thermal Conductivity and Density Characteristics. *Biomimetics*. 2024. DOI: 10.3390/biomimetics9110707.
- [3] Islam MR, Tudryn G, Bucinell R, Schadler L, Picu RC. Morphology and Mechanics of Fungal Mycelium. *Sci. Rep.* 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-13295-2.
- [4] Appels FVW, Camere S, Montalti M, Karana E, Jansen KMB, Dijksterhuis J, Krijgsheld P, Wösten HAB. Fabrication Factors Influencing Mechanical, Moisture- and Water-Related Properties of Mycelium-Based Composites. *Mater. Des.* 2019. DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.027.
- [5] Pelletier MG, Holt GA, Wanjura JD, Bayer E, McIntyre G. An Evaluation Study of Mycelium Based Acoustic Absorbers Grown on Agricultural By-Product Substrates. *Ind. Crops Prod.* 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.09.008.
- [6] Wösten HAB. Filamentous Fungi for the Production of Enzymes, Chemicals and Materials. *Curr. Opin. Biotechnol.* 2019. DOI: 10.1016/j.copbio.2019.02.010.
- [7] Attias N, Danai O, Abitbol T, Tarazi E, Ezov N, Pereman I, Grobman YJ. Mycelium Bio-Composites in Industrial Design and Architecture: Comparative Review and Experimental Analysis. *J. Clean. Prod.* 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119037.
- [8] Al-Qahtani S, Koç M, Isaifan R.J. Mycelium-Based Thermal Insulation for Domestic Cooling Footprint Reduction: A Review. *Sustain.* 2023, 15, doi:10.3390/su151713217.
- [9] Aravena M, Almonacid-Muñoz L, Rojas-Herrera C, Herrera H, Cárdenas-Ramírez JP, Veliz Reyes A, Sagredo-Saez C. Evaluation of the Thermal Insulation Potential of Post-Harvest Blocks Using the Native Strain of the Edible Mushroom *Pleurotus Ostreatus*. *Buildings*. 2024. DOI: 10.3390/buildings14123908.
- [10] Gezer ED, Kuştaş S. Acoustic and Thermal Properties of Mycelium-Based Insulation Materials Produced from Desilicated Wheat Straw – Part B. *BioResources*. 2024. DOI: 10.15376/biores.19.1.1348-1364.
- [11] Vašatko H, Gosch L, Jauk J, Stavric M. Basic Research of Material Properties of Mycelium-Based Composites. *Biomimetics*. 2022. DOI: 10.3390/biomimetics7020051.
- [12] Elsacker E, Vandeloock S, Brancart J, Peeters, E, De Laet L. Mechanical, Physical and Chemical Characterisation of Mycelium-Based Composites with Different Types of Lignocellulosic Substrates. *PLoS One*. 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0213954.
- [13] Kuştaş S, Gezer ED. Physical and Mechanical Properties of Mycelium-Based Insulation Materials Produced from Desilicated Wheat Straws – Part A. *BioResources*. 2024. DOI: 10.15376/biores.19.1.1330-1347.
- [14] Yang ZJ, Zhang F, Still B, White M, Amstislavski P. Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. *J. Mater. Civ. Eng.* 2017. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001866.
- [15] Haneef M, Ceseracciu L, Canale C, Bayer IS, Heredia-Guerrero JA, Athanassiou A. Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Sci. Rep.* 2017. DOI: 10.1038/srep41292.
- [16] Lelivelt R, Lindner G, Teuffel P, Lamers H. The Production Process and Compressive Strength of Mycelium-Based Materials. 2015.
- [17] De G, Yang L, Lee J, Wu YH, Tian Z, Qin, Z. Mycelium-Coir-Based Composites for Sustainable Building Insulation. *J. Mater. Chem. A* 2025, 13, doi:10.1039/d4ta07869a.
- [18] Sydor M, Bonenberg A, Doczekalska B, Cofta G. Mycelium-Based Composites in Art, Architecture, and Interior Design: A Review. *Polymers (Basel)*. 2022. DOI: 10.3390/polym14010145.
- [19] Sun W, Tajvidi M, Hunt CG, McIntyre G, Gardner DJ. Fully Bio-Based Hybrid Composites Made of Wood, Fungal Mycelium and Cellulose Nanofibrils. *Sci. Rep.* 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-40442-8.
- [20] Abhijith R, Ashok A, Rejeesh CR. Sustainable Packaging Applications from Mycelium to Substitute Polystyrene: A Review. *Mater. Today Proc.* 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.09.211.
- [21] Papadopoulos AM. State of the Art in Thermal Insulation Materials and Aims for Future Developments. *Energy Build.* 2005. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.05.006.
- [22] Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni SA. Review of Unconventional Sustainable Building Insulation Materials. *Sustain. Mater. Technol.* 2015. DOI: 10.1016/j.susmat.2015.05.002.
- [23] Kellenberger D, Althaus HJ. Relevance of Simplifications in LCA of Building Components. *Build. Environ.* 2009. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.06.002.
- [24] Al-Salem SM, Lettieri P, Baeyens J. Recycling and Recovery Routes of Plastic Solid Waste (PSW): A Review. *Waste Manag.* 2009. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.06.004.