Materiał wyhodowany z grzybów – przyszłość architektury i budownictwa (praca przeglądowa)



prof. dr hab. inż.
AGATA MARKOWSKA-SZCZUPAK
Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ORCID: 0000-0002-3034-0263



dr inż. arch.
PIOTR GRADZIŃSKI
Wydział Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ORCID: 0000-0002-5713-2309

inż. arch.
OLIWIA HAJŁASZ
Wydział Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ORCID: 0000-0009-0007-1649

inż. arch.
SZYMON KOWALSKI
Wydział Architektury
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
ORCID: 0000-0009-0004-4557

Artykuł przedstawia badania nad wykorzystaniem grzybni do produkcji zrównoważonych materiałów budowlanych, omawiając gatunki grzybów, metody hodowli i rodzaje uzyskiwanych kompozytów. Podkreślono korzyści środowiskowe, takie jak redukcja emisji CO_2 i odpadów, oraz potencjał tych materiałów w promowaniu ekologicznych technologii. Analizy przypadków wskazują na istotną rolę biokompozytów z grzybni w transformacji architektury i budownictwa w duchu zrównoważonego rozwoju.

Architektura i budownictwo zawsze były najwyraźniejszym wskaźnikiem postępu cywilizacyjnego. Dostarczanie infrastruktury mieszkaniowej ma kluczowe znaczenie dla zaspokajania ludzkich potrzeb i łagodzenia problemów związanych z ubóstwem. W obliczu globalnych problemów środowiskowych powinno się ono odbywać w zgodzie z zasadami zrównoważonego rozwoju i harmonijnym łączeniem aspektów ekologicznych, ekonomicznych, a także społecznych [1]. Sektor budowlany odpowiada za 37% całkowitej emisji ditlenku węgla. Prawie 28% pochodzi z emisji eksploatacyjnych wynikających z energii koniecznej do ogrzewania, chłodzenia i zasilania budynków w energię elektryczną. Pozostałe 11% obejmuje procesy wytwarzania materiałów budowlanych (np. stali, cementu). Szacuje się, że gdy populacja ludzi na świecie zbliży się do 10 miliardów, globalna emisja z sektora budownictwa podwoi swoją wielkość i będzie odpowiadać za połowę całkowitego śladu węglowego [2]. Biorąc powyższe pod uwagę, można stwierdzić, że sektor budownictwa wymaga natychmiastowej uwagi naukowców i inżynierów. Jednym z rozwiązań dla „zielonego budownictwa" jest wprowadzanie praktyk obiegu zamkniętego, polegających na redukcji odpadów, recyklingu materiałów budowlanych (np. cegieł) oraz stosowaniu zrównoważonych materiałów, np. biodegradowalnego szkła, opon lub biomateriałów (np. słomy, korka itd.). Inną innowacyjną alternatywą zyskującą coraz większą popularność są grzybnie (łac. mycelium) – struktury tworzące ciało grzybów, zbudowane ze strzępek. Materiały budowlane na bazie grzybni są biodegradowalne, zużywają mało energii i mają niski ślad węglowy. Są również stosunkowo tanie i oferują dobrą izolację ogniową, termiczną i akustyczną [3].

Metodyka doboru źródeł

Celem niniejszej pracy jest przegląd aktualnych trendów w zakresie wykorzystania grzybni w architekturze i budownictwie. W szczególności skupiono się na właściwościach grzybów stosowanych do otrzymania materiałów budowlanych, technologiach produkcji kompozytów opartych na grzybni MBCs oraz wyzwaniach związanych z ich implementacją. Dobór źródeł został przeprowadzony w sposób zgodny z przyjętym celem pracy. Uwzględniono tu artykuły z czasopism recenzowanych w języku polskim i angielskim oraz źródeł internetowych, prezentujących przykłady materiałów oraz zastosowań architektonicznych z ostatniego dziesięciolecia.

Tab. 1. Gatunki grzybów najczęściej stosowane do wytwarzania biokompozytów

Rodzaj grzyba	charakterystyka
Lakownica sp. (Ganoderma P. Karst.)	Rodzaj obejmuje ponad 250 gatunków; wiele z nich rośnie w strefie tropikalnej (w Europie w 7 gatunków); rosną u podstawy pni drzew lub na odsłoniętych korzeniach, mają szczątkowy trzon podtrzymujący kapelusz, którego kolor jest biały, żółty, brązowy, czerwony lub ciemno-fioletowy, często z jasną obwódką; grzyby saprofityczne i pasożyty powodujące białą zgniliznę drewna, najczęściej stosowanym gatunkiem jest Lakownica żółtawa (Ganoderma lucidum (Curtis) P. Karst.) [14], [15], [16]
Boczniak sp. (Pleurotus P. Kumm.)	Grzyby Pleurotus występują w klimacie tropikalnym i umiarkowanym na całym świecie; należą do grzybów pasożytniczych i saprotroficznych żyjących na drewnie; charakteryzują się dużymi i mięsistymi owocnikami, trzony przeważnie krótkie, osadzone bocznie; większość gatunków jest jadalna; powodują białą zgniliznę drewna, najczęściej jedzony grzyb na świecie; w Polsce jest uprawiany i znajduje się w sprzedaży boczniak ostrygowaty (Pleurotus ostreatus (Jacq.) P. Kumm.) [14]
Wrośniak sp. (Trametes sp.(Pers.) Fr.)	Szeroki zasięg występowania; ok. 195 gatunków; grzyby nadrzewne, saprotroficzne; owocniki roczne lub dwuletnie, często wachlarzowate, wyrastające pojedynczo lub w grupach, o konsystencji od elastycznej do twardej, powodują białą zgniliznę drewna liściastego, rzadko iglastego [14], [17], [18]

Grzyby wykorzystywane do wytwarzania materiałów budowlanych

Charakterystyka grzybów i właściwości wytwarzanej przez nie grzybni

Grzyby to takson, którego gatunki mogą zasiedlić praktycznie wszystkie ekosystemy na świecie. Występują one jako wolnożyjące lub symbiotyczne organizmy jednokomórkowe lub wielokomórkowe, o zróżnicowanej morfologii, rozmiarze i sposobie życia. Szacuje się, że na całym świecie występuje ok. 2,2 do 3,8 miliona gatunków grzybów, w tym dokładny opis sporządzono tylko około 148 000. Liczba ta szybko się zmienia, gdyż co roku opisuje się średnio 1000–1500 nowych form. Grzyby stanowią ponad 25% biomasy na Ziemi [4]. Grzyby należą do organizmów eukariotycznych, których komórki mają jedno jądro otoczone błoną. Ze względu na rozmiary możemy je podzielić na grzyby makroskopowe (np. pieczarki, smardze itp.) i mikroskopowe (np. drożdże, pleśnie). Podział ten jest umowny, bo zarówno grzyby makroskopowe, jak i mikroskopowe wytwarzają struktury, które są niewidoczne dla ludzkiego oka, np. zarodniki czy nitkowate, wegetatywne komórki zwane strzępkami. Strzępki tworzą plechę (ciało wegetatywne grzyba), która najczęściej jest dobrze widoczna [5]. Cechą, która umieszcza grzyby w innym królestwie niż rośliny i bakterie, jest obecność chityny w ich ścianach komórkowych. Grzyby, podobnie jak zwierzęta, są heterotrofami i nie przeprowadzają fotosyntezy. Źródłem węgla i energii są dla nich nieożywione substraty organiczne (grzyby saprofityczne) lub żywy materiał organiczny (grzyby pasożytnicze). Grzyby charakteryzują się wysoką odpornością na warunki stresowe, zdolnością do adaptacji do różnych środowisk, co ułatwia im współistnienie z wieloma organizmami. Szacuje się, że ponad 80% roślin na naszej planecie żyje w symbiozie z grzybami. Jednak niektóre gatunki grzybów mogą powodować biodeterioracją materiałów budowlanych. Liczne gatunki są chorobotwórcze dla ludzi, zwierząt i roślin [6].

Zasadniczą częścią grzybni są rurkowate komórki, które nazywa się strzępkami. Ich długość wynosi od kilku mikronów do kilku metrów, a średnica nie przekracza 0,03 mm [7]. Grzybnia większości grzybów jest bezbarwna (szklista). Może zawierać jedno lub więcej jąder. Gęsto upakowane strzępki grzybni tworzą nibytkankę (struktura podobna do tkanek roślinnych) zwaną pseudoparenchymą. Skupiska grzybni tworzą również struktury rozrodcze (owocniki grzybów), zbite struktury nazywane podkładkami (łac. stroma) lub podziemne struktury, przypominające korzenie, nazywane ryzomorfami (łac. rhiza – korzeń i morphe – kształt). Strzępki wyrastają z zarodników (komórek rozrodczych grzybów, powstałych zarówno w wyniku rozmnażania płciowego, jak i bezpłciowego). W początkowej fazie jest to wzrost prostoliniowy, a następnie strzępki inicjują losowe rozgałęzienia, tworząc fraktalne kolonie przypominające sieć. Gęstość rozgałęzień i topologia są w dużym stopniu kontrolowane przez warunki odżywcze i środowiskowe [8]. Wewnętrzne ciśnienie turgorowe i sztywne ściany komórkowe umożliwiają strzępkom przenikanie do materiału organicznego, takiego jak odpady roślinne. Wydzielane enzymy rozkładają polimery w podłożu na cząsteczki, które mogą być wchłaniane i służyć jako składniki odżywcze. Ogromny potencjał wzrostowy sprawia, że grzybnia może pokrywać ogromne obszary, np. grzyb z rodzaju Armillaria może skolonizować nawet 10 km^2 [9]. Ze względu na funkcję grzybnię można podzielić na grzybnię substratową lub wegetatywną (ang. substrate mycelium), która wnika w podłoże i pobiera z niego wodę i składniki odżywcze, oraz grzybnię powietrzną lub rozrodczą (ang. aerial mycelium), która rozwija się na powierzchni podłoża i służy do oddychania i rozmnażania.

Pod względem chemicznym grzybnia złożona jest z biopolimerów. Charakterystycznymi składnikami ścian komórkowych strzępki są chityna, beta-glukany i białka. Mechanika strzępek (ich sztywność) jest zdeterminowana przez przestrzenne ułożenie budujących ją związków. Na zewnątrz strzępki dominują beta-glukany, które działają jak śluz, a warstwa wewnętrzna składa się z mikrofibryli chitynowych usieciowanych innymi polisacharydami i białkami. Zawartość chityny jest parametrem istotnie wpływającym na właściwości mechaniczne otrzymanej grzybni. Grzybnie różnych gatunków grzybów różnią się elastycznością, zdolnością do absorpcji wody i wytrzymałością [3]. Do najważniejszych czynników wpływających na charakterystykę strukturalną grzybni należą: dostępność składników odżywczych, temperatura otoczenia, dostęp do światła (większość grzybów lepiej rośnie bez dostępu światła), obecność tlenu oraz wilgotność. Na podłożu, które zawiera dużo łatwo dostępnych źródeł węgla, grzybnia będzie rosła szybciej, ale może charakteryzować się mniejszą wytrzymałością [10]. Dla przykładu grzybnia Pleurotus ostreatus wyhodowana na celulozie jest sztywniejsza w porównaniu do grzybni Ganoderma lucidum. Dodanie dekstrozy do podłoży na bazie celulozy powoduje powstanie bardziej elastycznych strzępek [11]. Przyjmuje się, że grzybnie wykazują właściwości mechaniczne typowe dla materiałów lignocelulozowych, takich jak drewno i korek [12]. Moduł sprężystości ścian komórkowych strzępek grzybów pleśniowych może wynosić od 110 do 140 MPa [8].

Przedstawione wyniki badań wskazują, że do tworzenia kompozytów na bazie grzybni najbardziej nadają się grzyby, które charakteryzują się szybkim i stałym wzrostem oraz mogą wykorzystywać wiele różnych odpadów organicznych jako substraty. Obecne badania koncentrują się głównie na kilku gatunkach grzybów i ograniczonej liczbie substratów [13]. Charakterystykę najczęściej stosowanych gatunków grzybów, przeznaczonych do tworzenia materiałów budowlanych, zestawiono w tabeli 1.

Zgodnie z Attias i in. (2020), według których do produkcji biokompozytów wykorzystuje się tylko 24 gatunki grzybów spośród około 30 tysięcy grzybów z klasy podstawczaków (Basidiomycetes). Biorąc to pod uwagę, potencjał badawczy jest ogromny.

Kompozyty oparte na grzybni. Sposoby otrzymywania i zastosowania

Kompozyty oparte na grzybni (ang. mycelium-based composites, MBCs) są przykładem nowej generacji zrównoważonych materiałów. Wynika to przede wszystkim

z faktu dużego potencjału w zakresie wykorzystania pozostałości rolniczych do ich produkcji. Ponadto substraty takie jak łuski ryżu, wytłoki trzciny cukrowej, fusy z kawy itp. mają najczęściej niewielką lub żadną wartość handlową. Zdarza się również, że substrat nie może być poddany tradycyjnemu recyklingowi ze względu na zbyt duże rozdrobnienie. Przykładem mogą być odpady szklane, stanowiące nawet 35% do 50% odzyskanego szkła [19].

Pomimo iż po raz pierwszy produkcję MBCs opisano w 1996 roku, zainteresowanie świata naukowego otrzymywaniem tego typu biomateriałów rozpoczęło się dopiero około dziesięć lat temu [9]. Jak wspomniano w poprzednim podpunkcie, pierwszym krokiem w produkcji użytecznych materiałów na bazie grzybni jest uzyskanie warunków umożliwiających jej wzrost. Proces wykonania MBCs rozpoczyna się od wyboru odpowiedniego substratu organicznego, który posłuży jako pożywka dla grzybni. Do najczęściej wykorzystywanych substratów należą odpady rolnicze, takie jak słoma pszeniczna, trociny, bagassa, łuski ziaren, konopie czy nawet fusy po kawie [9]. Mieszanki substratów są często wzbogacane węglowodanami i wapniem [13]. Substrat jest dokładnie oczyszczany i rozdrabniany, aby zapewnić równomierny wzrost grzybni. Następnie materiał jest sterylizowany, zazwyczaj poprzez podgrzanie go do wysokiej temperatury, aby wyeliminować konkurencyjne mikroorganizmy, które mogłyby zakłócić rozwój grzybni. Po przygotowaniu substratu wprowadza się do niego zarodniki lub fragmenty grzybni (inokulum) wybranego gatunku grzyba [20]. Szybkość kolonizacji podłoża zależy od użytego gatunku/szczepu grzyba i proporcji zaszczepianej grzybni (inokulum) do podłoża. Optymalna wielkość inokulum różni się w różnych badaniach, przy czym najczęściej stosuje się od 3 do 20% suchej masy. Wykazano, że stosowanie większych szczepionek przyspiesza kolonizację i zapobiega powstaniu zanieczyszczeń [21]. Grzybnia jest równomiernie mieszana z substratem, a następnie umieszczana w formach, które nadają przyszłym cegłom pożądany kształt i rozmiar [10]. Zmieszany substrat z wprowadzonym grzybem pozostawiany jest w stałych, optymalnych dla danego gatunku grzyba warunkach na okres paru tygodni. W ciągu tego czasu grzybnia kolonizuje substrat, tworząc sieć strzępek, która wiąże go ze sobą, tworząc jednolitą masę. Czas inkubacji oraz warunki, w jakich się on rozwija, różnią się w zależności od gatunku grzyba i wiązanego substratu. Po zakończeniu etapu inkubacji cegły wyjmowane są z form i przechodzą proces suszenia. Odbywa się on w podwyższonej temperaturze i ma na celu zatrzymanie wzrostu grzybni i utwardzenie materiału. W trakcie tego procesu materiał nabiera swoich ostatecznych właściwości mechanicznych. Wraz z przewidywanym wzrostem na rynku materiałów na bazie grzybni wiele badań jest ukierunkowanych na optymalizację wzrostu grzybów [22]. Ponieważ zaszczepiona grzybnia łączy się luźno z fazą rozproszoną substratu, na którym rośnie, otrzymywane kompozyty mają często mniejsze gęstości i moduły sprężystości niż czysta grzybnia. Ponieważ zawierają powietrze między luźno upakowanym wypełniaczem substratu, klasyfikuje się je jako pianki [12]. Innym sposobem otrzymania kompozytów grzybowych jest połączenie otrzymanej grzybni z innymi naturalnymi materiałami, takimi jak len, konopie i wiele innych [3]. Szeroka gama podłoży stosowanych do hodowli grzybów w połączeniu z różnymi metodami przetwarzania otrzymanych grzybni (np. prasowanie na gorąco, suszenie) umożliwia otrzymanie materiałów spełniających określone wymagania strukturalne i funkcjonalne, np. o wysokiej odporności ogniowej, dobrych parametrach izolacji termicznej lub akustycznej [12].

Obecnie nie istnieją specjalistyczne normy pozwalające na ocenę właściwości fizykomechanicznych biokompozytów grzybowych. Z tego powodu dostępne dane są uzyskiwane z wykorzystaniem norm stosowanych dla materiałów budowlanych, np. ASTM C 578, określającej właściwości komercyjnych płyt izolacyjnych wykonanych z polistyrenu [13]. Na tej podstawie podaje się, że średnia gęstość kompozytów grzybowych mieści się w zakresie od 59 do 318 kg/m^3; wytrzymałość na ściskanie od 1 do 570 kPa, wytrzymałość na zginanie od 4,6 do 17,9 kPa,

Tab. 2. Wybrane MBCs i sposoby ich uzyskania

Materiały oparte na grzybni MBCs	Grzyb	Sposób hodowli	Literatura
Materiały ogniotrwałe	Trametes versicolor	Podłoże do hodowli: łuski ryżowe, drobne kawałki szkła; temperatura inkubacji 25°C, wilgotność względna 50%, czas: 12 dni.	[19]
Kompozyty grzybowe	Ganoderma lucidum, Pycnoporus sanguineus	Podłoże do hodowli: drewno bukowe; I faza hodowli: temperatura od 20°C do 28°C, wilgotność od 80% do 95%, czas 5–7 dni; II faza hodowli: temperatura od 20°C do 30°C, wilgotność względna od 80% do 95%, czas 3–10 dni.	[29]
Pianka o właściwościach akustycznych	Ganoderma lucidum	Podłoże do hodowli: 56,3% mielonej słomy kukurydzianej, 27% ziarna, 2,4% maltodekstryny, 0,8% wapnia; I faza hodowli: temperatura 24–30°C, wilgotność względna 80–100%, poziom CO_2 – 5000 ppm, minimalne oświetlenie, czas: 4 dni; II faza hodowli: temperatura 15–25°C, wilgotność względna 90%, poziom CO_2 od 10 000 do 60 000 ppm, czas: 7 dni.	[30]
Cegły z grzybnią	Grzybnia uzyskana z korzeni bambusa	Podłoże do hodowli grzybni: ryż i melasa z trzciny cukrowej, temperatura pokojowa, w ciemności, czas: 33 dni.	[31]
Cegły	Oxyporus latermarginatus Isolate MG65, Megasporoporia minor, Ganoderma resinaceum	Podłoże hodowlane: ryż, słoma, temperatura 28°C, czas: 8 tygodni.	[32]
Pianki	Coprinopsis macrocephalus, Bjerkandera adusta, Flammulina velutipes, Trametes pubescens, Trichaptum biforme, Ganoderma lucidum, Pleurotus ostreatus, Fomes fomentarius	Podłoże hodowlane: ziarna żyta (gotowane 15 min), słoma pszeniczna, temperatura 28°C i wilgotność względna 80%, czas: 14 dni.	[33]
Pianki i panele prasowane na gorąco	Trametes versicolor	Podłoże hodowlane: trociny brzozowe, temperatura inkubacji 28°C, wilgotność względna 80%, czas 8–30 dni	[34].

a opór cieplny od 0,82 do 1,5 K x m^2/W [23] [24] [25]. Szerokie zakresy podanych wartości wynikają z faktu, że właściwości biokompozytu determinuje przede wszystkim gatunek grzyba i podłoże stosowane do jego hodowli, warunki wzrostu, a także sposób obróbki [26] [27].

Oprócz ograniczonych właściwości mechanicznych głównym problemem związanym z otrzymywanymi biokompozytami na bazie grzybni jest wysoka absorpcja wody. Może ona sięgać 400–550% po 24-godzinnym zanurzeniu [28]. Wysoka zdolność absorpcji wody wynika przede wszystkim z dużej ilości składnika celulozowego, który zwykle wiąże się z dużą liczbą dostępnych grup hydroksylowych [25] [27].

W tabeli 2. zestawiono wybrane przykłady materiałów MBCs oraz sposoby ich uzyskania poprzez zastosowanie różnych warunków hodowli.

Jones i in. (2018) dokonali oszacowania kosztów produkcji materiałów opartych na grzybni, produkowanych z wykorzystaniem łusek ryżowych i drobnego szkła. Na podstawie wyliczeń stwierdzili, że koszt jednostkowy 1 kg materiału, podany w dolarach australijskich ($AU), zmniejszał się wraz ze wzrostem zawartości drobnego szkła, ponieważ drobne szkło ma niższą wartość ekonomiczną na kilogram niż łuski ryżu. Ponieważ drobne szkło jest znacznie cięższe od łusek ryżu, wraz ze wzrostem udziału tego surowca następował znaczny wzrost gęstości otrzymanego materiału (kg/m^3). Powodowało to wzrost kosztów jego transportu. Uzyskane kompozyty zawierające grzybnię były znacznie tańsze (od 6 do 12 razy) i bezpieczniejsze niż dotychczas stosowane materiały budowlane [18]. Bloki na bazie grzybni są 80 razy tańsze niż bloki na bazie cementu i gipsu. Ich szacowany koszt nie przekracza 18,92 USD na m^3 [21].

Według Sydora i in. (2022) do 2021 roku zarejestrowano około 67 różnych wynalazków technologicznych dotyczących kompozytów na bazie grzybni. Najstarszy dokument wpłynął do Urzędu Patentowego i Znaków Towarowych Stanów Zjednoczonych 12 grudnia 2007 r.

Przegląd dokumentów patentowych pokazuje, że kompozyty na bazie grzybni mogą być stosowane jako materiały konstrukcyjne (np. rdzenie płyt warstwowych i wypełniacze szczelin), materiały wykończeniowe wnętrz (np. panele ścienne i podłogi), a także jako materiały do wyposażenia domu (meble i inne przenośne przedmioty) lub materiały opakowaniowe. Ze względu na dobrą odporność ogniową w przemyśle budowlanym mogą być wykorzystane jako ognioodporne izolatory termiczne i akustyczne. Biokompozyty mogą pełnić funkcję izolacyjną ze względu na niską przewodność cieplną lub funkcję pochłaniania dźwięku. Są również alternatywą dla pianek syntetycznych stosowanych w zderzakach samochodowych, drzwiach, dachach, wnękach silnika, wykładzinach bagażnika, deskach rozdzielczych i siedzeniach [35].

Na rynku materiałów budowlanych pojawiło się kilka innowacyjnych przedsiębiorstw, które produkują materiały budowlane z grzybni. Zestawienie firm i produktów przedstawiono w tabeli 3.

Należy zauważyć, że kompozyty grzybowe oferują wyjątkowo korzystny stosunek kosztów do korzyści środowiskowych. Ich produkcja jest tania, oparta na odpadach, a sam materiał jest lekki, biodegradowalny i bezpieczny. Choć mają ograniczenia mechaniczne i wysoką chłonność wody, ich potencjał w zastosowaniach izolacyjnych i dekoracyjnych jest ogromny. Zauważalny jest również fakt, że koszty początkowe mogą być wyższe niż w przypadku niektórych tradycyjnych materiałów, ale oszczędności w całym cyklu życia (np. niższe koszty energii dzięki lepszej izolacji) mogą to zrównoważyć. Wraz z rozwojem technologii i optymalizacją procesów produkcyjnych MBCs mogą stać się ważnym elementem przyszłości zrównoważonego budownictwa.

Wpływ materiałów opartych na grzybni na środowisko

Naturalne materiały w budownictwie, m.in. drewno, korek, słoma, bambus, konopie itp., są stosowane od początku istnienia ludzkości [3] [41] [42]. Niestety by korek i drewno w budownictwie mogły być traktowane jako materiały zrównoważone, konieczne jest stosowanie surowców pochodzących z lokalnych upraw certyfikowanych. W przeciwnym razie wykorzystanie produktów drewnianych i korkowych do celów budowlanych może prowadzić do wylesiania, a nawet spowodować lokalne zmiany klimatyczne [21]. Proces produkcji kompozytów z grzybni jest przyjazny dla środowiska, bo nie zawiera substancji toksycznych lub syntetycznych składników. Na końcu cyklu życia materiały te mogą być poddane recyklingowi lub kompostowaniu, co sprawia, że idealnie wpisują

Tab. 3. Wybrani producenci materiałów budowlanych z grzybni

Producent (siedziba, kraj)	Produkt /zastosowanie	Parametry kluczowe	Literatura
Evocative Design (Green Island, USA)	MycoComposite, Mushroom Packaging materiały stosowane do pakowania mebli (IKEA), procesorów (DELL)	mieszanka rozdrobnionych resztek konopi przemysłowych, połączonych grzybnią, przy minimalnym nakładzie energii i z wykorzystaniem niewielkiej ilości wody (<1% wody potrzebnej do wyprodukowania standardowego kawałka styropianu); wysoka amortyzacja wstrząsów i właściwości izolacyjne	[36]
MOGU (Inarzo, Włochy)	Panele akustyczne ścienne do zastosowań wewnętrznych MOGU Acustic (np. Wave, Fields, Kite, Aspen) panele podłogowe Pluma Kiwi	różne kolory; gęstość 100 kg/m^3; waga 0,6 do 1,1 kg; wytrzymałość na zginanie 0,05 MPa; współczynnik pochłaniania dźwięku od 0,2 do 0,8; wykonane z grzybni połączonej z naturalnymi włóknami wełnianymi z przetworzonych tekstyliów; wymiary: 500 × 500 mm, 500 × 1000 mm, 600 × 600 mm, 600 × 1200 mm, 1600 × 1200 mm; grubość 20, 30, 40 mm; gęstość 240 kg/m^3	[37]
MYCOTEX by NEFFA (Amersfoort, Holandia)	MYCOTEX SF	materiał imitujący skórę (meblową), wytwarzany w 100% z grzybni lub z dodatkiem 4% wiskozy ze sztucznego jedwabiu; 4 kolory, grubość 0,8 do 2 mm; wytrzymałość na rozciąganie >20 000 N/mm	[38]
MycoWorks (Emeryville, USA)	Tekstylia wykończeniowe Reishi™ Pebble; Reishi™ Mycelial; Reishi™ Doux	b.d	[39]
Biohm (Londyn, UK)	ORB	zrównoważony materiał izolacyjny oraz panele z grzybnią, składające się z podłoża nasączonego grzybnią, które jest następnie suszone i prasowane w celu utworzenia wytrzymałych, lekkich i przyjaznych dla środowiska paneli budowlanych; wysoka trwałość i wytrzymałość (porównywalna z materiałami konwencjonalnymi), odporność na pleśń, wilgoć i szkodniki, lepsza jakość powietrza w pomieszczeniach dzięki ich naturalnym właściwościom; pełna biodegradowalność i możliwość recyklingu po zakończeniu cyklu życia	[40]

b.d – brak danych

Tab. 4. Porównanie wpływu środowiskowego kompozytów na bazie grzybni (MBCs) z innymi naturalnymi materiałami budowlanymi.

Kryterium	MBCs	Drewno i inne naturalne materiały
Surowce	Odpady z przemysłu, brak eksploatacji	Uprawy, możliwe wylesianie i niszczenie siedlisk
Emisje CO_2	Bardzo niskie, ujemny ślad węglowy	Niskie, ale zależne od obróbki
Energochłonność	Bardzo niska	Niska do umiarkowanej
Biodegradowalność	Pełna, szybka (z wyjątkiem grzybni produkowanej na nieorganicznych)	Często ograniczona przez dodatki, długi okres
Wpływ lokalny na środowisko	Minimalny	Zależny od upraw i sposobu obróbki i przetwarzania

się w model gospodarki o obiegu zamkniętym. Ponadto materiały MBCs mają mniejszy wpływ na środowisko. W mniejszym stopniu wpływają na zakwaszenie gleb, zmiany klimatu, eutrofizację wód, występowanie suszy lub powstawanie smogu [43].

Właściwości mechaniczne materiałów na bazie grzybni można dostosować do zamierzonego celu poprzez zmianę parametrów procesu produkcji, takich jak rodzaj podłoża, gatunek grzyba czy warunki hodowli [44]. Biokompozyty wykonane z grzybni są bardzo lekkie (gęstość < 200 kg/m^3) i charakteryzują się małą przewodnością cieplną < 0,04 W/m·K. Z tego powodu mogą być używane jako izolacja termiczna budynków, co znacząco wpływa na obniżenie zużycia energii koniecznej do ogrzania lub chłodzenia [45]. Ponadto biokompozyty grzybowe zapewniają bardzo dobrą izolację akustyczną (absorbancja 70–75% przy częstotliwościach < 1500 Hz), co jest istotne dla zdrowia mieszkających w budynkach ludzi i zwierząt.

Produkcja izolacyjnych materiałów kompozytowych z grzybni emituje mniej gazów cieplarnianych GHGs (ang. greenhouse gases) niż materiały syntetyczne. Na przykład zastąpienie pianki fenolowej izolacją z grzybni pozwoliłoby uniknąć emisji 18,9 $MtCO_2eq$ [43]. Z kolei analiza cyklu życia LCA (ang. life cycle assessment) wykazała, że MBCs wytwarzają około jednej trzeciej mniej CO_2 niż izolacja wykonana z polistyrenu spienionego (ekspandowanego, EPS) [43]. Stwierdzono, że energochłonność EE (ang. embodied energy) wynosi 860,3 MJ/m3, co jest wartością 1,5–6 razy niższą od wartości stosowanych materiałów budowlanych i izolacyjnych, takich jak beton, bloczki betonowe, autoklawizowany beton komórkowy, EPS i PUR itd. [45].

Etap hodowli grzybów jest zdecydowanie najbardziej energochłonnym etapem produkcji MBCs, pochłaniającym 73% całkowitej energii zużywanej. Prawie cała (99,5%) energia etapu wzrostu jest zużywana na utrzymanie temperatury inkubatora, w którym rosną grzyby. Wytwarzany w czasie wzrostu grzyba CO_2 stanowi 64,1% jego całkowitej emisji. Ditlenek węgla wytwarzany przez grzyby w procesie oddychania stanowi ok. 21% emitowanego CO_2 w całym procesie i około 33% emisji z fazy hodowli. Innym znaczącym źródłem CO_2 (7,9%) jest produkcja form wykorzystywanych do nadania kształtu rosnącej grzybni. W większości stosuje się tu polimery wytworzone na bazie paliw kopalnych [45].

Biokompozyty z grzybni cechują się ujemnym śladem węglowym, gdyż w czasie wzrostu roślin, które później wykorzystywane są jako substrat do hodowli grzybów, sekwestrowane są ogromne ilości CO_2. Dla przykładu słoma rzepakowa sekwestruje ok. 306 kg CO_2/m3 w procesie fotosyntezy i emituje ok. 58,3 kg CO_2eq/m^3, co wynika z procesu jej uprawy. Jedną z głównych zalet MBC jest to, że zsekwestrowany CO_2 nie jest uwalniany z powrotem do środowiska poprzez spalanie, ale pozostaje związany w długim okresie [46].

W tabeli 4. przedstawiono porównanie wpływu środowiskowego kompozytów na bazie grzybni (MBCs) z innymi naturalnymi materiałami budowlanymi, m.in. drewno z certyfikowanych upraw, korek, słoma, bambus, konopie [47] [48] [49].

Zastosowanie materiałów z grzybni w architekturze i budownictwie

Zastosowania biokompozytów na bazie grzybni przez projektantów i architektów są ograniczone do małej skali i instalacji wystawowych.

Grzybnia może znaleźć zastosowanie jako materiał wykorzystywany do projektowania architektury parametrycznej i druku 3D [50]. Warto zauważyć, że wskazuje to na możliwość tworzenia modułów o bardzo wydajnej geometrii, dając swobodę w kreacji kształtów i brył o większym potencjale budowy formy i przestrzeni. Podobnie jak w przypadku innych systemów żywych, jedną z kluczowych przeszkód w drukowaniu 3D konstrukcji na bazie grzybni są zanieczyszczenia (np. innymi mikroorganizmami), które mogą wystąpić na każdym etapie całego procesu drukowania: podczas przygotowywania tuszu, samego drukowania i późniejszego drukowania, gdzie osadzonym mikroorganizmom daje się czas na wzrost i proliferację. Zapobieganie zanieczyszczeniom wymaga sterylizacji sprzętu oraz przeprowadzenie drukowania 3D w sterylnym środowisku, co niestety oznacza wzrost kosztów [50].

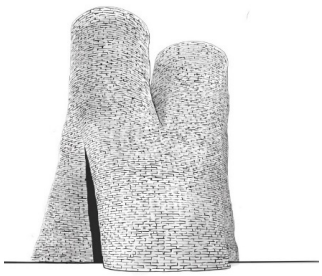
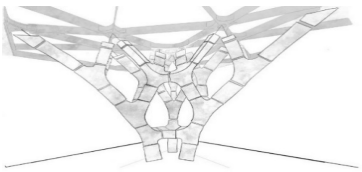
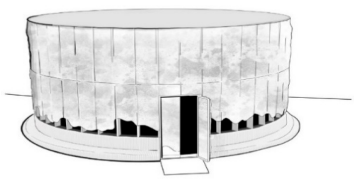
W tabeli 5. zestawiono wybrane przykłady realizacji z wykorzystaniem biokompozytów z grzybni.

Jednym z najbardziej popularnych przykładów wykorzystania cegieł z grzyba jest pawilon Hy-Fi Tower zaprojektowany przez studio The Living (założone przez Davida Benjamina). Projekt zrealizowano w 2014 roku w Nowym Jorku w ramach Young Architects Program, organizowanego przez Museum of Modern Art (MoMA). Cegły zostały wyprodukowane przez firmę Ecovative Design, która specjalizuje się w tworzeniu materiałów z grzybni. Substrat stanowiły odpady rolnicze, takie jak łuski kukurydzy, które zostały skolonizowane przez grzybnię. Wieża składała się z okrągłych modułów ułożonych w stosy, tworzących organiczne, przypominające komin kształty. Cegły z grzybni były ułożone w sposób, który zapewniał stabilność konstrukcji, jednocześnie pozwalając na przepływ powietrza i światła. Hy-Fi Tower był w pełni biodegradowalny i kompostowalny. Po zakończeniu wystawy (która trwała trzy miesiące) cegły z grzybni zostały poddane kompostowaniu, zwracając składniki odżywcze do gleby. Projekt nie generował odpadów, co stanowiło rewolucyjne podejście w porównaniu do tradycyjnych konstrukcji tymczasowych [35].

Materiały wykonane z grzybni są stosowane w architekturze parametrycznej. Odpowiednie zaprojektowanie form, w jakich będzie się rozwijać grzybnia, pozwala na ogromną elastyczność w projektowaniu. Poprzez wprowadzenie technologii takich jak programy do parametrycznego projektowania i druku 3D możliwe jest wytworzenie modułów o zmiennej geometrii elementów. Umożliwia to swobodę w tworzenia kształtów i brył o większym potencjale kreacyjnym przestrzeni [51].

MycoTree został zaprezentowany w 2017 roku na Seoul Biennale of Architecture and Urbanism przez zespół projektowy złożony z naukowców i architektów z ETH Zurich, Universität Stuttgart oraz Korea National University of Arts. Jest to instalacja, która została zbudowana wyłącznie z biomateriałów, która pokazuje, jak grzybnia może być wykorzystana do tworzenia elementów nośnych. Podobnie jak w przypadku Hy-Fi Tower cegły zostały wyprodukowane przez kolonizację substratu organicznego (w tym przypadku odpady rolnicze) przez grzybnię. Została wyhodowana w specjalnych

Tab. 5. Wybrane realizacje w architekturze

	Nazwa obiektu / źródło	Autor budowli	Miejsce realizacji	Rok powstania	Literatura
	Pawilon Hy-Fi Tower (Lewandowska A. 2024)	The Living	Nowy York, USA	2014	[35]
	MycoTree	Zespół projektowy złożony z naukowców i architektów z ETH Zurich, Universität Stuttgart oraz Korea National University of Arts	Seoul, Korea Południowa	2017	[52]
	The Growing Pavilion (Living Pavilion)	New Heroes i Krown.bio. Leboucq, P., De Man, L., Klarenbeek, E.	Eindhoven, Holandia	2019	[53]
	Pawilon Przyszłości	studenci Politechniki Warszawskiej	Warszawa, Polska	2024	[54]

formach, które nadawały cegłom precyzyjne kształty potrzebne do stworzenia struktury przestrzennej. MycoTree składa się z wielu małych elementów, które są połączone ze sobą za pomocą systemu zacisków. Każdy element został zaprojektowany przy użyciu zaawansowanych narzędzi do modelowania 3D i obliczeń strukturalnych, aby zapewnić optymalną wytrzymałość i stabilność. Struktura przypomina drzewo lub korzeń, co podkreśla jej organiczny charakter. Projekt wykorzystuje zasady geometrii strukturalnej, co oznacza, że stabilność osiągnięto poprzez odpowiednie ułożenie elementów, a nie poprzez użycie ciężkich materiałów [52].

Grzybnia może przybierać również formy monolityczne, jak zostało to zaprezentowane w projekcie The Growing Pavilion (Living Pavilion) zaprojektowanym przez Company New Heroes i Krown.bio zaprezentowanym podczas Dutch Design Week w Eindhoven w 2019 roku. Oparte na drewnianej konstrukcji panele z grzybni pełnią funkcję ścian i elementów dekoracyjnych. The Growing Pavilion był jednym z pierwszych projektów, które wykorzystały grzybnię na tak dużą skalę w architekturze [53].

Pawilon Przyszłości został zrealizowany w okresie 16 czerwca – 30 września 2024 roku w Łazienkach Królewskich w Warszawie, tuż przy budynku Ermitażu, przez studentów Wydziału Architektury Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. arch. Anny Marii Wierzbickiej oraz przy wsparciu firmy Unibep. Pawilon został zbudowany na planie kwadratu, co miało symbolizować równowagę i harmonię. W strukturze pawilonu zastosowano cegły z grzybni opracowane przez Łódzki Instytut Technologiczny (Sieć Badawcza Łukasiewicz-ŁIT). Dach stanowiły drewniane belki [54].

Studenci Wydziału Architektury Politechniki Warszawskiej w lipcu 2024 na placu Pięciu Rogów w Warszawie stworzyli instalację ROZKOSZT zbudowaną z drewna z odzysku i balotów z boczniakami. Przy tworzeniu instalacji młodzi architekci skupili się na kosztach środowiskowych budownictwa [55]. Należy zauważyć, że biokompozyty na bazie grzybni (MBCs) znajdują coraz szersze zastosowanie w architekturze. Jednak wykorzystanie ich

ogranicza się głównie do instalacji tymczasowych, pawilonów wystawowych oraz eksperymentalnych projektów o niewielkiej skali. Unikatowe właściwości MBCs, tj. biodegradowalność, niska masa, dobra izolacyjność i możliwość formowania w niestandardowe kształty, czynią je atrakcyjnym materiałem dla m.in. architektury parametrycznej i technologii druku 3D. Wśród przedstawionych realizacji potencjał w kontekście zrównoważonego budownictwa, gospodarki o obiegu zamkniętym i innowacyjnych technologii projektowych czyni je obiecującym kierunkiem dla rozwoju w architekturze przyszłości [56].

Dyskusja

Zauważalny problem wpływu „śladu" ekologicznego, jaki pozostawia budynek w środowisku, dotyka obecnie zarówno przedmiotu (architektury), jak i podmiotu (architekta, użytkownika) odpowiedzialnych za proces projektowania oraz rozwiązania formalne. Niewątpliwie jest to obszar do ciągłego dyskursu nad kształtowaniem proekologicznego budynku w świetle zasad zrównoważonego rozwoju. Obawy dotyczące negatywnego oddziaływania na środowisko ukierunkowały poszukiwania badawcze mające na celu ograniczenie zużycia, konsumpcji i emisji, w tym materiałów, energii i odpadów.

Projektant w procesie projektowym musi wybrać wiele alternatywnych opcji, podając w wątpliwość ostateczny rezultat, za każdym razem dążąc do poprawy jakości poprzez optymalizację projektu. W świetle rozważań przedstawionych w artykule wydaje się zasadne podjęcie dalszych prób w określeniu minimalizacji i kontroli wpływu materiałów budowlanych na środowisko naturalne. Logiczny wydaje się kierunek dotyczący wytwarzania biokompozytów i określenia ich właściwości o niskim współczynniku oddziaływania na środowisko, uwzględniający wbudowane CO_2 w fazie A3-Manufacturing w procesie analizy i oceny cyklu życia (LCA) materiału budowlanego.

Warto wziąć pod uwagę, że analiza i ocena cyklu życia w modelu „od kołyski do bramy" (ang. cradle-to-gate) wskazuje na średnie emisje wbudowane materiałów syntetycznych, które są wyższe niż w przypadku izolacji z grzybni. Sugeruje to, że przejście na izolację z grzybni zamiast syntetycznych materiałów izolacyjnych mogłoby w przyszłości prowadzić do niższych rocznych emisji gazów cieplarnianych (GHG) oraz mniejszej akumulacji tych emisji w atmosferze.

Potencjalnymi przyczynami braku szerokiego zastosowania materiałów wykonanych z grzybni mogą być problemy z ich niskimi właściwościami mechanicznymi i wysoką absorpcją wody. Dochodzą do tego aspekty społeczne i kulturowe, np. niska świadomość i zaufanie (dla wielu użytkowników „materiał z grzyba" brzmi niepewnie lub nietrwale, co wpływa na opór przed stosowaniem w budynkach mieszkalnych); estetyka (naturalny wygląd i kolorystyka nie zawsze wpisują się w oczekiwania rynku). Istotnymi problemami są również: 1) nieistnienie standardowych metod produkcji i znormalizowanych metod testowania właściwości; 2) trudności związane ze skalowalnością produkcji (jest możliwa w małej skali, ale wdrożenie masowe wymaga automatyzacji i optymalizacji procesów, co pociąga za sobą kosztowne inwestycje); 3) brak dojrzałego rynku (niewielka liczba producentów i niska świadomość inwestorów); 4) niepełne informacje o ocenie cyklu życia; 5) długotrwałe procedury certyfikacji (np. wymagane testy trwałości, ogniowe, wilgotnościowe czy toksykologiczne wydłużają proces wejścia na rynek); 6) brak standardów higienicznych (obawy związane z potencjalnym rozwojem pleśni czy alergenów) oraz 7) niepewność co do trwałości i bezpieczeństwa. Aby je pokonać, potrzebne są badania porównawcze z tradycyjnymi materiałami, pilotażowe inwestycje oraz prace nad ujęciem grzybni w normach budowlanych.

Biorąc pod uwagę wszystkie ekologiczne zalety materiałów kompozytowych otrzymywanych z grzybni, należy się spodziewać stopniowego rozwiązywania lub przynajmniej znaczącego minimalizowania problemów technicznych związanych z charakterystyką MBCs.

Wnioski

Biokompozyty oparte na grzybni pochodzącej z hodowli prowadzonej na odpadach rolniczych mogą się przyczynić do znacznego zmniejszenia wpływu ekologicznego branży budowlanej na środowisko. Należy zauważyć, że MBCs są jednym z najbardziej ekologicznych materiałów budowlanych dostępnych obecnie na rynku. Wiedza na temat właściwości grzybni wytwarzanej przez różne gatunki grzybów może przyczynić się do optymalizacji procesu produkcyjnego i do otrzymania produktów o pożądanych właściwościach, które mogłyby zostać zastosowane w budownictwie. Ponieważ materiały wytworzone z grzybni są lekkie i wysoce izolujące, mogłyby znacząco zmniejszyć zużycie energii i emisji cieplnej w całym okresie eksploatacji budynku. W porównaniu z innymi naturalnymi materiałami (np. drewno, słoma, konopie) MBCs mają niższy ślad węglowy oraz mniejszy wpływ lokalny na środowisko. Cechuje je również pełna biodegradowalność. W przyszłości należy dążyć do obniżenia energochłonności procesu hodowli grzybów oraz do poprawy właściwości mechanicznych finalnego produktu. W kontekście znaczącego udziału budownictwa w globalnej emisji CO_2 argumentem przemawiającym za rozwojem technologii produkcji kompozytów grzybowych jest korzystny wynik analizy i oceny cyklu życia (LCA), otrzymany dla prototypowych MBCs.

BIBLIOGRAFIA

[1] Mba, E.J., Okeke, F.O., Igwe, A.E., Ozigbo, C.A., Oforji, P.I., Ozigbo, I.W. (2024), Evolving trends and challenges in sustainable architectural design; a practice perspective, „Heliyon" 10, 20, e39400.DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39400.

[2] Labaran, Y.H., Mathur, V.S., Muhammad, S.U., Musa, A.A. (2022), Carbon footprint management: A review of construction industry, „Cleaner Engineering and Technology", 9,100531,DOI:https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531.

[3] Chen, L., Zhang, Y., Chen, Z., Dong, Y., Jiang, Y., Hua, J., Liu, Y., Osman, A.I., Farghali, M., Huang, L., Rooney D.W., Yap P.W. (2024), Biomaterials technology and policies in the building sector: a review, „Environmental Chemistry Letter" 22, s. 715–750, DOI: https://doi.org/10.1007/s10311-023-01689-w.

[4] Cheek, M., Lughadha, N.E, Kirk P., Lindon H., Carretero J., Looney B., Douglas B., Haelewaters D. (2020), New scientific discoveries: Plants and fungi, „Plants, People, Planet" 2,5, pp. 371–388., DOI: 10.1002/ppp3.10148.

[5] Himanshu, Y.N., Ibrahim, S., Shenoy, R.P. (2022), Fungi: Are they plants or animals?, „Manipal Journal of Medical Science", 6,1, pp. 3–5.

[6] Corbu, V.M., Gheorghe-Barbu, I., Dumbravă, A.Ş., Vrâncianu, C.O., Şesan, T.E. (2022), Current Insights in Fungal Importance – A Comprehensive Review, „Microorganisms" 2023, 11, 1384. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms11061384.

[7] Ruiz-Herrera, J. (1991), Fungal cell wall: structure, synthesis, and assembly. CRC press.

[8] Islam, M.R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler L., Picu R.C. (2017), Morphology and mechanics of fungal mycelium, „Scientific Reports" 7, 13070. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-13295-2.

[9] Alaneme, K.K., Anaele, J.U., Oke, T.M., Kareem, S.A., Adediran, M., Ajibuwa, O.A., Anabaranze, Y.O. (2023), Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications, „Alexandria Engineering Journal" 83, pp. 234–250. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.012.

[10] Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I.S., Heredia-Guerrero, J.A., Athanassia A. (2017), Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties, „Scientific Reports" 7,1, 41292. DOI: https://doi.org/10.1038/srep41292.

[11] Krijgsheld, P., Wösten H.A.B. (2019), Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites, „Materials & Design" 161, pp. 64-71, 10.1016/j.matdes.2018.11.027.

[12] Jones M. Murali G.G., Laurin F., Robinson p., Bismarck A. (2022), Functional flexibility: The potential of morphing composites, „Composites Science and Technology" 230(1):109792. DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109792.

[13] Attias, N., Danai, O., Abitbol, T., Tarazi, E., Ezov, N., Pereman, I., Grobman, Y.J. (2020), Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis, „Journal of Cleaner Production", 246, 119037. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037.

[14] Tomoko, K., Lankinen, P., Hietala, Mikkonen, S., Mikkonen, K.S. (2022), Dense and continuous networks of aerial hyphae improve flexibility and shape retention of mycelium composite in the wet state, „Composites Part A: Ap-plied Science and Manufacturing" 152: 106688,152,106688. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106688.

[15] Gumińska B., Wojewoda, W. (1985), Grzyby i ich oznaczanie, Warszawa: PWRiL.

[16] Madusanka, C., Udayanga, D., Nilmini, R., Rajapaksha, S., Hewawasam, C., Manamgoda, D., Vasco-Correa J. (2024), A review of recent advances in fungal mycelium based composites, „Discovered Material" 4, 13, DOI: https://doi.org/10.1007/s43939-024-00084-8.

[17] Chang, S-T., Miles, P. (2004), Pleurotus – A Mushroom of Broad Adaptability, CRC Press.

[18] Zmitrovich I.V., Malysheva V.F. (2013), Towards a phylogeny of Trametes alliance (Basidiomycota, Polyporales), „Mikologiya i fitopatologiya" 47, 6, pp. 358–380. DOI:http://media.wix.com/ugd/b65817_d1162add57d74fe08e46f728018208ac.pdf.

[19] Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C.H., John, S. (2018), Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety, „Fire Materials" 2;42, pp. 816–25.https://doi.org/10.1002/fam.2637.

[20] Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., John, S. (2020), Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review, „Materials & Design" 187, 108397. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397.

[21] Alemu, D., Tafesse M., Mondal A.L. (2022), Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial, „International Journal of Biomaterials" 8401528. DOI:https://doi.org/10.1155/2022/8401528.

[22] Dias, P.P.; Jayasinghe, L.B.; Waldmann, D. (2021), Investigation of Mycelium-Miscanthus Composites as Building Insulation Material, „Results in Material", 10, 100189. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100189.

[23] Jones, M., Huynh, T., Dekiwadia, C., Daver, F., John S. (2017), Mycelium composites: a review of engineering characteristics and growth kinetics, „Journal of Bionanoscience" 11, pp.241-257. DOI: 10.1166/jbns.2017.1440.
[24] Yang, Z.J. Asce, M., Zhang, F., Still, B., Asce, S.M., White, M., Amstislavski P. (2017), Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam, „Journal of Materials in Civil Engineering" 29, pp.1–9. DOI: 10.1061/(ASCE) MT.1943-5533.0001866.
[25] Aiduang, W., Kumla, J., Srinuanpan, S., Thamjaree, W., Lumyong, S., Suwannarach, N. (2022), Mechanical, Physical, and Chemical Properties of Mycelium-Based Composites Produced from Various Lignocellulosic Residues and Fungal Species, „Journal of Fungi" 25;8(11):1125. DOI: https://doi.org/10.3390/jof8111125.
[26] Teeraphantuvat, T., Jatuwong, K., Jinanukul, P., Thamjaree, W., Lumyong, S., Aiduang, W. (2024), Improving the Physical and Mechanical Properties of Mycelium-Based Green Composites Using Paper Waste, „Polymers" 16, 262. DOI: https://doi.org/10.3390/polym16020262.
[27] Raslan, D., Elsacker, E., Debnath, K.B., Dade-Robertson, M. (2025), The role of surface interventions in bio-welding mycelium based-composites, „Sustainable Materials and Technologies" 44, e01326. DOI: https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01326.
[28] Appels, F.V.W., Camere, S., Montalti, M.,; Karana, E., Jansen, K.M.B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., Wösten, H.A.B. (2019), Fabrication Factors Influencing Mechanical, Moisture- and Water-Related Properties of Mycelium-Based Composites, „Material and Designs" 161, pp. 64–71. DOI:https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027.
[29] Saez, D., Grizmann, D., Trautz, M., Werner, A. (2022), Exploring the Binding Capacity of mycelium and wood-based composites for use in construction, „Biomimetics" 7, 78. DOI: https://doi.org/10.3390/biomimetics7020078.
[30] Pelletier, M.G., Holt, G.A., Wanjura, J.D., Greetham, L., McIntyre, G., Bayer, E., Kaplan-Bie J. (2019), Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative, „Industrial Crops and Products" 139, pp. 926-6690. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111533.
[31] Ongpeng, J.M.C., Inciong, E., Sendo, V., Soliman, C., Siggaoat, A. (2020), Using Waste in Producing Bio-Composite Mycelium Bricks, „Applied Science" 10, 5303. DOI: https://doi.org/10.3390/app10155303.
[32] Xing, Y., Brewer, M., El-Gharabawy, H., Griffith G., Jones P. (2018), Growing and testing mycelium bricks as build-ing insulation materials, „IOP Conference Series: Earth Environmental Science" 21, 2. DOI: 10.1088/1755-1315/121/2/022032.
[33] Wang, Y., Hausner, G., Rout, P.R., Yuan, Q. (2025), Investigation of fungal mycelium-bound bio-foams from agricul-tural wastes as sustainable and eco-conscious packaging innovations, „Journal of Cleaner Production" 501, 145206. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145206.
[34] Sun, W., Tajvidi, M., Howell, C., Hunt, C.G. (2022), Insight into mycelium-lignocellulosic bio-composites: Essential factors and properties, „Composites Part A: Applied Science and Manufacturing" 161, 107125. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107125.
[35] Sydor, M., Bonenberg, A., Doczekalska, B., Cofta, G. (2022), Mycelium-Based Composites in Art, Architecture, and Interior Design: A Review, „Polymers" 14, 145. DOI: https://doi.org/10.3390/polym14010145.
[36] www.ecovative.com [data dostępu: 12.08.2025].
[37] https://mogu.bio/ [data dostępu: 12.08.2025].
[38] https://www.mycotex.nl/[data dostępu: 12.08.2025].
[39] https://www.mycoworks.com/[data dostępu: 12.08.2025].
[40] https://www.mycostories.com/post/biohm-sustainable-eco-friendly-construction-materials-derived-from-mycelium [data dostępu: 12.08.2025].
[41] Madusanka, C., Udayanga, D., Nilmini, R., Rajapaksha, S., Hewawasam, C., Manamgoda, D., Vasco-Correa J. (2024), A review of recent advances in fungal mycelium based composites, „Discovered Material" 4, 13. DOI: https://doi.org/10.1007/s43939-024-00084-8.
[42] Kumar, P., Kapoor, A., Pal, D.B., Raghunathan, M. (2025), Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties [in:] Pal, D.B., Bansal, S.L. (eds) Fungal Waste Biomass Management for Energy, Environment and Value-Added Products. Fungal Biology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82599-6_9.
[43] Volk, R., Schröter, M., Saeidi, N., Steffl, S., Javadian, A., Hebel, D.E., Schultmann, F. (2024), Life cycle assessment of mycelium-based composite materials, „Resources, Conservation and Recycling" 205, 107579. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107579.
[44] Luksta, I., Bohvalovs, G., Bazbauers, G., Spalvins, K., Blumberga, A., Blumberga, D. (2021), Production of Renewable Insulation Material – new Business Model of Bioeconomy for Clean Energy Transition, „Environmental and Climate Technologies" 25, pp.1061–1074.
[45] Livne, A., Wösten, H.A.B., Pearlmutter D., Gal E. (2022), Fungal Mycelium Bio-Composite Acts as a CO_2-Sink Building Material with Low Embodied Energy, „ACS Sustainable Chemistry & Engineering" 10, 37, pp. 12099–12106. DOI: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01314.
[46] O'Brien, P.L., Sauer, T.J., Archontoulis, S., Karlen, D.L., Laird, D. (2020), Corn stover harvest reduces soil CO2 fluxes but increases overall C losses, „GCB Bioenergy" 12, pp. 894–909. DOI: 10.1111/gcbb.12742.
[47] Alaux, N., Vašatko, H., Maierhofer, D. et al. Ruschi M., Saade M., Stavric M., Passer A. (2024), Environmental potential of fungal insulation: a prospective life cycle assessment of mycelium-based composites, „Int J Life Cycle Assess" 29, pp. 255–272 DOI:https://doi.org/10.1007/s11367-023-02243-0.
[48] Bagheriehnajjar, G., Yousefpour, H. & Rahimnejad, M. (2024), Environmental impacts of mycelium-based bio-composite construction materials, „Int. J. Environ. Sci. Technol." 21, pp. 5437–5458. DOI:https://doi.org/10.1007/s13762-023-05447-x.
[49] Anand, A., Raghuvanshi, S. & Gupta, S. (2020), Trends in Carbon Dioxide (CO2) Fixation by Microbial Cultivations, „Curr Sustainable Renewable Energy Rep" 7, pp. 40–47. DOI.https://doi.org/10.1007/s40518-020-00149-1.
[50] Soh, E., Teoh, J.H., Leong, B., Xing, T., & Le Ferrand, H. (2023), 3D printing of mycelium engineered living materials using a waste-based ink and non-sterile conditions, „Materials & Design" 236,2023, 112481, DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112481.
[51] Gavriilidis, E.T., Voutetaki, M.E., Giouzepas, D.G. (2024), Effective Structural Parametric Form in Architecture Using Mycelium Bio-Composites, „Architecture" 4,3, pp. 717–729. DOI: https://doi.org/10.3390/architecture4030037.
[52] Heisel, F., Schlesier, K., Lee, J., Rippmann, M., Saeidi, N., Javadian, A., Nugroho, A.R., Hebel, D., Block, P. (2017), Design of a Load-Bearing Mycelium Structure through Informed Structural Engineering, The MycoTree at the 2017 Seoul Biennale of Architecture and Urbanism. In Proceedings of the World Congress on Sustainable Technologies (WCST-2017), Cambridge, UK, 4–6 November 2017.
[53] Leboucq, P., De Man, L., Klarenbeek, E. [online] https://thegrowingpavilion.com/ [data dostępu: 3.04.202]).
[54] Pawilon Przyszłości w Łazienkach Królewskich, Sztuka Architektury [data dostępu: 19.08.2025].
[55] https://smakinaboczniaki.pl/rozkoszt-nasze-boczniaki-rozowe-w-innowacyjnej-instalacji-na-placu-pieciu-rogow/ [data dostępu: 24.08.2025].
[56] Rossi, A., Javadian, A., Acosta, I., Özdemir, E., Nolte, N., Saeidi, N., Dwan, A., Ren, S., Vries, L., Hebel, D., Wurm, J., Evers-man, P. (2022), Wood-Mycelium Composites for CO2-Neutral, Circular Interior Construction and Fittings. In: Berlin D-A-CH conference: Built Environment within Planetary Boundaries (SBE Berlin 2022). IOP Publishing.

DOI: 10.5604/01.3001.0055.3108

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
Markowska-Szczupak Agata, Gradziński Piotr, Hajłasz Oliwia, Kowalski Szymon, 2025, Materiał wyhodowany z grzybów – przyszłość architektury i budownictwa (praca przeglądowa), „Builder" 11 (340). DOI: 10.5604/01.3001.0055.3108

STRESZCZENIE:

W artykule przedstawiono wyniki badań nad wykorzystaniem grzybni do wytwarzania materiałów budowlanych o zrównoważonych cyklach życia. Omówiono najczęściej używane grzyby, sposoby ich hodowli i rodzaje otrzymywanych materiałów. Przeanalizowano pozytywny wpływ materiałów opartych na grzybni na środowisko naturalne. Przedstawiono wybrane rozwiązania zastosowania architektoniczne i projektowe związane z zastosowaniem kompozytów opartych na grzybni (ang. mycelium-based composites, MBCs). Przeprowadzone analizy przypadków wskazują, że biokompozyty z grzybni mogą odegrać istotną rolę w transformacji sektora budowlanego oraz architektury, wpisując się w ideę zrównoważonego rozwoju. Wskazuje się, że wykorzystanie materiałów budowlanych z grzybni w architekturze i budownictwie może przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych powstających w czasie ich produkcji, zmniejszenia ilości odpadów oraz promowania innowacyjnych, przyjaznych środowisku technologii.

SŁOWA KLUCZOWE:

grzyby (pleśnie), materiały budowlane, grzybnia, MBC

ABSTRACT:

FUNGI GROWN MATERIAL – THE FUTURE OF ARCHITECTURE AND BUILDING INDUSTRY (REVIEW). The article presents research findings on the use of mycelium for producing building materials with sustainable life cycles. It discusses the most commonly used fungi, cultivation methods, and types of materials obtained. The positive environmental impact of mycelium-based materials is analyzed, along with selected architectural and design applications of mycelium-based composites (MBCs). Case studies indicate that mycelium biocomposites can play a significant role in transforming the construction and architecture sectors in line with the principles of sustainable development. It is suggested that the use of mycelium-based building materials in architecture and construction may contribute to reducing CO_2 emissions, minimizing waste, and promoting innovative, eco-friendly technologies.

KEYWORDS:

fungi (mold), building materials, mycelium, MBCs