



DOI: 10.21005/pif.2024.58.B-03

USAGE OF MYCELIUM-BASED COMPOSITES IN THE CONSTRUCTION OF SMALL ARCHITECTURAL STRUCTURES

WYKORZYSTANIE KOMPOZYTÓW NA BAZIE GRZYBNI W BUDOWIE OBIEKTÓW MAŁEJ ARCHITEKTURY

Anna Lewandowska

Mgr inż. Arch.

Orcid number: 0009-0006-0462-6897

University of Technology, Poznań, Poland
Institute of Interior Architecture and Industrial Design, Faculty of Architecture

ABSTRACT

Mycelium is a biomaterial that can be an innovative alternative to existing solutions in architecture. The study analyzed 10 examples of small architectural structures built on the basis of the mycelium-based composites. The aim of the research was to collect data showing the scope of possibilities of using mycelium in creating this type of objects. The analysis focused on connections of mycelium with other building materials, ways of protecting mycelium against external factors, and aesthetic and finishing aspects.

Key words: Mycelium-Based composites in architectural structures, biomaterials, alternative construction materials.

STRESZCZENIE

Grzybnia (mycelium) jest biomateriałem, który może być innowacyjną alternatywą dla istniejących rozwiązań w architekturze. W badaniu analizom zostało poddanych 10 przykładów małych struktur architektonicznych w których konstrukcji wykorzystano kompozyty na bazie grzybni. Celem badań było zebranie danych pokazujących zakres możliwości wykorzystania mycelim w tworzeniu tego typu obiektów. Skupiono się na połączeniach grzybni z innymi materiałami budowlanymi, sposobach ochrony grzybni przed czynnikami zewnętrznymi oraz aspektach estetycznych i wykończeniowych.

Słowa kluczowe: Kompozyty na bazie grzybni w strukturach architektonicznych, biomateriały, alternatywne materiały konstrukcyjne.

1. INTRODUCTION

Sustainable materials are the subject of many studies in the field of architecture in the first quarter of the 21st century. This might be associated with an attempt to meet the challenges of the modern world. With the rapid growth of population and urbanization, the annual waste in production is expected to increase by 70%, from 2.01 billion tons in 2016 to 2.2 billion tons and 3.40 billion tons respectively in 2025 and 2050 (The World Bank, 2019). Furthermore, according to the United Nations' "Global Status Report for Buildings and Construction" from 2020, the construction sector is responsible for 38% of all CO₂ emissions related to energy. Biomaterials can be an innovative alternative to existing solutions. One of them, constantly under research, is mycelium. Its potential applications have been described in numerous scientific articles related to production (Jiang, L.; Walczyk, D.; Mooney, L.; Putney, S. 2013), applications and properties (Abhijith, R.; Ashok, A.; Rejeesh, C.R. 2018), electronics (A.; Ayres, P.; Beasley, A.E.; Chiolerio, A.; Dehshibi, M.M.; Gandia, A.; Albergati, E.; Mayne, R.; Nikolaidou, A.; Roberts, N. 2022), architecture (Bitting, S.; Derme, T.; Lee, J.; Van Mele, T.; Dillenburger, B.; Block, P. 2022), patents related to Mycelium-based composites (Cerimi, K.; Akkaya, K.C.; Pohl, C.; Schmidt, B.; Neubauer, P. 2019), applications in furniture making and art (Sydor, M.; Bonenberg, A.; Doczekalska, B.; Cofta, G.2022), sustainable development (Fairus, M.J.B.M.; Bahrin, E.K.; Arbaain, E.N.N. 2022), and the proper selection of mushroom species that generate the material (Sydor, M.; Cofta, G.; Doczekalska, B.; Bonenberg, A. 2022). In 2022, there were already at least 92 published research papers on mycelium-based composites (Van den Brandhof, J.G.; Wösten, H.A.B. 2022). It has enormous potential not only in the world of biology but also in sustainable architecture and innovative design. Products made with mycelium do not require disposal at the end of their usage cycle (Lelivelt, R.J.J. 2015). Mycelium decomposes naturally and is fully biodegradable. Compared to traditional building materials, it has lower carbon footprint, and is considered eco-friendly.

In the last 15 years, since 2009, many projects that exemplify possible use of mycelium-based composites (MBC) in architecture, has been designed and built. Current efforts of using MBC in that field are mostly experimental, and the biggest existing structures made with mycelium are pavilions. They have many different forms, from simple arches and small vaults to complicated, huge structures and tower-like pavilions. Although the idea of using mycelium in architecture is becoming increasingly popular and mycelium-based composites have the potential to appeal to market, it still carries many challenges due to materials unconventional look and specifications, as well as negative associations that consumers have with fungi. Popularization of the material and education on its environmental benefits and unique aesthetic may however result in its increased use in architectural projects.

The author also investigates the possibilities of using mycelium-based composites by making prototypes with this material. These are a small-scale utility prototypes, hence the interest and willingness to explore the potential possibilities of using mycelium in building larger structures.



Fig. 1. Prototypes of flowerpots and bowls made with mycelium by Anna Lewandowska, source: photo by author

Ryc. 1. Prototypy mis i donicy z grzybni autorstwa Anny Lewandowskiej, źródło: zdjęcie autorki

2. METHODS

The first research method was the analysis of literature. A detailed analysis of the literature on the subject was carried out in order to collect information on the properties of mycelium as a building material, its applications in architecture and current scientific research.

The next method was the analysis of design details. The design details of each of the selected projects were analyzed. The focus was on: connections of mycelium with other building materials, methods of protecting mycelium against external factors, and aesthetic and finishing aspects.

Another research method was comparative analysis. 10 selected examples of small-scale objects where the mycelium was used were examined. They were compared in terms of technical parameters, materials and details. The analysis includes: Location, purpose of the project, role of the mycelium, size of the project, mycelium and substrate type, additional construction materials and the processing of the mycelium.







The criteria for selecting research examples include: the topicality of the projects (constructions from the last 15 years) and the scale of the pavilions (selection of the largest possible implementations). Selected small architectural forms were and presented at various exhibitions and festivals. Their purpose can be described as exhibitional and experimental.





The purpose of the comparative analysis is also to collect and organize the current achievements in the use of mycelium in architectural designs and to obtain data, that illustrate the range of possibilities in use of mycelium-based composites in the architectural objects.

The aim of the study is to determine the role of mycelium-based composites in the construction of pavilions and to identify whether this material is a load-bearing or filling element. It is also important to determine the specificity of architectural forms due to the needs of ventilation when using mycelium in them. Another important issue is determining the most frequently used types of mycelium and substrates, as well as auxiliary materials used in the construction of projects. The last goal is to determine the impact of thermal treatment and applying bio-coatings on the texture and properties of mycelium-based materials.

3. EXAMPLES ANALYSIS

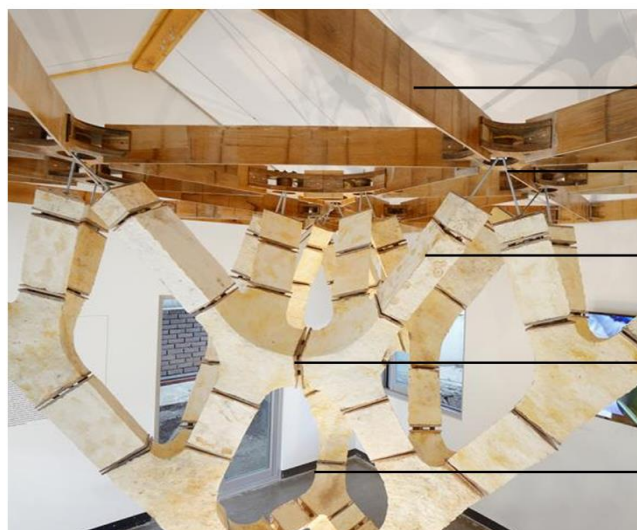
Table 1. Selected small-scale architecture items. Source: author's work
Tabela 1. Wybrane struktury architektoniczne. Źródło: opracowanie autorki

No.	Info.	Photo/Zdjęcie	No.	Info.	Photo/Zdjęcie
1	The Myco tree, 2017 by Dirk E. Hebel, Philippe Block (photo/zdjęcie: Carolina Teteris)		6	The Shell Mycelium Pavilion, 2016 by Beetles 3.3, Yassin Areddia Designs (photo/zdjęcie: Krishna & Govind Raja)	
2	The Circular Garden, 2019 by Carlo Ratti (photo/zdjęcie: Marco Beck Peccoz)		7	The My-co Space, 2021 (photo/zdjęcie: Carolina Teteris),	
3	The Growing Pavilion, 2019 by Pascal Leboucq & Lucas De Man & Eric Klarenbeek (photo/zdjęcie: Eric Melander)		8	El Monolito Micelio, 2018 by Jonathan Dessi-Olive (photo/zdjęcie: J. D.-O.)	

No.	Info.	Photo/Zdjęcie	No.	Info.	Photo/Zdjęcie
4	The Mycotectural Alpha, 2009 by Philip Ross (photo/zdjęcie: Philip Ross)		9	The Hayes Pavilion, 2023 by Simon Carroll (photo/zdjęcie: Jennife Hahn)	
5	The Hy-Fi, 2014 by David Benjamin (photo/zdjęcie: Kris Graves)		10	The Mycelium Textile Pavilion, 2022 by Nikolaj Emil Svenningsen, Sean Lyon, Søs Christine Hejselbæk (photo/zdjęcie: Joakim Züger)	

3.1 The Myco Tree

The Myco Tree is an artistic installation. Geometry of its structure was designed using 3D graphic statics. It consists of 15 nodal elements of mycelium-bound material, that support the bamboo grid made of 36 linear members at height of 3 m. Above the ground. The overall weight of mycelium-bound members amounts to 182 kg. The bamboo construction weighs 134 kg in total, and its size at the widest point is 4 m. By 4 m. (Almpani-Lekka, Dimitra & Pfeiffer, Sven & Schmidts, Christian & Seo, Seung-il.,2021)



Details/Detale:

wooden construction
/Drewniana konstrukcja

metal joints/ metalowe elementy łączące

no living organisms on the surface/ Brak widocznych żywych organizmów

bamboo joints /
Bambusowe elementy łączące

Design allowing air flow/
Otwarta konstrukcja, pozwalająca na przepływ powietrza

Fig. 2. Close-up of a detail of the block structure made of MBC, supporting a bamboo construction of The Myco Tree. Source photo by Carolina Teteris

Ryc. 2. Zbliżenie na detal konstrukcji blokowej z kompozytów na bazie grzybni, podtrzymującej bambusową strukturę The Myco Tree. Źródło: autorka zdjęcia: Carolina Teteris

3.2 The Circular Garden

The Circular Garden is an outdoor installation composed of arches made of mycelium, the total of which is approximately 1 km. The used mycelium was cultivated in the soil for two months. The spores were incorporated into the flowing material by starting the growth process. (RATTI, C.; BELLERI, D. 202) In order to create self-supporting structures made of mycelium, the project was inspired by Gaudi's works and the "inverted catenary" was used. These methods are the best way to available structures that are cleanly applied in the form using suspended catenaries and then disconnecting them.



Details/Detale:

Design allowing air flow/ Otwarta konstrukcja, pozwalająca na przepływ powietrza

No living organisms on the surface/ Brak widocznych żywych organizmów

Biodegradable hemp ropes/ Liny konopne biodegradowalna

Invisible metal joint in the ground / niewidoczne element łączące w ziemi

Fig. 3. Close-up of a detail of the MBC construction. The Circular Garden, 2019 by Carlo Ratti (photo Marco Beck Peccoz)
Ryc. 3. Zbliżenie na detal konstrukcji z MBC. The Circular Garden, 2019 by Carlo Ratti (photo Marco Beck Peccoz)

3.3 The Growing Pavilion

The pavilions construction weighs in total over 10 tons, and its form is 95% circular. It is made mainly of biodegradable agricultural materials. The main raw materials used were: wood, mycelium, residues from the agricultural sector, cattail and cotton. The shell of this pavilion consists of 88 mycelium panels. To get them, hemp and linen have been mixed with mycelium. In just a few weeks, strong, fire and waterproof panels were obtained. (Van den Berg, J., Konings, B.2019)



Details/Detale:

No living organisms on the surface/ Brak widocznych żywych organizmów

Kerto frame structure / Kerto-drewniana struktura stelarzu

Metal joints/ metalowe łączenia

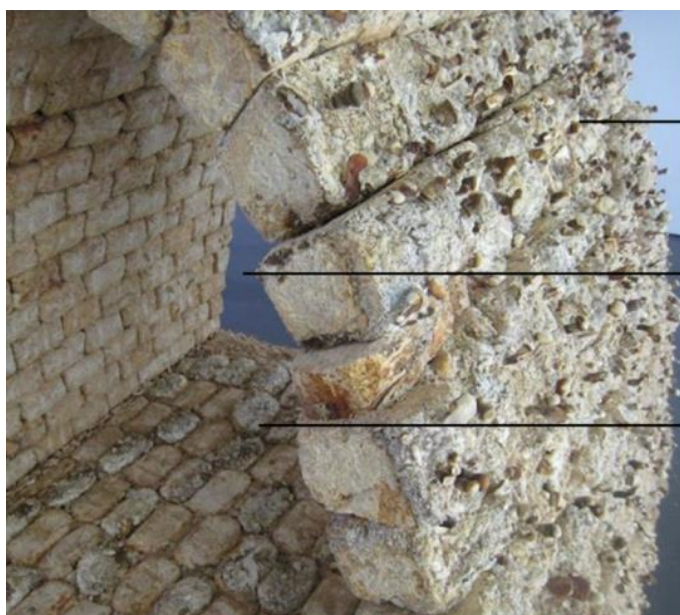
Design allowing air flow/ Otwarta konstrukcja, pozwalająca na przepływ powietrza

Fig. 4. Close-up of a detail of the wooden construction and panels made with MBC of The Growing Pavilion. Source: photo Eric Melander

Ryc. 4. Zbliżenie na detal drewnianej konstrukcji pawilonu i panele wypełniające z kompozytów na baizie grzybni. The Growing Pavilion. Źródło: autor zdjęcia - Eric Melander

3.4 Mycotectural Alpha

Philip Ross cultivated building elements from the mushroom *Ganoderma*. He called the invented material mycotecture. To obtain it, sawdust bags should be steamed for few hours in closed bags, then mycelium tissue should be implemented into them, which feeds, digests, and transforms the wood. The building elements, that are the results of this process have the form of bricks and consist of a network of mycelium roots, which makes them stronger than concrete. The Mycotectural Alpha arch-like form was built from them. (Armstrong, R. 2014)



Details/Detale:

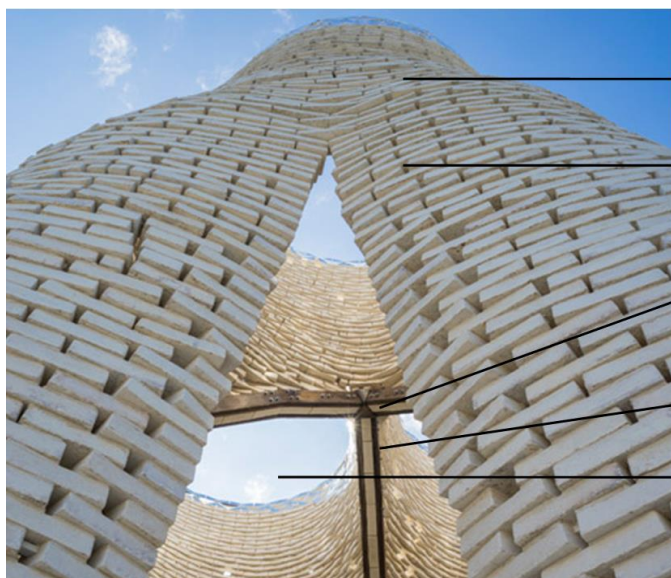
Visible Living organisms on the surface/
Widoczne żywe organizmy

Otwarta konstrukcja,
pozwalająca na przepływ powietrza/
Design allowing air flow

No additional construction materials/
Brak dodatkowych materiałów wspomagających konstrukcję

Fig. 5. Close-up of a mycelium-based construction of Mycotectural Alpha. Source: photo by Philip Ross

Ryc. 5. Zbliżenie na detal konstrukcji na bazie grzybni pawilonu The Mycotectural Alpha. Źródło: zdjęcie: Philip Ross



Details/Detale:

Bricks made of MBC/ cegły z
kompozytów grzybniowych

no living organisms on the
surface/ Brak widocznych
żywych organizmów

Wooden supporting beams/
Drewniane belki podtrzymujące

metal joints/ Metalowe łączenia

Design allowing air flow
/ Otwarta konstrukcja,
pozwala na przepływ powietrza

Fig. 6. Close-up of the mycelium-based construction bricks of the Hy-Fi, 2014 by David Benjamin. Source: photo by Kris Graves

Ryc. 6. Zbliżenie na konstrukcję z cegieł z grzybni pawilonu Hy-Fi, 2014, David Benjamin Źródło: autor zdjęcia: Kris Graves

3.5 Hy-Fi

Hy-Fi is an aggregation of oval towers, that are all over 12 meters tall. Towers were built with 10,000 bricks that were naturally grown from mycelium added into shredded corn stalks. This is the first structure that utilized mycelium bricks on such a large scale. The bricks were grown in five days and then stacked to form three interconnected cylinders. The upper layers of the structure were made from steel molds used for growing the bricks. (Benjamin, D. 2017)

3.6 Shell Mycelium Pavilion

The installation was designed using a wooden structure. The structure was covered with coconut briquettes, which served as a substrate for the growth of mushrooms. Within a few days, the mycelium developed and formed a white coating, and then, due to sunlight, it turned into a dry, harder coating protecting the lower layers. It is an open external form that is intended to invite for exploration. (Syed, S. 2017)



Details/Detale

Wooden Frame/drewniany stelarz

Visible Living organisms/ Mycelium jako wypełnienie paneli, widoczne żywe organizmy

Fully Woodem insides/ Od strony wewnętrznej panele w całości drewniane

Metal joints/ metalowe elementy łączące drewniane panele

Design allowing air flow / Otwarta konstrukcja, pozwala na przepływ powietrza

Fig. 7. Close-up to the construction detail of The Shell Mycelium Pavilion, 2016. Source: photo by Krishna & Govind Raja
Ryc. 7. Zbliżenie na detal konstrukcji drewnianej pawilonu oraz jej wypełnienia z grzybni. The Shell Mycelium Pavilion, 2016.
Źródło: zdjęcie: Krishna & Govind Raja

3.7 My-Co Space

The project is an attempt to use mycelium in the formation of residential habitats. It served as a sleeping and study area, and an exhibition room for two residents. Fomes fomentarius was chosen as the production strain and 330 panels were obtained from it. Inside the pannels there are hemp ropes, that add strength to the cnstruction. Mycelium tissue is waterproof, very stable and at the same time light. Due to the honeycomb structure of the panels, they are characterized by compressive stress curves similar to those in foam. (Meyer, V.; Schmidt, B.; Freidank-Pohl, C.; Schmidts, C.; Pfeiffer, S. 2022)



Details/Detale:

Metal sweet fastening/
Mocowanie dla płachty
ochronnej

No living organisms on the
surface/ Brak widocznych
żywych organizmów

Wooden Frame/Drewniany
stelarz

Wooden floor construc-
tion/Drewniana podłoga

Design allowing air flow
/ Otwarta konstrukcja

Metal joints/ Metalowe

Fig. 8. Close-up on My-co Space construction. Source: <https://www.v-meer.de/my-co-space>

Ryc. 8. Zbliżenie na konstrukcję My-co Space. Źródło: <https://www.v-meer.de/my-co-space>



Details/Detale:

No living organisms on the
surface/ Brak widocznych
żywych organizmów

Monolithic form/ Monoli-
tyczna forma

Design allowing air flow
/ Otwarta konstrukcja

Fig. 9. Close-up on the construction of El Monolito Micelio Source: photo by Jonathan Dessi-Olive

Ryc. 9. Zbliżenie na konstrukcję El Monolito Micelio Źródło: Autor zdjęcia Jonathan Dessi-Olive

3.8 El Monotilo Micelio

The interesting feature of the pavilion is its shape, that was calculated by dividing the "mushroom column" into four equal parts and re-arranging them into a symmetrical, four-legged vault shell. In order to obtain this form, mycelium was poured into wooden and fabric formworks. After allowing the

material to grow for a full four days, the geotextile was gradually removed. Six days after the mycelium was placed, all remaining formwork was removed, revealing the first large-scale monolithic mycelium pavilion grown on site. (Dessi-Olive, J. 2019)

3.9 The Hayes Pavilion

The main idea of the project was to find an alternative material to plastic in the film and festival industry. The pavilion's structure consists of a 26-meter-long wooden frame, with one long wall covered with mycelium. To form the wall, mycelium insulating boards were used. The boards were cut and then connected in a manner similar to how set designers in the film and music industries carve elaborate decorations from cheap Styrofoam panels. (Hahn J. 2023)



Details/Detale:

Waterproof roof/zadaszenie chroniące przed wodą

No living organisms on the surface/ Brak widocznych żywych organizmów

Metal construction joints/ Metalowe łączenia konstrukcji

Wooden construction /drewniana konstrukcja

Fig. 10. Close-up on the construction of the Hayes Pavilion, by Simon Carroll. Source: photo by Jennifer Hahn

Ryc. 10. Zbliżenie na konstrukcję pawilonu The Hayes, autorstwa Simona Carroll. Źródło: zdjęcie autorstwa Jennifer Hahn

3.10 The Mycelium Textile Pavilion

The pavilion was built using organic fabrics, cut into geometric patches. They were stretched in wooden frames made from surplus timber donated by sustainable timber supplier "Superwood". The materials contained mycelium spores that feed on sawdust and coffee grounds to effectively grow and spread over the fabric. A compostable algae-based biopolymer was used to connect the textiles to the wooden frames. (Jordahn, S. 2022)



Details/Detale:

Recycled textiles with embedded mycelium/
Tekstylia z recyklingu z osadzoną grzybnią

biopolimer joints of wood and textile/
biopolimerowe łączenia drewna z tekstyliami

metal construction joints/
metalowe łączenia konstrukcji

Wooden construction
/Drewniana konstrukcja

living organisms on the surface/
widoczne żywe organizmy

Fig. 11. Close-up on the construction of The Mycelium Textile Pavilion by Nikolaj Emil Svenningsen, Sean Lyon, Søs Christine Hejselbæk. Source: photo by Joakim Züger

Ryc. 11. Zbliżenie konstrukcji pawilonu The Mycelium Textile Pavilion, autorstwa Nikolaj Emil Svenningsen, Sean Lyon, Søs Christine Hejselbæk. Źródło: autor zdjęcia: Joakim Züger

Comparison of: Location, purpose of the project, role of the mycelium, size of the project, type of mycelium, type of substrate, materials supporting construction and processing of the mycelium.

Table 2. Comparative analysis of selected small-scale architecture items. Source: author's work

Tabela 2. Analiza komparystyczna wybranych struktur architektonicznych. Źródło: opracowanie autorki

NO.	1	2	3	4	5
Lokalizacja/ localisation	Seul, Korea Południowa/ South Korea	Mediolan, Włochy/ Milano, Italy	Den Bosh, Holandia/ Netherlands	Düsseldorf Niemcy/Germany	Nowy Jork, Stany Zjednoczone/ New York, USA
Przeznaczenie/ purpose	Ekspozycyjne/ expositional	Ekspozycyjne/ expositional	Ekspozycyjne/ expositional	Ekspozycyjne/ expositional	Ekspozycyjne/ expositional
Rola grzybni/ mycelium role in structure	materiał budowlany: bloczki/ building material: blocks	Materiał budowlany: podłużne segmenty/ building material: longitudinal seg- ments	Wypełnienie pan- ela knstrukcyjnego/ filling of the con- struction pannels	Materiał budowlany: cegła / building ma- terial: brick	Materiał budowlany: cegła / building mate- rial: brick
Rozmiar/ size	4x4 m, 3 m wys./ height	Długość łączna 1 km/ 1 km long	Niedostępne/ not found	Niedostępne/ not found	12m wys./ height
Rodzaj grzybni/ mycelium type	Pleurotus ostreatus	Niedostępne/ not found	Genoderma lingzhi	Ganoderma luci- dium	Ganoderma lucidum
Substrat/ substrate	Trzcina cukrowa, ko- rzeń manioku/ sugarcane, cassava root	Zrębki drewna/ wood chips	Konopie, oży- pałka, buława/ hemp, cattail, mace	Trociny/ scobs	Łodygi kukurydzy/ corn stalks
Materiały wspoma- gające konstrukcję/ additional construc- tion materials	Bambus, stal/ bamboo, steel	Lina konopna, metal/ hemp rope, metal	Drewno/ wood	Brak/ none	Drewno, stal/ wood, steel
Obróbka grzybni/ mycelium processing	Termiczna/ Thermal	Termiczna/ Thermal	Termiczna, biopowłoka wodo- odporna	Naturalny rozkład/ natural decomposi- tion	Termiczna/ Thermal

NO.	6	7	8	9	10
Lokalizacja/ localisation	Kerala, Indie/ Kerala, India	Frankfurt, Niemcy/ Germany	Frankfurt, Niemcy/ Germany	Glastonbury, Wielka Brytania/ Great Britain	Kopenhaga, Dania/ Copenhagen, Denmark
Przeznaczenie/ purpose	Ekspozycyjne/ expositional	Ekspozycyjne/ expositional	Ekspozycyjne/ expositional	Ekspozycyjne/ expositional	Ekspozycyjne/ expositional
Rola grzybni/ mycelium role in structure	Wypełnienie panela konstrukcyjnego/ filling of the con- struction pannels	Materiał budowlany: panele/ building material: pannels	Materiał budow- lany: monolit/ Building mate- rial: monolith	Wypełnienie panela konstrukcyjnego/ filling of the construction pannels	Wypełnienie panela konstrukcyjnego/ filling of the construction pannels
Rozmiar/ size	Niedostępne/ not found	6x5x3 m (20 m ²)	2,5x2,5m (2,75 m ³)	Ponad 2,5 m ² /Over 2,5 m ²	Niedostępne/ not found
Rodzaj grzybni/ mycelium type	Niedostępne/ not found	Fomes fomentarius	Ganoderma Lu- cidum	Ganoderma Lucidum	Niedostępne/ not found
Substrat/ substrate	Brykiet kokosowy/ coco nut briquettes	Konopie/ hemp	Konopie/ hemp	Odpady rolne/ agricultural waste	Trociny i fusy kawy/ scobs, coffee grounds
Materiały wspoma- gające konstrukcję/ additional construc- tion materials	Drewno, metal/ wood, metal	Drewno, liny ko- nopne/ wood, hemp ropes	Drewno i stal/ wood, steel	Drewno i stal/ wood, steel	Drewno, biopolimer/ wood, biopolymer
Obróbka grzybni/ mycelium processing	Brak/ none	termiczna, biopo- włoka wodoodporna/ Thermal, water-proof biocoating	Brak/ none	Powłoka z bio- plastiku/ biolastic co- ating	Powłoka z bioplastiku /bioplastic coating

4. DISCUSSION

In an article from 2022 describing strategies for building large-scale structures from mycelium (Dessi-Olive J., 2022), it was described that: *The most common approach (...) is based on the production of bricks or blocks grown in custom-made molds, actively dried in ovens, transported to the site and assembled, typically with the assistance of a temporary formwork and scaffolding structures.* This agrees with the results of the study. In most of the analyzed examples, the construction elements were bricks or mycelium blocks, grown outside of the building site.

Depending on how the mycelium is cultivated and treated after growth, the color and texture of the material may differ. The main factor influencing this trait is heat treatment. Among the analyzed examples, 30% were not subjected to any additional fungi deactivation processes and on their surfaces can be observed living organisms that change over time. This may affect the perception of the materials aesthetics appeal. These concerns have been explored and reported in other articles, including the "Mycelium-Based Composite Materials: Study of Acceptance." From 2023. *Products grown on the basis of live mycelium and lignocellulosic substrates are porous, have an irregular surface and colour. The natural origin of these types of materials and the fear of fungi can pose a challenge.*(Bonenberg A, Sydor M, Cofta G, Doczekalska B, Grygorowicz-Kosakowska K. 2023)

Ganoderma lucidum was the most frequently used type of mycelium in the studied examples, it was used in 40% of them. The reason may be that its antibacterial and antifungal properties can help prevent mold and bacteria from growing on the structure. These results are consistent with published research from 2021, that is a review article identifying the main fungal species used to produce mycelium-based composites in the literature. (Yang, Libin & Park, Daekwon & Qin, Zhao, 2021)

Comparative analysis showed that mycelium-based composites can be created using commonly available natural resources. MBC can be grown on a variety of substrates, such as agricultural or construction waste. It can therefore be speculated that it would be beneficial to use waste from construction projects to create new buildings using mycelium. This could help reduce pollution and waste from the construction sector. These conclusions are confirmed in an article from 2023, describing the potential possibilities of using mycelium in green construction. (Kenneth Kanayo Alaneme, Justus Uchenna Anaele, Tolulope Moyosore Oke, Sodiq Abiodun Kareem, Michael Adediran, Oluwadamilola Abigael Ajibuwa, Yvonne Onyinye Anabaranze 2023)

5. CONCLUSIONS

1. The analysis distinguished three main ways of using mycelium-based composites in construction. Monolithic structures constitute 10% of the analyzed examples, building structures, mostly in the form of bricks and blocks, are 50% of the examples, MBC as a wooden structures filling constitutes 40% of the examples.

2. After the details analysis, it can be noticed, that all of the projects are distinguished by an open form. It allows natural air flow, which helps regulating temperature and humidity levels inside the pavilions. Mycelial materials are sensitive to moisture and proper airflow can help keep the structures dry and in good condition. The open form can also prevent the potential mold growth and help maintain the safety and durability of the structure.

3. Ganoderma Lucidum was used in 40% of the analyzed examples, it is the most frequently chosen type of mycelium, while the most frequently used types of substrates were agricultural waste, wood chips and hemp. Mycelium-based composite structures can be built using waste, which contributes to increasing the potential for the use of these materials.

4. Analyzing and comparing the above examples it can be noticed, that in most of them, composites based on mycelium are not the only construction materials. Only two of the selected designs are made exclusively from mycelium. As the size of the project increases, more reinforcements and additional construction materials are required. These are mainly wooden structures, most often with metal joints. The exception is Mycotectural Alpha and the Monolith, which, although finally is an entirely mycelium-based structure, required a wooden form at the building stage.

5. Combining mycelium with other biodegradable materials can increase the durability and strength of the material. MBC can be coated with bio-coatings that preserve the mycelium and make it resistant to weather conditions. At the same time, they do not interfere with biodegradability and the natural decomposition processes. Among the analyzed examples, 70% were covered with bio-based coatings.

Table 3. Conclusions from the analyses . Source: author's work

Tabela 3. Wnioski z analiz. Źródło: opracowanie autorki

Analizowane zagadnienie/ Analyzed issue	Wnioski/ Conclusions
Rola Kompozytów na bazie grzybni w konstrukcji / role of MBC in construction	10% - materiał budowlany: monolit / building material: monolith 50% - materiał budowlany: cegła, bloki lub segmenty / building material: bricks, blocks, segments 40% - wypełnienie konstrukcji drewnianej / filling of the Woodem frame
Najczęściej stosowany rodzaj grzybni	Ganoderma Lucidum – 40%
Najczęściej stosowane substraty	Odpady rolne, zrębki drewna, konopie / Agricultural waste, wood chips, hemp
Najczęściej stosowany materiał wspomagający konstrukcje	Drewno / wood
Sposób dezaktywacji i obróbki grzybni / mycelium deactivation and processing	80% - obróbka termiczna grzybni / thermal processing 20% - naturalne wysychanie grzybni / natural deactivation by drying out 70 % - pokrycie biopowłokami / covering with bio-coatings
Wentylacja / ventilation	Wszystkie projekty charakteryzuje otwarta forma umożliwiająca przepływ powietrza / All designs are characterized by an open form allowing air flow

WYKORZYSTANIE KOMPOZYTÓW NA BAZIE GRZYBNI W BUDOWIE OBIEKTÓW MAŁEJ ARCHITEKTURY

1. WSTĘP

W pierwszym ćwierćwieczu XXI wieku w dziedzinie architektury nieustannie prowadzone są badania nad zrównoważonymi materiałami, które mogą być innowacyjną alternatywą dla istniejących rozwiązań. Jest to związane z próbą sprostania wyzwaniom współczesnego świata. Przy szybkim wzroście liczby ludności i urbanizacji oczekuje się, że roczna produkcja odpadów wzrośnie o 70%, z 2,01 miliarda ton w 2016 r. do 2,2 miliarda ton i 3,40 miliarda ton odpowiednio w 2025 i 2050 r. (The World Bank, 2019) Co więcej, według „United Nation’s ‘Global Status Report for Buildings and Construction’ z 2020 roku, sektor budowlany jest odpowiedzialny za 38% wszystkich emisji CO₂ związanych z energią. Jednym ze zrównoważonych materiałów, stale poddawanych badaniom jest grzybnia (mycelium). Jej możliwości wykorzystania zostały opisane w licznych artykułach naukowych obejmujących produkcję (Jiang, L.; Walczyk, D.; Mooney, L.; Putney, S. 2013), zastosowania i właściwości (Abhijith, R.; Ashok, A.; Rejeesh, C.R. 2018), zastosowania w elektronice (A.; Ayres, P.; Beasley, A.E.; Chiolerio, A.; Dehshibi, M.M.; Gandia, A.; Albergati, E.; Mayne, R.; Nikolaidou, A.; Roberts, N. 2022), w architekturze (Bitting, S.; Derme, T.; Lee, J.; Van Mele, T.; Dillenburger, B.; Block, P. 2022), patenty związane z kompozytami na bazie grzybni (MBC) (Cerimi, K.; Akkaya, K.C.; Pohl, C.; Schmidt, B.; Neubauer, P. 2019), zastosowania w meblarstwie i sztuce (Sydor, M.; Bonenberg, A.; Doczekalska, B.; Cofta, G. 2022), zrównoważony rozwój (Fairus, M.J.B.M.; Bahrin, E.K.; Arbaain, E.N.N. 2022), oraz właściwy wybór gatunków grzybów generujących materiał (Sydor, M.; Cofta, G.; Doczekalska, B.; Bonenberg, A. 2022). Już w 2022 roku opublikowane były przynajmniej 92 prace badawcze na temat kompozytów na bazie grzybni (Van den Brandhof, J.G.; Wösten, H.A.B. 2022). Mają one ogromny potencjał nie tylko w świecie biologii, ale również w zakresie zrównoważonej architektury i innowacyjnego projektowania. Grzybnia ulega rozkładowi w naturalny sposób i jest w pełni biodegradowalna. W porównaniu do tradycyjnych materiałów budowlanych charakteryzuje ją niski ślad węglowy (Lelivelt, R.J.J. 2015). Materiał może być wykorzystany ponownie, przez jego zdolności do kompostowania. Produkty wykonane z grzybni po zakończeniu cyklu użytkowania nie wymagają utylizacji (Jiang, L.; Walczyk, D.; Mooney, L.; Putney, S. 2013).

W ciągu ostatnich 15 lat, od roku 2009, zaprojektowano i zbudowano wiele obiektów ilustrujących możliwe zastosowania MBC w architekturze. Dotychczasowe próby wykorzystania kompozytów na bazie grzybni, do roku 2024, mają głównie charakter eksperymentalny a największymi istniejącymi konstrukcjami są budowane w różnych strefach klimatycznych pawilony. Przyjmują różnorodne formy, od prostych łuków i małych sklepień po skomplikowane konstrukcje i pawilony przypominające wieże. Choć pomysł wykorzystania grzybni w architekturze staje się coraz bardziej popularny a kompozyty na bazie grzybni mają potencjał, aby wejść na rynek, temat ten wciąż niesie ze sobą wiele wyzwań ze względu na niekonwencjonalny wygląd, słaba odporność tych materiałów na warunki atmosferyczne i negatywne skojarzenia z pleśniami. Wraz ze wzrostem świadomości konsumentów na temat korzyści środowiskowych materiałów na bazie grzybni, jest duża szansa na szersze zastosowanie tego materiału w projektach architektonicznych.

Odrębnym obszarem działań autorki jest badanie możliwości wykorzystania kompozytów na bazie grzybni przez wykonywanie prototypów. Są to prototypy użytkowe małej skali, stąd zainteresowanie i chęć zbadania potencjalnych możliwości wykorzystania grzybni w budowie większych konstrukcji.

2. METODY I CEL BADAŃ

Pierwszą z metod badawczych była analiza literatury: Przeprowadzono szczegółową analizę literatury przedmiotu w celu zgromadzenia informacji na temat właściwości grzybni jako materiału budowlanego, jej zastosowań w architekturze oraz dotychczasowych badań naukowych.

Kolejną metodą była analiza detali projektowych: Dokonano analizy detali projektowych każdego z wybranych projektów. Skupiono się na: połączeniach grzybni z innymi materiałami budowlanymi, sposobach ochrony grzybni przed czynnikami zewnętrznymi oraz aspektach estetycznych i wykończeniowych.

Ostatnią z metod badawczych była analiza porównawcza: Zbadano 10 wybranych przykładów obiektów małej skali, w których wykorzystana została grzybnia. Porównano je pod kątem parametrów technicznych, zastosowanych materiałów i detali. Analiza obejmuje:

- Lokalizację
- Przeznaczenie i rozmiar projektu
- Rolę grzybni w konstrukcji pawilonu
- Rodzaj grzybni
- Rodzaj substratu
- Materiały wspomagające konstrukcję
- Sposób dezaktywacji i obróbki grzybni

Kryteria doboru przykładów badawczych obejmują kilka aspektów. Jednym z nich jest aktualność rozwiązań, wybrane zostały konstrukcje z ostatnich 15 lat. Kolejnym kryterium była skala pawilonów, do badania dobrane zostały jak największe istniejące realizacje. Wszystkie wyselekcjonowane projekty to formy architektoniczne, które prezentowane były na różnorodnych wystawach i festiwalach, ukazując szerokiemu gronu odbiorców możliwości wykorzystania grzybni. Ich cel można określić jako wystawienniczo-doświadczalny.

Celem badania jest ustalenie roli kompozytów na bazie grzybni w konstrukcji pawilonów oraz identyfikacja, czy materiał ten jest elementem nośnym, czy wypełniającym. Ważne jest również określenie specyfiki form architektonicznych ze względu na potrzeby wentylacji przy wykorzystaniu w nich mycelium. Kolejnym istotnym zagadnieniem jest ustalenie najczęściej stosowanych rodzajów grzybni i substratów, oraz materiałów pomocniczych wykorzystywanych w konstrukcji projektów. Ostatnim z celów jest ustalenie wpływu obróbki termicznej oraz nakładania bio-powłok, na fakturę i właściwości materiałów na bazie grzybni.

Celem analizy porównawczej jest zebranie i uporządkowanie dotychczasowych osiągnięć w zakresie wykorzystania grzybni w projektach architektonicznych oraz uzyskanie z nich danych, które zilustrują zakres możliwości i sposobów wykorzystania kompozytów na bazie grzybni w tworzeniu tego typu obiektów.

3. ANALIZA PRZYKŁADÓW

Przeanalizowano dziesięć zróżnicowanych strukturalnie przykładów obiektów wykonanych z kompozytów na bazie grzybni. W tabelach 1. oraz 2. zebrano informacje odnośnie poszczególnych, opisanych niżej realizacji.

3.1 Drzewo Myco

The Myco Tree to instalacja artystyczna, zlokalizowana wewnątrz pomieszczenia muzealnego, której konstrukcję zaprojektowano z wykorzystaniem statyki graficznej 3D. Składa się ona z 15 elementów węzłowych z kompozytów na bazie grzybni o wysokości łącznej 3m., które podtrzymują bambusową kratę z 36 elementów liniowych.. Łączna waga elementów z grzybni wynosi 182 kg. Natomiast bambusowa konstrukcja waży łącznie 134 kg., a jej wielkość to około 4 m. na 4 m. szerokości w najwyższym punkcie.

3.2 Okrągły ogród

The Circular Garden to instalacja składająca się z luków z kompozytów na bazie grzybni, których suma długości wynosi około 1 km. Wykorzystaną grzybnię hodowano wcześniej w glebie przez okres dwóch miesięcy. Następnie zarodniki zostały zaimplementowane do materiału organicznego, by rozpocząć proces wzrostu. W celu stworzenia wytrzymałych, samonośnych struktur z mycelium, w projekcie zainspirowano się twórczością Gaudiego i metodą „odwróconej sieci trakcyjnej”. Według tej metody najlepszym sposobem na utworzenie struktur czysto ściskanych jest znalezienie ich formy za pomocą podwieszonych sieci trakcyjnych, a następnie ich odwrócenie. (Ratti, C.; Belleri, D. 202)

3.3 Rosnący pawilon

Konstrukcja pawilonu waży łącznie ponad 10 ton i ma w 95% okrągłą formę. Zbudowana jest głównie z uprawnych materiałów biodegradowalnych. Głównymi surowcami wykorzystanymi przy budowie pawilonu były: drewno, grzybnia, pozostałości z sektora rolnego, sitowie i bawełna. Powłoka tego pawilonu składa się z 88 paneli z grzybni. By je uzyskać, konopie i len zostały zmieszane z odrobiną mycelium. W ciągu zaledwie kilku tygodni otrzymano dzięki temu mocne, bardzo lekkie, ognioodporne i wodoodporne panele. (Van den Berg, J., Konings, B. 2019)

3.4 Mycotectural Alpha

Philip Ross wyhodował elementy budowlane z grzyba *Ganoderma lucidum* i nazwał wynaleziony materiał mycotecture. Aby go uzyskać należy worki z trocinami gotować na parze kilka godzin w szczelnych workach, po czym wprowadzić do nich tkankę grzybową, która trawi i przekształca drewno. Powstałe w ten sposób elementy budowlane, w postaci cegieł, składają się z sieci korzeni grzybni, co czyni je mocniejszymi od betonu. Z nich zbudowana została forma łuku Mycotectural Alpha. (Armstrong, R. 2014)

3.5 HY-FI

Hy-Fi to skupisko okrągłych wież o wysokości ponad 12 m., uformowanych z 10000 cegieł, które zostały naturalnie wyhodowane z rozdrobnionych łodyg kukurydzy i grzybni. Jest to pierwsza tak duża konstrukcja, w której została zastosowana jako materiał budowlany cegła z grzybni. Pozyskiwanie tego materiału jest oparte na technice opracowanej przez Ecovative w 2007 roku. Do tego momentu głównie stosowana była ona w produkcji opakowań. Cegły zostały wyhodowane w czasie 5 dni, następnie ułożono je w stosy, które utworzyły trzy łączące się cylindry. Górne warstwy konstrukcji wykonano ze stalowych form używanych do uprawy cegieł. (Benjamin, D. 2017)

3.6 Skorupa z mycelium

Instalacja Shell Mycelium Pavilion została zaprojektowana z wykorzystaniem drewnianej konstrukcji. Została ona wypełniona brykietem kokosowym, który posłużył za podłoże do rozwoju grzybów. W ciągu kilku dni grzybnia rozwinęła się i utworzyła biały nalot, by następnie przez wpływ światła słonecznego zamienić się w suchą, twardszą powłokę. Projekt ma otwartą formę zewnętrzną, która ma zapraszać do eksploracji. (Syed, S. 2017)

3.7 My-Co Przestrzeń

Projekt ten jest próbą wykorzystania grzybni w formowaniu habitatów mieszkalnych. Pełnił funkcję m.in. stanowiska do spania i nauki oraz sali wystawowej dla dwóch mieszkańców. Jako szczep produkcyjny wybrano *Fomes fomentarius*. Pozyskano z niego 330 paneli, wewnątrz których znajdują się liny konopne dla wzmocnienia konstrukcji. Owocniki grzyba hubki są wodoodporne, bardzo stabilne, a jednocześnie lekkie. Ze względu na strukturę plastra miodu paneli charakteryzują je krzywe naprężenia ściskającego podobne do tych w piance budowlanej. (Meyer, V.; Schmidt, B.; Freidank-Pohl, C.; Schmidts, C.; Pfeiffer, S. 2022)

3.8 Monolit

Cechą szczególną tego pawilonu jest interesujący kształt, który obliczono poprzez podzielenie „kolumny grzybowej” na cztery równe części i ponowne ułożenie ich w symetryczną, czworonożną skorupę sklepienia. W celu uzyskania formy wykorzystano szalunki drewniane i tkaninowe w które włana została masa z grzybni. Po pozostawieniu materiału do wzrostu na pełne cztery dni, geowłóknina stopniowo była usuwana. Sześć dni po umieszczeniu grzybni usunięto wszystkie pozostałe szalunki, odsłaniając pierwszy na dużą skalę, monolityczny pawilon z grzybni uprawiany na miejscu.

3.9 Pawilon Hayes

Głównym zamysłem projektu było znalezienie materiału alternatywnego dla plastiku w branży filmowej i festiwalowej. Konstrukcja pawilonu składa się z drewnianej ramy o długości 26 metrów,

w kształcie mniej więcej cyfry 6, z jedną długą ścianą pokrytą grzybnią. Aby uformować ścianę, wykorzystane zostały płyty izolacyjne z grzybni stworzone przez producentów Biohm i Grown. Płyty pocięto a następnie połączono w sposób podobny do tego, jak scenografowie w branży filmowej i muzycznej rzeźbią wyszukane dekoracje z tanich paneli styropianowych. (Hahn J. 2023)

3.10 Pawilon tekstylny z mycelium

Pawilon został zbudowany przy użyciu organicznych tkanin, pociętych w geometryczne połączenie. Zostały one rozciągnięte w drewnianych ramach. W materiałach zaimplementowane zostały zarodniki grzybni, które żerują na podłożu z trocin i fusów kawy, by efektywnie rosnąć i rozprzestrzeniać się po tkaninie. Do połączenia tekstyliów z drewnianymi ramami wykorzystano kompostowalny biopolimer na bazie alg. (Jordahn, S. 2022)

Opracowana została tabela (tabela 2.) porównująca: Lokalizację, przeznaczenie projektu, rolę mycelium w konstrukcji, rozmiar projektu, rodzaj grzybni, rodzaj substratu, materiały wspomagające konstrukcję oraz rodzaj obróbki grzybni.

4. DYSKUSJA

W artykule z 2022 roku opisującym strategię budowania wielkoskalowych konstrukcji z grzybni (Dessi-Olive J., 2022) opisano, że: *Najbardziej powszechne podejście (...) opiera się na produkcji cegieł lub bloków uprawianych na zamówienie -wykonane form są aktywnie suszone w piecach, transportowane na plac budowy i montowane, zazwyczaj przy pomocy tymczasowych szalunków i ruszto- wań. Zgadza się to z wynikami badania. W większości analizowanych przykładów elementami konstrukcyjnymi były cegły lub bloki grzybni, nie uprawiane na miejscu budowy.*

W zależności od tego, jak grzybnia jest uprawiana i traktowana po zakończeniu wzrostu, wygląd i tekstura materiału mogą się różnić. Struktura i barwa mycelium jest nieregularna. Głównym czynnikiem na to wpływającym jest proces dezaktywacji grzybni możliwy między innymi poprzez obróbkę termiczną. Wśród analizowanych przykładów 30% nie zostało poddanych żadnej obróbce. Sprawiało to, iż na ich powierzchni można zaobserwować żywe organizmy, zmieniające z czasem kształt. Może to wpływać na odbiór materiałów i poczucie ich estetyki. Obawy te zostały zbadane i opisane w innych artykułach, między innymi w „Mycelium-Based Composite Materials: Study of Acceptance” z 2023 roku. *Produkty uprawiane na bazie żywej grzybni i substratów lignocelulozowych są porowate, mają nieregularną powierzchnię i zabarwienie. Naturalne pochodzenie tego typu materiałów i obawa przed grzybami mogą stanowić wyzwanie.* (Bonenberg A, Sydor M, Cofta G, Doczekalska B, Grygorowicz-Kosakowska K. 2023)

W badanych przykładach najczęściej stosowanym typem grzybni była *Ganoderma lucidum*, użyta w 40% przykładów. Powodem może być to, że zawiera związki o właściwościach antybakteryjnych i przeciwgrzybiczych, które mogą pomóc w zapobieganiu rozwojowi pleśni i bakterii na konstrukcji pawilonu. Wyniki te są zgodne z publikowanymi wynikami badań artykułu przeglądowego z 2021 roku, określającego główne gatunki grzybów stosowane do wytwarzania kompozytów na bazie grzybni w literaturze. (Yang, Libin & Park, Daekwon & Qin, Zhao, 2021)

Analiza porównawcza wykazała że kompozyty na bazie grzybni mogą powstawać z użyciem powszechnie dostępnych zasobów naturalnych. MBC można uprawiać na różnych podłożach, takich jak odpady rolnicze lub budowlane. Można więc spekulować, że korzystne byłoby wykorzystanie odpadów z projektów budowlanych do powstawania nowych budowli wykorzystujących mycelium. Mogłoby to pomóc w ograniczeniu zanieczyszczeń i ilości odpadów z sektora budowlanego. Wnioski te znajdują potwierdzenie w artykule z 2023 roku, opisującym potencjalne możliwości wykorzystania mycelium w zielonym budownictwie. (Kenneth Kanayo Alaneme, Justus Uchenna Anaele, Tolulope Moyosore Oke, Sodiq Abiodun Kareem, Michael Adediran, Oluwadamilola Abigael Ajibuwa, Yvonne Onyinye Anabaranze 2023)

4. WNIOSKI

Zebranie i uszeregowanie informacji zawartych w tabeli pozwoliło na wyciągnięcie wniosków i ciekawych uogólnień odnośnie współczesnego wykorzystania kompozytów na bazie grzybni.

1. Rola kompozytów na bazie grzybni w konstrukcji jest zróżnicowana. W analizie wyodrębnione zostały trzy główne sposoby wykorzystania MBC w konstrukcji. Struktury monolityczne stanowią 10% analizowanych przykładów, konstrukcje budowlane w postaci cegieł grzybniowych to 50% przykładów, MBC jako wypełnienie konstrukcji drewnianej stanowi 40% przykładów.

2. Specyfika form architektonicznych z kompozytu z grzybni uwzględnia konieczność wentylacji. Po szczegółowej analizie można zauważyć, że wszystkie projekty wyróżniają się otwartą formą, która umożliwi naturalny przepływ powietrza, co może pomóc w regulacji poziomu temperatury i wilgotności wewnątrz pawilonu. Jest to sprawa istotna ze względu na wrażliwość materiałów wykonanych z grzybni na wilgoć, zatem zapewnienie prawidłowego przepływu powietrza może pomóc w utrzymaniu konstrukcji w suchości i dobrym stanie. Otwarta forma może również zapobiegać gromadzeniu się wilgoci i potencjalnemu rozwojowi pleśni. Dobry przepływ powietrza pomaga zachować bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji.

3. *Ganoderma Lucidum* użyta została w 40 % analizowanych przykładów, jest to najczęściej wybierany rodzaj grzybni, natomiast najczęściej wykorzystywanymi rodzajami substratów były odpady rolne, zrębki drewna oraz konopie. Konstrukcje z kompozytów na bazie grzybni można budować z użyciem odpadów, co przyczynia się do zwiększenia potencjału wykorzystania tych materiałów.

4. Analizując i porównując powyższe przykłady łatwo zauważyć, że w większości z nich, dokładniej w 80%, kompozyty na bazie grzybni nie tworzą samodzielnych konstrukcji. Tylko dwa z wybranych projektów wykonane są wyłącznie z grzybni. Wraz ze wzrostem rozmiarów projektu wymagane jest zastosowanie większej ilości wzmocnień i dodatkowych materiałów konstrukcyjnych. Wśród analizowanych przykładów były to głównie konstrukcje drewniane, najczęściej z metalowymi złączami. Wyjątkiem były *Mycotectural Alpha*, oraz monolit, który, choć ostatecznie zbudowany w zasadzie wyłącznie z kompozytu na bazie grzybni, na etapie tworzenia wymagał konstrukcji drewnianej.

5. Łączenie grzybni z innymi materiałami biodegradowalnymi może zwiększyć trwałość i wytrzymałość konstrukcji. MBC można pokryć biopowłokami, które konserwują grzybnię i czynią ją odporną na warunki atmosferyczne. Jednocześnie nie zakłócają one biodegradowalności i możliwości naturalnego rozkładu. Wśród analizowanych przykładów 70% zostało pokrytych biopowłokami.

Biorąc pod uwagę wyniki analizy porównawczej można zauważyć szerokie możliwości wykorzystania kompozytów na bazie grzybni w architekturze. Uzasadnionym jest również oczekiwać iż wraz z rozwojem badań nad materiałem i jego popularyzacją znajdzie on szersze zastosowanie wśród architektów.

BIBLIOGRAPHY

- Abhijith, R.; Ashok, A.; Rejeesh, C.R. Sustainable Packaging Applications from Mycelium to Substitute Polystyrene: A Review. *Mater. Today Proc.* 2018, 5, 2139–2145. [CrossRef]
- Adamatzky, A.; Ayres, P.; Beasley, A.E.; Chiolerio, A.; Dehshibi, M.M.; Gandia, A.; Albergati, E.; Mayne, R.; Nikolaidou, A.; Roberts, N.; et al. Fungal Electronics. *Biosystems* 2022, 212, 104588. [CrossRef] [PubMed]
- Armstrong, R. The Post- Epistemological Details of Oceanic Ontologies. *Architectural Design* 2014, 84, 112–117, doi:10.1002/ad.1789.
- Benjamin, D. Living Matter. In *Active matter*; Tibbits, S., Ed.; MIT Press: Cambridge, MA, USA, 2017; p. 32 ISBN 978-0-262-03680-1.
- Bitting, S.; Derme, T.; Lee, J.; Van Mele, T.; Dillenburger, B.; Block, P. Challenges and Opportunities in Scaling up Architectural Applications of Mycelium-Based Materials with Digital Fabrication. *Biomimetics* 2022, 7, 44. [CrossRef] [PubMed]
- Bonenberg A, Sydor M, Cofta G, Doczekalska B, Grygorowicz-Kosakowska K. Mycelium-Based Composite Materials: Study of Acceptance. *Materials* (Basel). 2023 Mar 8;16(6):2164. doi: 10.3390/ma16062164. PMID: 36984044; PMCID: PMC10051586.

- Cerimi, K.; Akkaya, K.C.; Pohl, C.; Schmidt, B.; Neubauer, P. Fungi as Source for New Bio-Based Materials: A Patent Review. *Fungal Biol. Biotechnol.* 2019, 6, 17. [CrossRef]
- Cultivated Building Materials: Industrialized Natural Resources for Architecture and Construction*; Hebel, D.E., Heisel, F., Eds.; Birkhäuser: Basel, Switzerland, 2017; ISBN 978-3-0356-1106-9.
- Dessi-Olive, J. Monolithic Mycelium: Growing Vault Structures. In Proceedings of the Proceedings of the 8th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies—IC NOCMAT; Nairobi, Kenya, 2019; pp. 2–15.
- Fairus, M.J.B.M.; Bahrin, E.K.; Arbaain, E.N.N. Norhayati Ramli Mycelium-Based Composite: A Way Forward for Renewable Material. *J. Sustain. Sci. Manag.* 2022, 17, 271–280. [CrossRef]
- Jennifer Hahn Glastonbury's Mushroom Mycelium Pavilion Explores Sustainable Stage Design. *Dezeen* 2023.
- Jiang, L.; Walczyk, D.; Mooney, L.; Putney, S. Manufacturing of Mycelium-Based Biocomposites. In Proceedings of the International SAMPE Technical Conference, Covina, CA, USA, 6–9 May 2013; Beckwith, S.W., Ed.; Society for the Advancement of Material and Process Engineering: Long Beach, CA, USA, 2013; pp. 1944–1955.
- Jordahn, S. Chart Art Fair Pavilion Aims to Investigate the Potential of Mycelium. *Dezeen* 2022.
- Kenneth Kanayo Alaneme, Justus Uchenna Anaele, Tolulope Moyosore Oke, Sodiq Abiodun Kareem, Michael Adediran, Oluwadamilola Abigael Ajibuwa, Yvonne Onyinye Anabaranze, Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications, *Alexandria Engineering Journal*, Volume 83, 2023, Pages 234-250, ISSN 1110-0168,
- Lelivelt, R.J.J. The Mechanical Possibilities of Mycelium Materials. Master's Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 2015.
- Materialmen Atlas / Material Atlas. The Growing Pavilion*; van den Berg, J., Konings, B., Eds.; Company New Heroes: Amsterdam, Netherlands, 2019;
- Meyer, V.; Schmidt, B.; Freidank-Pohl, C.; Schmidts, C.; Pfeiffer, S. MY-CO SPACE: An Artistic-Scientific Vision on How to Build with Fungi. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2022, 1078, 012070, doi:10.1088/1755-1315/1078/1/012070.
- Ratti, C.; Belleri, D. Towards a cyber ecology. *Agathòn* 2020, 8, 8–19, doi:10.19229/2464-9309/812020.
- Sydor, M.; Bonenberg, A.; Doczekalska, B.; Cofta, G. Mycelium-Based Composites in Art, Architecture, and Interior Design: A Review. *Polymers* 2022, 14, 145. [CrossRef]
- Sydor, M.; Cofta, G.; Doczekalska, B.; Bonenberg, A. Fungi in Mycelium-Based Composites: Usage and Recommendations. *Materials* 2022, 15, 6283. [CrossRef]
- Syed, S. Shell Mycelium Pavillion: The Latest Architecture and News. *ArchDaily* 2017.
- Van den Brandhof, J.G.; Wösten, H.A.B. Risk Assessment of Fungal Materials. *Fungal Biol. Biotechnol.* 2022, 9, 3.
- World Bank. 2019. World Development Report 2019: The Changing Nature of Work. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1328-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO
- Yang, Libin & Park, Daekwon & Qin, Zhao. (2021). Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review. *Frontiers in Materials*. 8. 737377. 10.3389/fmats.2021.737377.

AUTHOR'S NOTE

Anna Lewandowska is an employee of the Faculty of Architecture of the Poznań University of Technology. The author's scientific interests concern ecological biomaterials used in architecture and design. She pays particular attention to conducting teaching classes in a way that develops students' creativity and aesthetic sensibility.

O AUTORZE

Anna Lewandowska jest pracownikiem Wydziału Architektury Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe autorki dotyczą ekologicznych biomateriałów wykorzystywanych w architekturze i designie. Szczególną uwagę poświęca prowadzeniu zajęć dydaktycznych w sposób rozwijający kreatywność i wrażliwość estetyczną studentów.

Contact | Kontakt: lewaandowsk.anna@gmail.com