

MICÉLIUM ARCHITEKTÚRA

Az anyag, és biokompozit módosulatainak sajátosságai, építészeti lehetőségei

Tóth-Könczey Péter

Konzulens: Klobusovszki Péter

Tartalom

| | |
|----------------------|----|
| Absztrakt | 3 |
| A Gombák Lelke | 4 |
| Ember és környezete | 5 |
| Matéria | 6 |
| Entitás | 7 |
| Jelen | 10 |
| Micélium | 11 |
| jelentősége | 12 |
| előállítás | 13 |
| technológia | 14 |
| életciklus | 20 |
| alkalmazás | 21 |
| felhasználás | 22 |
| építészet | 23 |
| Symbiocene Living | 23 |
| In Vivo | 24 |
| Silver Hayes Project | 25 |
| Hy-Fi Project | 26 |
| Shell Mycelium | 27 |
| My-Co Space | 28 |
| Konklúzió | 29 |
| kitekintés | 30 |

ABSZTRAKT

„Az új szárazföldi ökoszisztémákat mind a mai napig gombák alapítják.” Írja Merlin Sheldrake.

Ez a mondat magába foglalja a kutatás által érintett témaköröket: mind a gombák szerteágazó életét és működésük még nem teljesen ismert mélységeit, mind pedig a materiális hasznosításukban rejlő lehetőségeket.

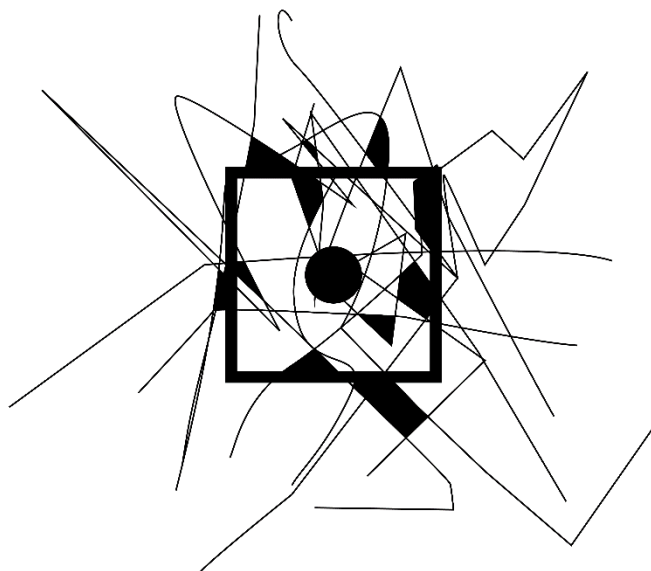
Meg sem tudjuk érteni a gombákat – más természeti lények, különböző „idegrendszeren” alapszik organizmusuk, mintha egy másik dimenzióban létezne az őket felépítő rendszer - amely dimenzióval mi nem vagyunk kapcsolatban. Egyelőre.

Azonban háttérrendszerüket még ha nem is látjuk át, az már világossá vált, hogy élelmiszeripari felhasználásukon kívül sokrétűen lehet hasznosítani őket – kiemelten építészeti területeken is.

Napjainkban egyre nagyobb hangsúly helyeződik a fenntartható anyagok kutatására és az azokkal való kísérletezésre. Ennek a folyamatnak egyik ága a gombákra és azok segítségével előállítható anyagokra fókuszál – azaz a micélium biokompozitokra. Az eddigi vizsgálatok azt mutatják, hogy valós alapja van a kompozitok széles körű alkalmazásának különböző ipari területeken, ezen belül építőipari felhasználása is fényes jövőt sejtet (hő-hangszigetelés, térmodell, tömítés, burkolat...), amennyiben a jelenlegi kutatások és fejlesztések, amelyek középpontjában az anyagminőségek és fizikai jellemzők javítása áll, nem vesztenek lendületükből.

A kutatás a gombák, mint rendszer, mélyebb megismerésétől indul, jelenlegi kutatások vizsgálatával majd az anyaggal való konkrét kísérletezéssel (élőközegek és kompozit anyagtársítások által kialakuló különböző fizikai, vegyi tulajdonságok) fejt fel a jövő lehetőségeit. Célja az anyag létjogosultságának bizonyítása, valamint felhasználásának népszerűsítése – amelyeket a kísérletek várt eredményeképp megvalósuló, kedvező anyagtulajdonság-kombinációk biztosíthatnak.

A Gombák lelke



EMBER ÉS KÖRNYEZETE

Egy elképzelt világban Az Emberiség elfordul a természettől, a föld tárgyiassá válik – Emberi tulajdon. Minden csak kibányászható, kibányászandó (!) nyersanyag. Érzeti – érzéki kapcsolata megszakadt a világgal, abszolút alárendelt szerepet osztott annak – látható ez az általános fogalmazásmódból is. Mégis milyen alapon, jogon is oszt ki bármit ez az emberiség, merül fel a kérdés. És vajon jó-e az, hogy Ő oszt bármit. Felmerül a kérdés bennük is idővel, hiszen egyre problémásabbnak tűnik a természetben való megélhetésük, sőt, ebben talán ők tűnnek hibásnak. Az emberiség lenne valójában a probléma – vagyis inkább az emberiség „*Ontológiája*”, veti fel a *Living in Mycelium* hipotézise.¹ Most sejlik fel bennük a gondolat, hogy erre a megoldást nem biztos, hogy a további technológiai előrehaladás hozhatja meg, sőt az csak további problémák okozója, inkább csak amolyan menekvés a visszafordíthatatlan elől.

Lehetséges, hogy a megoldást nem ezen az úton, hanem a természettel való kapcsolatuk visszaépítésében kellene keresniük? A kérdést elkezdi fontolgatni egy-egy fejét felütő kezdeményezés, amely a témakörön belül, a gombák világában látja a megoldást, hiszen már csak materiális szempontból is egyre több lehetőséget mutat az anyag. Azonban, amely gondolat kezd körvonalazódni ekkor, ezt nem materiálisan kezdjék vizsgálni, hiszen épp az minden probléma forrása. Ne csak kibányászandó nyersanyagként tekintsenek rá, velük egyenlő, minden síkon párhuzamos fél legyen Ő.

Persze ez a gondolat sem a semmiből pattant ki, sőt fordítva történt: először materiális hasznukat kellett meglátniuk ahhoz, hogy mélyebb vizsgálatok, ismeretek a gombákhoz való hozzáállásukat *gyökereiben* átalakítsa.

¹ DESPRET Vinciane & BENTO - AVENTIN Christine - SALME Juliette: *Living in Mycelium*
Onthology -Ontológia: a világ entitásainak egymással való kapcsolata. Minél fejlettebb az ontológiája egy társadalomnak (társadalom, mint élőlények csoportja) annál mélyebb a kapcsolata a többi társadalommal és más entitásokkal. Az emberiségnek alacsony, fejletlen az ontológiája, hiszen eltávolodott a természettől, azt csak nyersanyagként képes látni

Matéria

Kezdetben a gombák és micéliumhálózataik² anyagi tulajdonságai keltették fel figyelmét az akkori tudósoknak, kutatóknak. A kezdeti, élelmiszerként való felhasználáson kívül sokrétűen lehetett hasznosítani őket, ipari területeken is. Az ilyen anyagok kutatása az úgynevezett micélium biokompozitokra (micéliumfonalak és egyéb anyagok együttese) koncentrált. Ezek a biokompozitok lehetőséget adtak remek mechanikai tulajdonságú anyagok előállítására, és ezen fellelkesülve laboratóriumi kísérletek, vizsgálatok kezdődtek a lehetőségek kizsákmányolására. Különböző anyagokkal keverve könnyű és szilárd, vagy akár puha és hajlítható kompozitok voltak létrehozhatóak. El is kezdett népszerűsödni a micélium materiák használata: kísérletekként kezdetben kisebb tárgyakat, csomagolást, műbőrt állítottak elő, amely tárgyak kikerültek a világpiacra is. Később komolyabb, építészeti felhasználásra is alkalmas anyagokat tudtak előállítani: egész házakat építettek belőlük, amelyekbe be is költöztek lakók, állandó élettérként használva azokat.

² ARCANUM, Magyar etimológiai szótár: *micélium* – ‘a gomba tenyésztését felépítő sejtfonalak szövedéke’

Entitás

Azonban a kutatók a megismerések folyamán mélyebb szempontokból is megismerték a gombákat. Merlin Sheldrake, Az élet szövedéke című művében írt az entitásokról, amelyben bensőségesebb betekintést nyújtott a gombák világába, és olyan gondolatokat vetett fel, amelyek, ha akkor abszurdnak is tűnhettek, később bebizonyosodott realitásuk.

"A gombák mindenütt ott vannak, de könnyű nem észrevenni őket... Fenntartanak bennünket, és minden egyebet is, ami nélkülözhetetlen a számunkra. Folyamatosan hatással vannak magára az életre is úgy, ahogyan azt évmilliárdok óta teszik. Köveket esznek, talajt teremtenek, szennyező anyagokat emésztenek meg, táplálják és megölik a növényeket, életben maradnak a világűrben, látomásokat váltanak ki, táplálékot termelnek, gyógyszereket állítanak elő, állatok viselkedését befolyásolják, s hatással vannak a Föld légkörének összetételére."

Sheldrake könyve több szempontból szemrevételezte a gombákat - minden esetben megjelent világuk szerteágazottságának ámulatba ejtő mértéke, és ezzel párhuzamosan az Emberiség ismereteinek hiánya az élőlényről. A gombák fajainak több mint 90%-át le sem írták, nem meglepő így az Író lelkesedése: ha már akkori tudásuk alapján nagy potenciált ígért az organizmus, további ismeretek birtokában vajon milyen lehetőségeket nyithatna meg? Néhány felütésnyi gondolat útján is érthetővé vált az élőlény különlegessége:

„Az új szárazföldi ökoszisztémákat mind a mai napig gombák alapítják.”

„A gombák átvészelték a Föld mind az öt nagy kihalási eseményét; ezek mindegyike a bolygón akkor élt fajok 75-95%-át elpusztította. Néhány gomba még ezekben a katasztrofális időszakokban is dúsan tenyészett.”

„Egyes gombáknak több tízezer párosodási típusa van, ami nagyjából a mi nemeink megfelelője”

„Sok gomba azért termel növényi, illetve állati hormonokat, hogy megváltoztassa a gazdaszervezetei élettani folyamatait.”

„Egy bányameddőkből izolált gomba a radioaktív sugárzással szemben legellenállóbb élőlények egyike az általunk ismert fajok közül, és segíthet a nukleáris hulladéklerakók megtisztításában.”

Sheldrake könyvét követően a micéliummal foglalkozó kutatók környezete lett figyelmes rájuk: a micéliummal való foglalkozás folyamatában elkezdtek máshogy kezelni Azt - Őt, befolyásolható matéria helyett inkább egy olyan egyenrangú félként, amellyel tárgyalás útján, kommunikálva juthatnak el a legjobb megoldáshoz. Egyre gyakrabban hallatszottak az olyan fogalmak, hogy „mit kíván a Micélium”, semmint azok, hogy „mivel és milyen arányokban tápláljuk az anyagot”.

A kísérleti házak lakóinak is változott a viszonya a házával kapcsolatban. A házak életét követő vizsgálatok, a lakókkal való konzultációk közben körvonalazódott ki, hogy idővel ők sem egy őket kiszolgáló házként tekintettek környezetükre, hanem egyfajta együttélés érzetét sugározták, például a házat csak olyan esetben újították föl, „ha Ő kívánta”. Felújításkor pedig egyre gyakrabban kerültek elő motívumok a micélium alkotta felületeken, amelyeket vizsgálva olyan következtetésre jutottak, hogy egyfajta kommunikációs próbálkozás, kinyilatkoztatás az entitás részéről...

Lehetséges tehát, hogy világproblémáink megoldását a gombavilággal való csatlakozásban, amely útján a természettel való kapcsolatuk visszaépítésében kellene keresniük valóban?

A történet, amelyet *Merlin Sheldrake: Az élet szövedéke* és a 2023-as Biennáléra készült könyv: az *Élet micéliumban* erősen inspiráltak, kitalált ugyan, de sokat merít a valóságból is.

JELEN

Miért is lenne mindez hipotézis, valótlan feltevés? Most is ismerjük már a gombákról való tudatlanságunk határait, hiszen a gombák neuro-architektúrájába nem látunk bele – más természeti lények, különböző „idegrendszeren” alapszik organizmusuk, mintha egy másik dimenzióban létezne az őket felépítő rendszer - amely dimenzióval mi nem vagyunk kapcsolatban. Egyelőre.

Szerkezetük az egész világot átszövi, mindennel kommunikál, a különböző organizmusok között jelközvetítő szerepe van. Még az űrben, néhány egyed az atomsugárzást is tudja tápanyagként hasznosítani. Olyan tulajdonságairól még szó sem esett, hogy elektromos ingerekre reagál, akár a teljes, kollektív micéliumhálózat; képes egyetlen csillag fényét is érzékelni miközben a vakító fényt is elviseli; a közelében lévő tárgyakat érzékeli felülettől függetlenül, rövid, akár 1 perces reakcióidővel – anélkül, hogy hozzáérne.

Láthatjuk tehát, hogy mennyi lehetőséget rejt magában ez a „hálózatalapú élőlény”, és mindezen lehetőségek megteremtője: a micéliumhálózat. A következőkben az anyag valóságába tekintünk, ezen állítás alátámasztásaképp.

MICÉLIUM

“... a gombafonalak, azaz hifák elágazásával, összeolvadásával és összegabalyodásával létrejövő, kaotikus csipkemintázatokat nevezik micéliumnak.”³

Maga a micélium a gomba azon, fonálszerű vegetatív része, mely a természetben a föld alatt, fatörzsből, kőzetek repedéseiben él, vagy ellenőrzött körülmények között, megfelelő szubsztrátumban. A gombafonalak, azaz hifák létrehoznak egy komplex hálózatot, mely a sűrűn átszővi az élőközeget, ebből vesz fel tápanyagokat a növekedéshez.

Ennek az organizmusnak fontos jellemzője, hogy sokféle szubsztrátumban képes növekedni, legyen az mezőgazdasági hulladék, kávézacc, fűrészpor, papírszármazék – egyes gombafajok esetében ez olyan közeg is lehet, amely más élőlény számára élehetetlen, ilyen például radioaktív sugárzás. Növekedését többek között a hőmérséklet, a relatív páratartalom és a fényviszonyok is befolyásolják. E növekedés folyamán a micélium cellák lényegében a polisztirolhoz hasonló struktúrát hoznak létre, miközben felélik a szubsztrátumot.

³ SHELDRAKE, Merlin: *Az élet szövődése*

JELENTŐSÉGE

“A gombák világokat teremtenek és szednek szét. Rengeteg módja van annak, hogy tetten érjük őket: amikor gombalevest főzünk, vagy egyszerűen csak megesszük; amikor gombát gyűjtünk vagy vásárolunk; amikor alkoholt erjesztünk; növényt ültetünk vagy csak földbe mélyesztjük a kezünket. És akár beengedünk egy gombát az elménkbe, vagy csak rácsodálkozunk arra, ahogyan képes más elméjébe belejutni; akár meggyógyít bennünket egy gomba, vagy végignézzük, ahogy meggyógyít valaki mást; akár gombából építjük az otthonunkat vagy gombatermesztéshez kezdünk otthon, a gombák tetten fognak érni bennünket. Ha élünk már meg is tették. ”

Napjainkban egyre nagyobb hangsúly helyeződik a fenntartható anyagok kutatására, az azokkal való kísérletezésre majd felhasználásukra, ökológiai lábnyomunk csökkentése érdekében, hiszen látszik, hogy jelen nyersanyagfelhasználásunk hosszú távon működésképtelen, már most is destabilizálta az ökoszisztémát. Ez különösképpen igaz az építészet területeire, hiszen az építkezések az egyik leginkább környezetterhelő tevékenységek. Ennek az anyagkutatói folyamatnak egyik ága a gombákra és azok segítségével előállítható anyagokra fókuszál.

A 2010-es évektől kezdve foglalkozik a tudomány komolyabban az ún. micélium biokompozitok tanulmányozásával.

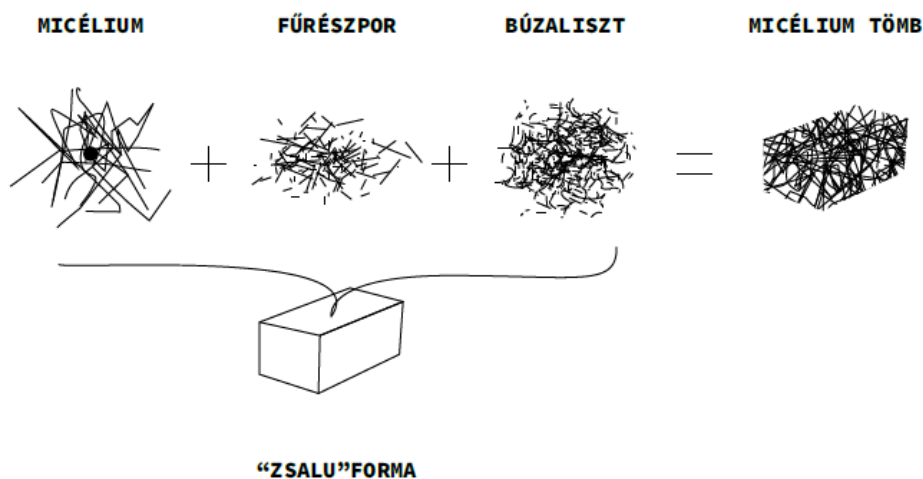
A micélium mint biokompozit sok más fenntartható anyagot felülmúl, aránylag kevés kompromisszummal, nincs kiugróan negatív tulajdonsága, ellenben a “versenyhátrányokkal”: hasonló tulajdonságokkal rendelkező növényalapú kompozitokkal összehasonlítva kitér az anyag negatív szén-dioxid “kibocsátása” (hiszen azt megköti), a gyártási egyszerűség, és a folyamán szükséges anyagok mennyiségének kicsiny mértéke (víz például nem is kell hozzá) – ha valamilyen anyag mégis felülmúlná ilyen a területeken, akkor a számunkra hasznosítható tulajdonságai (például hővezetés, alaktartás, tűzállóság, könnyed kezelhetőség) előnyösebbek micéliumnak. Egy sokoldalú anyag, amelynek kevés árnyoldala van, több oldalról vizsgálva is hasznosítható.

Az pedig még csak említés szintjén hangzott el, hogy különféle anyagok utólagos, vagy gyártás közbeni vegyítésével milyen anyagtulajdonságok érhetőek el és milyen új szempontokat látahtunk meg. Rálátásunk sincs még igazán a lehetőségekre, hiszen a közeli múltban kezdődöttek, és a jelenben még gyerekcipőben sem járnak az erre irányuló kutatások.

ELŐÁLLÍTÁS

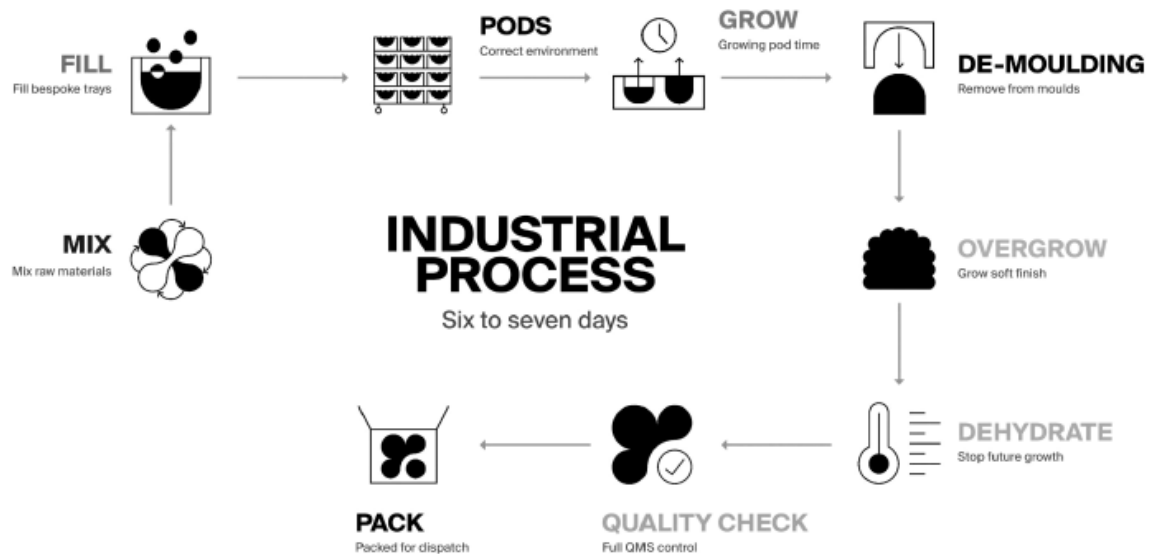
Az élőlény, ahogy más területeken, itt is jeleskedik. Az előálltáshoz szükséges eszközök egyszerűek, primitívek akár, a folyamat szakaszai pedig könnyen elsajátíthatóak, illetve az organizmus sem egy kifejezetten “érzékeny virág”, így a körülmények is relatív könnyedséggel biztosíthatóak. Alapfeltételei mindössze a viszonylagos higiénia, fertőtlenítés, valamint a léghőmérséklet és páratartalom szabályozása. Az anyagszükséglet is, ahogy már korábban említésre került, kevés és könnyen beszerezhető. A micélium biokompozit akár otthon kialakítható körülmények között is előállítható.

A micélium termőtestet szubsztumátumokkal, például búzaliszttal és fűrészporral keverve egy zsaluformába helyezük. A micélium cellák lényegében a polisztirolhoz hasonló struktúrát hoznak létre, miközben felélik a szubsztrátumot. Ezen felül a növekedés folyamata lehetővé teszi, hogy a micéliummal kevert közeget formába öntsük, s így az anyag felveszi annak formáját. Ez a folyamat 6-8 napot vesz igénybe megfelelő körülmények között. Miután az ún. átszövetés megtörtént az anyag kikerül a formából. Ezt követően a teljesen átszövetett szubsztrátumot ki kell szárítani (levegőn vagy magas hőmérsékleten), ekkor a micélium hálózat élettelené válik, viszont a struktúra mely az eredeti szubsztrátummal szorosan összefonódott megmarad. Ezt a cellás, lebomló anyagot nevezzük micélium biokompozitnak.



TECHNOLÓGIA

Egyes technológiák, gyártásmódok részben eltérhetnek, azonban rendszerét, felépítését lehet általánosan vázolni:



Magicalmushroom.com

A szubsztátum elsődlegesen mezőgazdasági hulladék, nevezetesen: gyapjú, kukorica, gabonafélék, len, kender, lényege, hogy lignocellulóz termelődjön a növényi maradványokban. Ez főképp cellulózt, hemicellulózt és lignint tartalmaz. Ez azért fontos, mert a funghi elsődlegesen ezeket tudja lebontani. Lehetséges azonban kevert, és kivonat szubsztrátum alkalmazása is⁴, például tiszta cellulóz és burgonya dextróz elegy (potato dextrose broth ,PDB) használata is egyszerű és előnyös. Ez az 1:1 arányú keverék cukrokban gazdag, és könnyen „emészthető” a micélium számára.

⁴ HANEEF, M., CESERACCIU, L., CANALE, C., BAYER, I. S., HEREDIA-GUERRERO, J. A., and ATHANASSIOU, A. (2017): *Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties*

A szubsztrátumot, hogyha igényli, felaprítják, majd megtisztítják az esetleges szennyeződésektől, sterilizálják, a szubsztrátum anyagától függő eljárással (gabonafélék esetén például a csíramentességet általában pasztörizálással érik el).



Ezután jön a keverés: a steril szalmát és a gomba szaporító anyagát, a micéliumát keverjük össze. A keverés folyamán, illetve utána is fontos a levegő páratartalma valamint a hőmérséklet, ezek befolyásolhatják a micélium növekedését. Az ideális hőmérséklet a szobahőmérséklet, 24-25°C⁵, a relatív páratartalom lehet akár 98% is.

A gomba fajtája sarkalatos kérdés, hiszen ez az egyik fő befolyásolója a micélium biokompozit mechanikai tulajdonságainak, valamint a készítés időtartamának is jelentős része ezen múlik. A micélium mikro-struktúrája, felépítése és felületi szerkezete okozza a fajták közötti eltéréseket, ezeket pedig a morfológiailag és funkcionálisan is eltérő hifák határozzák meg. Amennyiben például a termőtestben generatív, kötő és vázhifák is előfordulnak (azaz trimitikusak), a biokompozit jobb nyomási és húzási szilárdsággal fog bírni, mint a monomitikus (csak generatív hifák építik fel) termőtestekkel felépített kompozit.⁶

⁵ Hoa, H. T., and Wang, C.-L. (2015). The Effects of Temperature and Nutritional Conditions on Mycelium Growth of Two Oyster Mushrooms (*Pleurotus Ostreatus* and *Pleurotus Cystidiosus*). *Mycobiology* 43, 14–23. doi:10.5941/MYCO.2015.43.1.14

⁶ Hifatípusok a termőtestben

A. Generatív hifák, amelyek vékony falúak, citoplazmájuk sűrű és csatképződmények figyelhetők meg rajtuk, a termőrétegben bazídiumban végződnek.

A leggyakrabban alkalmazott Trimitikus gombafajok például a *T. Versicolor*, *Polyporus squamosus*, *Ganoderma lucidum*, míg monomitikus a *P. Ostreatus*.

Például a Lepketapló szakítószilárdsága 0.04 MPa, míg a késői laskagombáé csak 0.04 MPa – hasonlóan igaz ez a hajlítósilárdságokra is amely a lepketaplót illetve 0.22, a laskagomba esetében 0.06 (mindkét micélium repce szubsztrátumban való táplálása esetén).⁷



google.com

- B. Kötőhifák, amelyek vastag falúak és többszörösen elágaznak, a termőtestben haránt irányú összeköttetést biztosítanak.
- C. Vázhifák, amelyek vastag falúak, visszahajlók, de nem ágaznak el, a termőtesteket szilárdítják.
- D. Tejhifák csak bizonyos családokban (pl. tejelőgombák) fordulnak elő, tejnedvet tartalmaznak.

A termőtestek felépítése, aszerint hogy hányféle és milyen hifatípus alkotja, a következő lehet:

- A. Monomitikus: a termőtestet csak generatív hifák építik fel.
- B. Dimitikus: kétféle hifa vesz részt a termőtest kialakításában: generatív és vázhifák
- C. Trimitikus: a generatív és vázhifák mellett kötőhifák előfordulnak

⁷ Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., and John, S. (2020b). Engineered Mycelium Composite Construction Materials from Fungal Biorefineries: A Critical Review. *Mater. Des.* 187, 108397. doi:10.1016/j.matdes.2019.108397

A keverés utáni lépés a légmentes elzárás (akár egyszerű zsákkal, akár ipari körülmények között), majd 7-10 napig érintetlenül kell hagyni a beoltott szubsztrátumot a micéliumhálózat megfelelő kialakulása végett.



Ezek után a formázás következik – lényegében bármilyen formát, amelyből zsaluzatot tudunk kialakítani, le tud képezni a micélium, az egyszerű téglától kezdve a vékony műbőrön át az iparművészeti tárgyakig. Persze a zsalunak is megfelelő kialakításúnak kell lennie, hiszen ez biztosítja azt, hogy ne szövődjön hozzá a gomba. A formázás is 7 napot vesz igénybe hozzávetőlegesen, de ez már a kívánt mechanikai, felületi tulajdonságoktól is függ.

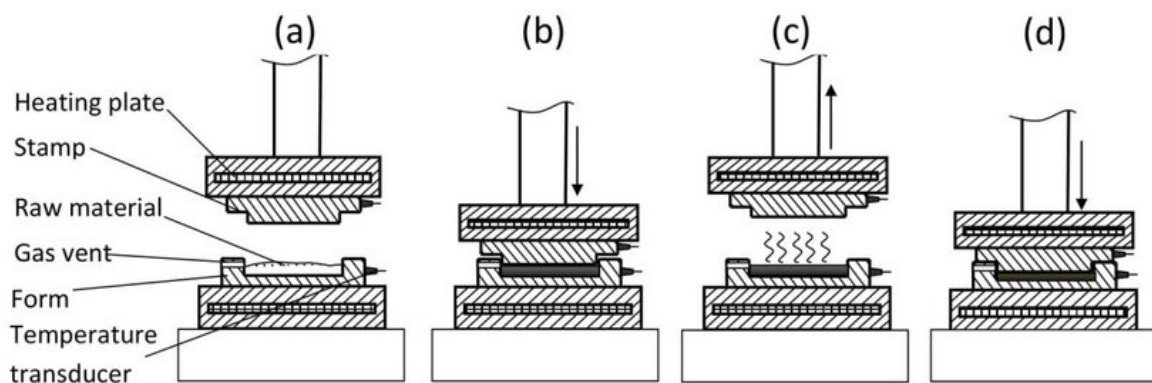


Ábrahám-Fürös András



korán kivéve, és levegőn hagyva „bőrösödik” az anyag, a felületén puha, bársonyos textúra képződik. Ekkor még manipulálható a felület, különböző oldatokkal.

A folyamatban a szárítás következik, amely megintcsak fontos tulajdonságokat határoz meg. Levegőn szárítva az anyag, kevésbé tömör szerkezetet eredményez, mint például nagy teljesítményű sütőben – akár közben tömörítve az anyagot – az így készült biokompozit lényegesen nagyobb szilárdsági tényezővel bír. Ez főképp a víztartalom állításából adódik, minél kisebb, annál nagyobb az anyag sűrűsége, illetve szerkezeti rost-felépítésében is kiegyenlíti a hibákat a préselés folyamata. Azonban ha épp a porózus szerkezet elérése az igény (például hőszigetelés esetében), akkor épp az ellenkező eljárást kell folytatni. Elképzelhető olyan eljárás is, amelyben a zsaluzattal együtt, attól nem elválasztva növesztik a micélium, ezzel például szendvicsszerkezeteket lehet készíteni, bennmaradó zsaluzatként, úgy hogy a micélium maga a ragasztó is, rendkívül kedvező tehát ez az eljárás is különböző szerkezetek esetében.



researchgate.net

Az anyagnak eredendően előnyös tűzállósági tulajdonságai vannak, a szerkezetükben lévő kitin miatt. Ezt még tovább lehet növelni ha magasabb szilícium-dioxid tartalmú szubsztrátumot alkalmazunk, ilyen például a rizshéj.

Annak ellenére, hogy jelenleg a teherbírás a legnagyobb kérdéses tényező, ezen is lényegesen lehet javítani, tervezett növesztési struktúrával és geometriákkal, erős szubsztrátumot használva.

TABLE 4 | The main mechanical properties result of different conditions of *Pleurotus eryngii*.

| Sample conditions | Natural | | Dry 30 min | | Dry 40 min | | Dry 50 min | |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Skin | Core | Skin | Core | Skin | Core | Skin | Core |
| Percentage of water loss (%) | 0 | 0 | 31 | 35 | 38.4 | 42 | 45 | 47.5 |
| Young's modulus (MPa) | 2.65 | 1.19 | 5.91 | 15.11 | 57.99 | 54.32 | 64.42 | 57.79 |
| Critical strain (%) | 8.55 | 11.65 | 49.88 | 46.60 | 18.41 | 21.94 | 15.84 | 25.48 |
| Critical stress (MPa) | 0.18 ± 0.07 | 0.11 ± 0.04 | 1.56 ± 0.41 | 2.49 ± 0.68 | 4.14 ± 0.98 | 4.26 ± 0.30 | 4.07 ± 1.35 | 5.80 ± 1.36 |

TABLE 2 | The mechanical properties of mycelium-based composites. MBF = mycelium-based foam; MBSC = mycelium-based sandwich composite.

| Density (g/cm ³) | Young's modulus (MPa) | Compressive strength (kPa) | Flexural strength (kPa) | Tensile strength (kPa) | Material | Refs. |
|------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------|--------------------------|
| 0.10-0.14 | 66.14-71.77 | 670-1,180 | — | 100-200 | MBSC | Ziegler et al. (2016) |
| 0.10-0.24 | 2-97 | — | 50-860 | 10-240 | MBF | Appels et al. (2019) |
| 0.183 ± 0.015 | — | 41.72 ± 13.49 | 10.91 ± 4.41 | 49.90 ± 20.00 | MBF | López Nava et al. (2016) |
| 0.29-0.35 | — | 156-340 | — | — | MBF | Silverman, (2018) |
| 0.029-0.045 | 0.6-2 | 40-83 | — | 180-300 | MBF | Islam et al. (2017) |

| | Plant based | | | | | | | | | | Recycled | | Animal based |
|---|---|---|--|---|---|--|---|--|--|---|----------|--|--------------|
| | HEMP | STRAW | FLAX | MYCELIUM | CORK | WOOD FIBER | GRASS | CELLULOSE | COTTON | WOOL | | | |
| Thermal Conductivity | 0.038-0.050 W/mK | 0.038-0.057 W/mK | 0.038-0.042 W/mK | 0.03-0.05 W/mK | 0.037-0.50 W/mK | 0.038-0.042 W/mK | 0.034 - 0.041 W/mK | 0.037-0.042 W/mK | 0.035 W/mK | 0.033-0.040 W/mK | | | |
| Specific heat capacity | 1200-1220 J/kg.K | 1660-1710 J/kg.K | 1200-1220 J/kg.K | 1020 J/kg.K | 1900-2100 J/kg.K | 1660-1710 J/kg.K | 1600 - 2100 J/kg.K | 1300 - 1500 J/kg.K | 1200-1220 J/kg.K | 1350-1370 J/kg.K | | | |
| CO ₂ footprint, primary production | 1.52-1.68 kg/kg | -1.1 - -0.9 kg/kg | 0.42-0.46 kg/kg | Negative | 0.759-0.839 kg/kg | 0.6-0.665 kg/kg | Negative | Negative | 7.82-8.33 kg/kg* (before recycling) | 15 - 20 kg/kg* (before recycling) | | | |
| Water vapor, primary production | 2.463-2.6e3 L/kg | 665-766 L/kg | 303-3.3e3 L/kg | / | 665 - 766 L/kg | 665 - 766 L/kg | / | / | 7.4e3 - 8.2e3 L/kg | 1.7e3 L/kg | | | |
| CO ₂ balance and CO ₂ sequestration facts | "One hectare of industrial hemp can absorb 15 tonnes of CO ₂ per hectare". A negative CO ₂ footprint can be achieved. | "A straw bale wall actually sequesters 42.8 kilograms of CO ₂ ". A negative CO ₂ footprint can be achieved. | "Flax plants on one hectare absorb more than 0.37 metric tons of carbon dioxide and convert it into oxygen". | "Sequesters at least 16 tonnes of carbon per month". A negative CO ₂ footprint can be achieved. | "Every year the cork forests retain up to 14 million tons of CO ₂ ". A negative CO ₂ footprint can be achieved. | "A timber weight is generally 50% carbon which means 500g of carbon sequestered per kg of wood. 1.83 kg of CO ₂ is removed from the atmosphere for every kg of wood products used." A negative CO ₂ footprint can be achieved. | "Captures 1.5kg of CO ₂ per kg of product". A negative CO ₂ footprint can be achieved. | "Helps lower carbon emissions by recycling waste paper and is made from recycled plant fibers. It carbon is also locked in for the life of the product". A negative CO ₂ footprint can be achieved. | "Helps lower carbon emissions by recycling fashion waste streams and preventing garments from ending up in landfills". A negative CO ₂ footprint can be achieved. | "Wool sequesters carbon and other chemicals. 1 kg of clean wool equates to 1.8 kg of CO ₂ stored" | | | |
| Binders | Can be intertwined with flax, kenaf or other fibers or mixed with clay or lime, creating hempcrete | Does not contain any binders. | Can contain polyester binder (non-renewable) | Mycelium IS the binder. Contains commercial and agricultural by-products on its mix with insulating properties. | Releases natural glue (suberin) by heating and pressure. No other binders or chemicals are used in the process. | Releases natural glue (suberin) by heating and pressure. In some cases synthetic glue can be added. Usually contains polyester binder (non-renewable) | Made by means of AirLay technology (needle punching). Can contain other natural binding fibers like jute or synthetic fibers. | Does not contain any binders | Intertwined around 15% is polyester bonding fibre | Contains recycled polyester binder. Can contain polyester binder (non-renewable). Other binders can be used. | | | |
| Treatment | Natural fire resistant but can be additionally treated with non-toxic flame retardants like silica | Requires fire treatment. Can be chemical (boric acid) or natural (silica) | Requires fire treatment. Can contain chemical flame retardant and biocide | Needs no treatment | Needs no treatment | Requires fire and waterproof treatment. Can contain chemical fire retardant and petrochemical weatherproof wax. | Requires fire treatment. | Requires fire and fungicide treatment. Usually non-hazardous chemicals. | Requires fire and fungicide treatment. | Requires fire treatment. Can contain chemical flame retardant and biocide. Can contain polyester binder (non-renewable). Other binders can be used. | | | |
| Source | Renewable Hemp harvest streams | Renewable Grain harvest streams | Renewable Linen discarded fibers | Renewable Different waste streams | Renewable Oak bark | Renewable Wood industry streams | Renewable Waste streams | Renewable Recycled paper | Recycled pre-consumer clothing scraps | Renewable or recycled Wool discarded fibers | | | |
| End of life | Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Reuse, Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Reuse, Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Reuse, Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Reuse, Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Reuse, Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Reuse, Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Recycle, Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | Recycle, Downcycle, Compost for energy recovery, Biodegrade, Landfill | | | |
| Price of the raw material | 0.594-1.8 €/kg | 0.00901-0.045 €/kg | 0.594-2.48 €/kg | DIY | 2.43-12.1 €/kg | 0.488 - 0.513 €/kg | / | / | 1.62 - 4.68 €/kg | 1.89 - 3.74 €/kg | | | |
| Format | Batts or boards | Panels and bales | Roll or batt | Panels | Boards and panels | Boards | Roll or batt | Loose or blown | Roll or batt | Roll or batt | | | |

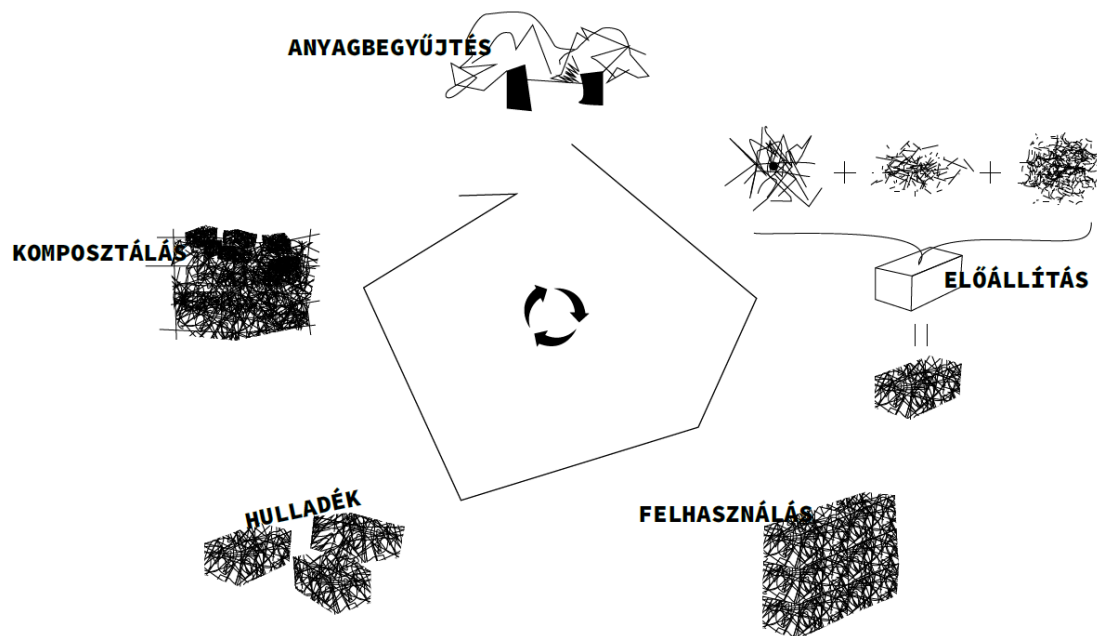
researchgate.net

| Substrates | Fungal Species | Parameters * | | |
|------------|--------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------|
| | | Moisture Content (%) | Density (kg/m ³) | Shrinkage (%) |
| Sawdust | <i>Ganoderma fornicatum</i> | 62.01 ± 0.64 b | 337.21 ± 13.36 ab | 8.86 ± 1.17 b |
| | <i>Ganoderma williamsianum</i> | 61.34 ± 0.73 b | 331.44 ± 9.39 a | 8.40 ± 1.28 b |
| | <i>Lentinus sajor-caju</i> | 61.23 ± 0.53 b | 340.31 ± 16.41 a | 8.10 ± 1.89 b |
| | <i>Schizophyllum commune</i> | 64.23 ± 0.55 a | 318.59 ± 8.14 b | 10.83 ± 1.39 a |
| Corn husk | <i>Ganoderma fornicatum</i> | 66.98 ± 0.51 b | 232.11 ± 11.52 ab | 12.64 ± 2.70 b |
| | <i>Ganoderma williamsianum</i> | 65.11 ± 0.59 c | 239.54 ± 8.65 a | 12.32 ± 1.36 b |
| | <i>Lentinus sajor-caju</i> | 64.94 ± 0.62 c | 240.99 ± 15.61 a | 11.91 ± 1.92 b |
| | <i>Schizophyllum commune</i> | 70.22 ± 0.32 a | 220.74 ± 11.22 b | 15.27 ± 1.45 a |
| Rice straw | <i>Ganoderma fornicatum</i> | 70.13 ± 0.65 bc | 219.46 ± 8.29 a | 14.26 ± 2.26 b |
| | <i>Ganoderma williamsianum</i> | 69.55 ± 0.48 c | 221.05 ± 15.01 a | 13.95 ± 0.80 b |
| | <i>Lentinus sajor-caju</i> | 70.48 ± 0.56 b | 222.76 ± 2.81 a | 13.26 ± 1.03 b |
| | <i>Schizophyllum commune</i> | 74.51 ± 0.73 a | 198.84 ± 10.17 b | 16.31 ± 1.00 a |

* The results are mean ± standard deviation. Different letters in the same column in each substrate type are considered significantly different according to Duncan's multiple range test ($p \leq 0.05$).

ÉLETCIKLUS

Egyik legfontosabb tulajdonsága az anyagnak a kis ökológiai lábnyom, amely környezettudatosság szempontjából rejt magában sok lehetőséget. Épületek esetében, de sok más aspektusból is kiemelkedően fontos a fenntartható fejlődés, egyre inkább zöld energiák felé tekint a világ, és próbálja minimalizálni a nem biodegradibilis hulladék mennyiségét. Kiemelkedően sokoldalú az organizmus, példaképp vegyük, hogy (kompozit párjaitól függően) teljes mértékben lebomló, előállítási folyamatának köszönhetően lényegében bármilyen formára alakítható (amelyet egy zsalu képes felvenni), ezen felül ez a sokoldalú formálhatóság nem is jár nagy energiabefektetéssel. Minimális módosításokat kell végezni csak a gyártás folyamán, ha más keménységű, összetételű, felületű - tehát más mechanikai és esztétikai tulajdonságú anyagot szeretnénk. Kutatások egyre inkább arra engednek következtetni, hogy a micélium alapú kompozitok nagy potenciállal bírnak, és rövid időn belül átvehetik a helyét más, kevésbé környezetbarát anyagoknak (pl.: fakompozitok, EPS).



ALKALMAZÁS

A létrejövő micélium biokompozitok alkalmazása sokrétű, köszönhetően kedvező tulajdonságainak.

A zsaluzási eljárásnak köszönhetően számos formát felvehet az anyag. Moduláris, téglaszerű elemek is készíthetők, de monolitikus, installáció jellegű, méreteiben kevésbé kötött szerkezetek is létrehozhatóak belőle. Lehetséges 3d nyomtatása is, tovább növelve formai lehetőségeit. Fontos megkülönböztetni a létrehozott biokompozitokat abból a szempontból, hogy az eljárás végén „meghal-e” (kiszáritás például kemencében), vagy pedig életben marad az anyag, nő tovább. Ez azért fontos, mert az élő organizmus képes a saját szerkezetében létrejött hibák, repedések, szakadások begyógyítására – ezzel a módszerrel hozhatóak létre regeneratív, öngyógyító, intelligens építőanyagok - épületek. Azonban, ha el is hal a micélium, újra aktivizálható, így véglegesen sosem veszti el ezt a képességét.

Alaktartó, könnyű, és relatív szilárdsága nagyobb, mint a betoné (abszolút persze jóval kisebb, de szerkezete miközben porózus, igen erős – ezt, az anyag szerkezeti felépítését is külön vizsgálják, más anyagokkal ha el tudnának érni hasonló felépítést, az jelentős mechanikai javulásokat eredményezne bennük.).

Minden kompozit jellemzője a jó hőszigetelő, hangszigetelő képesség, miközben nem éghető. Alapvető vízszigetelő képessége nem kedvező, de bevonatokkal ez a tulajdonsága is javítható.

Éppen csak kutatni kezdett területe az építőanyagok a micélium alapú elektronikai rendszerek. A micéliumfonalak képesek, sőt kommunikálnak is elektromos ingerek által, hogyha ebbe a rendszerbe be tudunk kapcsolódni, lehetséges olyan intelligens építőanyagok létrehozása, amelyek irányított változásra is képesek szerkezetükben (például a mkorábban említett öngyógyítás is lehet így irányított).

Mivel szerkezete millió-és millió mikroszkopikus fonál szövődésével jön létre, képes „ragasztóként” is funkcionálni – ha társított felület megfelelő érdességű, porózus szerkezetű a hifák átszövik ezeket a szerkezeti tökéletlenségeket – ki is javítják őket, miközben a két anyag csatlakozása mechanikus tapadást is eredményez.

Teljes mértékben Biodegradábilis, így egyáltalán nem környezetterhelő, sőt, a szén-dioxidod megköti, így kedvező is ebből a szempontból.

Az anyag olcsó, sorozatgyártható és könnyű előállítani, minimális technológiai háttérrel, szakértelmet kíván.

FELHASZNÁLÁS



HŐSZIGETELÉS

INSTALLÁCIÓK



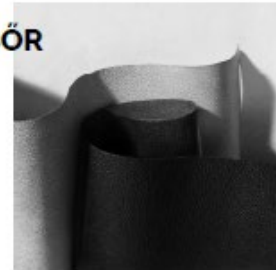
TÉGLA



CSOMAGOLÓANYAG



MŰBŐR



BIOKOMPOZIT
TÁRGYAK

AKKUSZTIKAI
PANEL



ÉPÍTÉSZET

SYMBIOCENE LIVING

A 2023-as publikus installáció-csoport micélium, és 3d nyomtatott fa hibrid anyaghasználatával jött létre. Több mint 80elemből áll melyek moduláris jellegűek (görögdinynét közelítő elemméretekkel), felhasználhatóak ülőalkalmatosságok, asztalok, térelhatárolások létrehozására. Célja, hogy a járókelők interakcióba lépjenek a struktúrákkal, testközelből tapasztalják a micéliumot mint környezetünket alakító anyagot.



designboom.com

VENICE ARCHITECTURE BIENNALE: IN VIVO AT THE BELGIAN PAVILION ⁸

Velencei Biennálé – In Vivo, Belga pavilon

Az idei biennálé egyik kiemelkedő alkotása a Bento iroda alkotása, és materiális megjelenése mellett fontos a filozofikus üzenete, háttere is. A nyersanyagok felélése, kizsákmányolása ellen lép fel alternatív építőanyagokkal, valamint általánosságban a környezetünkhöz való viszonyunk átgondolására sarkall. Fa hátszerkezet tartja a moduláris micélium panel burkolatokat, egy olyan teret hoz létre melybe belépve megszűnik a külvilág (a panelek jó akkusztikai tulajdonságai miatt csend honol), különleges atmoszférájú teret hoz létre. Érdekessége, hogy az itt járók kezdetben érzékenyek voltak a panelek erős szagára – azonban kis idő múlva átszellemülve semmi negatív benyomást nem tapasztaltak a térben.



designboom.com

⁸ <https://www.designboom.com/architecture/glastonbury-venice-biennale-exploring-mycelium-architecture-potential-06-30-2023/>

SILVER HAYES PAVILION AT THE 2023 GLASTONBURY FESTIVAL ⁹

A 2023-as zenei fesztivál tizedik évfordulóját ünnepelte a térelem létrehozásával. Megjelenteti a micélium felhasználásának lehetőségeit a médiaiparban, például filmipari, színházi kellék és látványtervi elemekkel, sőt oktatási célra is készültek potenciális elemek a környező egyetemek, iskolák számára. Célja a környezetterhelő anyagok helyett egy alternatív, fenntartható és sokrétű építőanyag felmutatása és népszerűsítése. Ezen felül teszteli is az anyag időállóságát, valódi hasznosságát, hiszen hosszútávra tervezték az alkotást.



designboom.com

⁹ <https://www.designboom.com/architecture/glastonbury-venice-biennale-exploring-mycelium-architecture-potential-06-30-2023/>

Hy-Fi Project ¹⁰

A pályázatnyertes terv célja kókuszvelő szubsztrátumú micéliumtéglák fejlesztése volt, amelyekből akár 12 méter magas struktúrák is létrehozhatóak. Az épület 2 hónapig állt, majd teljes mértékben komposztálták – ez is mutatja az anyag biogedrabilitásának valós mivoltját.

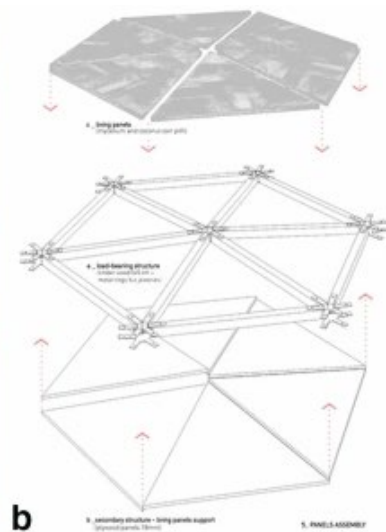


Archdaily.com

¹⁰ [Hy-Fi, The Organic Mushroom-Brick Tower Opens At MoMA's PS1 Courtyard | ArchDaily](#)

SHELL MYCELIUM

Könnyű, mégis állékony, fenntartható szerkezet létrehozását tűzte ki célul az iroda, amelyek időszakos események térrendező struktúráiként használhatóak. Különlegessége, hogy nem előre, laborban gyártott elemekből készült, hanem helyszínen, szabad utat hagyva a gombafonál hálózat terjedésének, amely majd természetes úton, a nap hatására szárad ki amikor azt a természet úgy kívánja.



fungalsbiotech.biomedcentral.com

MY-CO SPACE

A biotechnikus és építész alapítású cég egy prototípus gyártását tűzte ki célul, amely struktúra ideiglenes szállást tudott nyújtani 2 fő számára. A szerkezet parametrikus morfológiája egy folytonos ív vonalát követve 5,2x6x3 méter terjedelmű és több mint 300 előregyártott kender alapú micélium elemből áll. A hátszerkezet rétegelt lemez, amely minimális mértékben tartalmaz nem lebomló rögzítőelemet, ezzel is a csekély ökológiai lábnyom elérése volt a cél. Az előregyártott micélium elemek nem kerültek kiszáritásra a laborban, így az összeállítást követően a lemezek képesek voltak egymással össze-szövődni, így képezve légzáró, szerkezetileg folytonos héjat.

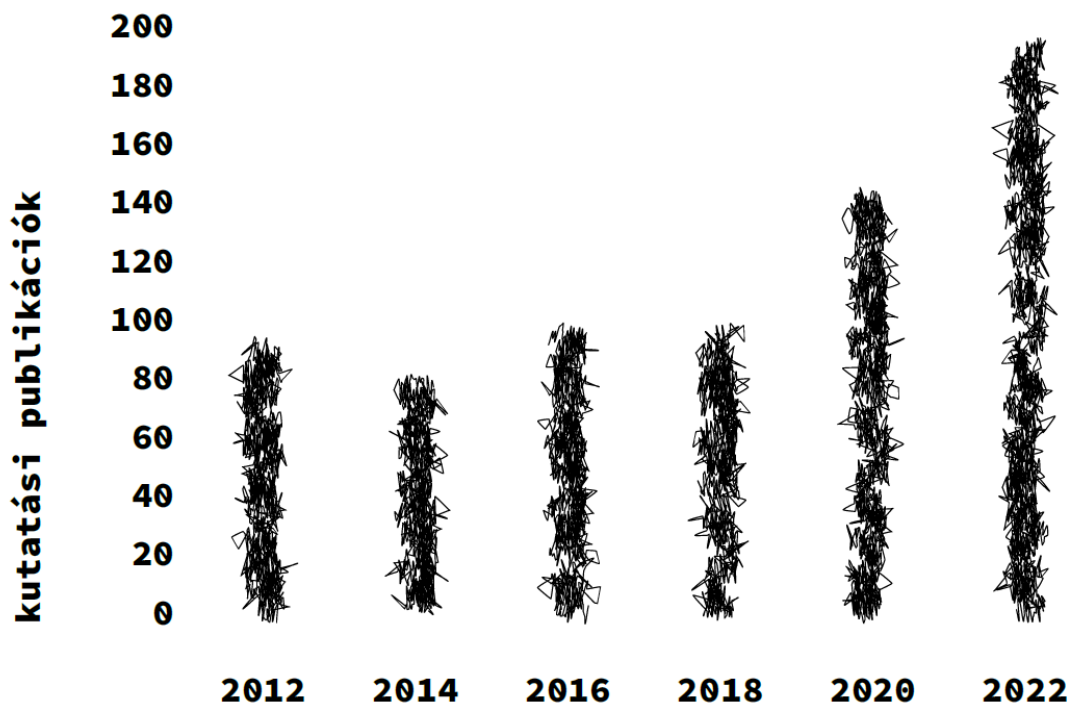


fungalbiolbiotech.biomedcentral.com

KONKLÚZIÓ

Miért lehet tehát egyre népszerűbb az anyag? Napjaink anyagfelhasználásában egyre fontosabb a környezetterhelő materiák kiváltása fenntarthatóakkal. A micélium biokompozitok sok szempontból kitűnnek alternatív, kis ökológiai lábnyomot hagyó vetélytársaiktól, mind előállítási, mechanikai, ökológiai szempontból, nem utolsó sorban pedig gyártásuk is egyszerű, kis anyagigényű, olcsó.

Sok szempontból sajnos még gyermekcipőben járnak a kutatások, Ennek ellenére az elmúlt 10-15 évben komoly előre lépések történtek mind kutatási, fejlesztési, mind pedig felhasználási területeken, évről-évre nő a kutatások, publikációk száma a témában.



Ez arra a következtetésre vezet, hogy a most felfutó, fenntarthatóság védjegye alatt helyet találó kutatási terület valószínűleg még gyorsabb ütemben fog fejlődni a következő években – remélhetőleg.

Ugyan a téma kutatása költséges, az anyag adta lehetőségeket kiaknázva, a jövőben megtérülnének ezen költségek, az anyag fenntarthatósága, alacsony előállítási költségei miatt.

KITEKINTÉS

Jelen állás szerint, távolabbi viszonylatokban az emberek hozzáállását kellene megváltoztatni a természet és többi élőlény felé – vagyis az emberiség Ontológiáját ahogy az *Élet Micéliumban* fogalmaz.

közelebbről tekintve elsődlegesen a mechanikai tulajdonságok fejlesztése az amely meghozhatja az anyag nagyobb népszerűségét: növelni a teherbírást (a biodegradabilitás megtartása közben) és elérni a szabványoknak való megfelelést – illetve szabványok létrehozását a kérdéses anyagokra, amihez szükségesek az állandó és nem fluktuáló anyagtulajdonságok.