

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

Obaly z dřevních částic pojených mycelii hub

Bakalářská práce

Autor: Dmitrii Nikiforov

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Dmitrii Nikiforov

Dřevařství
Zpracování dřeva

Název práce

Obaly z dřevních částic pojených mycelií hub

Název anglicky

Wood particle packaging bonded with fungal mycelia

Cíle práce

Cílem práce je stanovení mechanických a fyzikálních vlastností kompozitních materiálů ze dřevních částic pojených mycelií hub a porovnat tak vhodnost různých druhů chorošovitých hub z hlediska schopnosti spojit piliny.

Metodika

Bakalářská práce je řešena ve spolupráci s FAPPZ ČZU a soukromou firmou.

Student formuluje teoretická východiska na základě studia odborné literatury a komparace výsledků jednotlivých autorů.

Mechanické a fyzikální vlastnosti vybraných kompozitů budou testovány na laboratorních zařízeních v Dřevařském pavilonu za účelem charakterizace materiálů z dřevních částic pojených mycelií hub.

Harmonogram práce:

květen – srpen 2021: literární rešerše

srpen – prosinec 2021: experimentální část

prosinec 2021 – březen 2022: vyhodnocení výsledků a sepsání práce

duben 2022: odevzdání závěrečné práce

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran textu

Klíčová slova

kompozitní materiál, fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti, biokompozit

Doporučené zdroje informací

- JABLONSKÝ, I., ŠAŠEK, V. a KOUDELKA, M. Jedlé a léčivé houby: pěstování a využití. Praha: Brázda, 2006. ISBN 80-209-0341-0.
- JIANG, L., et al. Manufacturing of Biocomposite Sandwich Structures using Mycelium-Bound Cores and Preforms. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 28, 2017, pp. 50-59.
- JONES, M., et al. Thermal Degradation and Fire Properties of Fungal Mycelium and Mycelium – Biomass Composite Materials. *Sci Rep* 8, no. 17583, 2018.
- ROSS, G., P. Method for Producing Fungus Structures, 2014. US Patent: US20120135504A1
- STAMETS, P. Growing gourmet and medicinal mushrooms = [Shokuyo oyobi yakuyo kinoko no saibai]. Berkeley, Calif.: Ten Speed Press, 2000. ISBN 1580081754.
- STAMETS, P. Mycelium running: how mushrooms can help save the world. Berkeley, Calif.: Airlift, 2005. ISBN 9781580085793.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Ivan Jablonský, CSc.

Elektronicky schváleno dne 12. 8. 2021

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 21. 02. 2022

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: "Obaly z dřevních částic pojených mycelii hub" vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářskou práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzi tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 1.04.2023

Podpis autora: Dmitrii Nikiforov

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. et Ing. Štěpánu Hýsku, Ph.D. za trpělivost a cenné rady, které mi poskytl při konzultacích této bakalářské práce, Ing. Ivanu Jablonskému CSc. za pomoc v přípravě vzorků a inspiraci, Bc. Simonu Seredě za důležité údaje o pěstování mycokompozitu a fotografie, svojí přítelkyni za trpělivost a rady. Takže chtěl bych poděkovat unikátnímu doplňku stravy na bázi houby *Hericium*, který byl mým generátorem koncentrace a pracovitosti.

Abstrakt

Obalový průmysl má významný dopad na životní prostředí kvůli rozsáhlému používání biologicky nerozložitelných materiálů. V posledních letech roste zájem o vývoj alternativních obalových materiálů. Jednou ze slibných alternativ jsou obaly z dřevotřísky spojené s myceliem hub. Tento materiál se vyrábí spojením dřevěných částic s houbovým myceliem, čímž vzniká pevný, lehký a biologicky rozložitelný materiál, který je ideální pro balení.

Cílem této práce je prozkoumat potenciál obalů z dřevotřísky spojené s houbovým myceliem jako alternativy tradičním obalovým materiálům. Práce nejprve poskytne přehled o dopadu tradičních obalových materiálů na životní prostředí, o potřebě udržitelných alternativ a o výhodách používání obalů z dřevotřísky spojené s myceliem hub.

Dále se práce bude zabývat výrobním procesem obalů z dřevotřísky spojované houbovým myceliem, včetně potřebných materiálů a zařízení. Rovněž se bude zabývat vlastnostmi materiálu, jako je jeho pevnost v tlaku, teplo izolační schopnost, krátkodobá nasákavost a porovná je s tradičními obalovými materiály.

Celkově si tato práce klade za cíl prokázat, že obaly z dřevotřísky spojené s houbovým myceliem jsou životaschopnou a udržitelnou alternativou k tradičním obalovým materiálům. Zároveň má potenciál výrazně snížit dopad obalového průmyslu na životní prostředí.

Klíčová slova

Lignocelulózové obaly, mycokompozity, dřevěné částice, kompozity na bázi mycelia, biologicky rozložitelný, vliv na životní prostředí, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti, biokompozit, ekologický obal, kompozitní materiál, mycelium.

Abstract

The packaging industry has a significant environmental impact due to the extensive use of non-biodegradable materials. In recent years, there has been a growing interest in the development of alternative packaging materials. One of the promising alternatives is chipboard packaging combined with fungal mycelia. This material is produced by combining wood particles with fungal mycelium to produce a strong, lightweight and biodegradable material that is ideal for packaging.

The aim of this work is to investigate the potential of wood particle packaging combined with fungal mycelium as an alternative to traditional packaging materials. The thesis will first provide an overview of the environmental impact of traditional packaging materials, the need for sustainable alternatives and the benefits of using chipboard packaging associated with fungal mycelium.

Next, the thesis will look at the manufacturing process of particleboard packaging associated with fungal mycelium, including the materials and equipment required. It will also look at material properties such as compressive strength, thermal insulation capacity, short-term water absorption and compare these with traditional packaging materials.

Overall, this thesis aims to demonstrate that wood particleboard packaging associated with fungal mycelium is a viable and sustainable alternative to traditional packaging materials. It has the potential to significantly reduce the environmental impact of the packaging industry.

Keywords

Lignocellulosic packaging, myco-composites, wood particles, mycelium-based composites, biodegradable, environmental impact, mechanical properties, physical properties, biocomposite, eco-package, composite material, mycelium.

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Cíl bakalářské práce	14
TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE		15
3	Základní informace o biokompozitech.....	16
3.1	Co je kompozitní materiál?	16
3.2	Historie vývoje bio kompozitních materiálů	17
3.3	Environmentální náklady a nevýhody kompozitních materiálů.....	17
4	Obaly z dřevních částic pojených mycelii hub jako náhrada klasických obalu z polymerů.....	19
4.1	Materiály používané na výrobu obalů v současné době.....	19
4.2	Vývoj mycokompozitních materiálů	20
4.3	Využití myceliových obalů	25
5	Základní technologické postupy při výrobě mycokompozitů.....	25
5.1	Vyber vhodných hub	26
5.2	Vyber vhodného substrátů	26
5.3	Obecný postup při výrobě mycokompozitů	27
5.4	Sterilizace substrátů	28
5.5	Metoda očkování.....	29
5.6	Způsob zabalení	30
5.7	Podmínky růstu.....	30
5.8	Čas růstu.....	31
5.9	Způsob sušení	31
5.10	Následné zpracování	31
5.11	Vliv druhu hub a substrátů na mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitu	32

6	Mechanické a fyzikální vlastnosti mycokompozitů.....	33
6.1	Objemová hmotnost	33
6.2	Tepelné izolační vlastnosti.....	33
6.3	Nasákavost	33
6.4	Pevnost v tlaků	34
II	PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	35
7	Metodika přípravy vzorků	36
7.1	Příprava sadby.....	36
7.2	Příprava substrátu	36
7.3	Očkování substrátu a měření mycelia	36
7.4	Tvarování mycelia do bloků	37
7.5	Použité zkušební vzorky.....	38
8	Metody hodnocení mycokompozitů.....	40
8.1	Stanovení rozměrů a objemové hmotnosti	40
8.2	Stanovení součinitele tepelné vodivosti	40
8.3	Stanovení nasákavosti	41
8.4	Stanovení pevnosti v tlaku při 10 % deformaci.....	42
9	Výsledky.....	44
9.1	Stanovení objemové hmotnosti	44
9.2	Součinitele tepelné vodivosti	45
9.3	Nasákavost	46
9.4	Pevnost v tlaku při 10 % deformaci	47
10	Diskuze	49
10.1	Objemová hmotnost	49
10.2	Součinitel tepelné vodivosti	49
10.3	Stanovení nasákavosti	50

10.4	Stanovení pevnosti v tlaku při 10 % deformaci.....	50
11	Závěr.....	52
12	Seznam literatury a použitých zdrojů	53
13	Seznam tabulek, obrázků a grafů	57

Seznam použitých zkratk a symbolů

EPS – Pěnový polystyren je pevný a tuhý materiál s buněčnou strukturou. Skládá se z polystyrenu (2 %) a vzduchu (98 %). Zpravidla má bílou barvu a je vyroben z napěněných polystyrenových kuliček.

XPS – Extrudovaný polystyren vzniká extruzí (vytlačováním) taveniny krystalového polystyrenu za současného sycení vypěňovadlem, které po uvolnění tlaku umožní na konci vytlačovacího zařízení napěnění materiálu. Je to deskový materiál s minimální nasákavostí a velkou pevností.

PP - je termoplastický polymer ze skupiny polyolefinů, které patří mezi nejběžnější plasty

PUR - Molitanové PUR obaly se využívají při fixaci skla, porcelánu, elektroniky atd.

EPE - pěna je vyrobena z expandovaného polyetyleny s uzavřenou buněčnou strukturou.

MK – mykocompozitní materiál

1 Úvod

Polymerní kompozitní materiály na bázi ropy v posledních několika desetiletích dominovaly na trhu s automobily, stavebními materiály, textilními obklady, sportovními potřebami, obaly a dalšími spotřebními výrobky. K širokému využití polymerů přispěly relativně nižší náklady a vlastnosti materiálů, jako je nízká hmotnost, zpracovatelnost, nízká chemická reaktivita, odolnost proti vlhkosti a schopnost tlumit zvuk.¹

Podle údajů Evropského parlamentu produkce plastů vzrůstá už několik desetiletí: z 1,5 milionu tun v roce 1950 až na 359 milionů tun v roce 2018. V EU se ročně vyprodukuje zhruba 26 milionů tun plastů a jen méně než 30 procent z této masy se sbírá na recyklaci. Část sebraného plastového odpadu vyváží EU ke zpracování do třetích zemí. Zbývajících 70 procent odpadu putuje na skládky, do spaloven, nebo končí v lesích, řekách, mořích a na plážích.²

Z ekologického hlediska jsou syntetické plasty v podstatě inertní a biologicky nerozložitelné díky nízké chemické reaktivitě. Neschopnost plastů rozkládat se v rozumném časovém horizontu má za následek hromadění velkého množství tohoto materiálu v komunálním odpadu a podzemním kanalizačním systému a způsobuje velké znečištění životního prostředí a ekosystémů. Na trhu s obalovými materiály mají výrobky z pevných i pružných plastů 30% podíl na celosvětovém trhu.³

Vzhledem k tomu, že většina plastových materiálů není biologicky rozložitelná, proto je velká potřeba biologicky rozložitelných, nebo kompostovatelných obalových materiálů. Biokompozity odvozené ze 100 % biologických materiálů by mohly nabídnout udržitelnou alternativu k plastovým obalům na bázi ropy v široké škále aplikací. Tato studie se zaměřuje na biokompozity, které jsou 100 % biologicky odbouratelné, vyrobené ze 100 % materiálů biologického původu, jako je mycelium hub a lignocelulózové vlákna. V současné době patří mezi biologicky odbouratelné plasty polymléčná kyselina (PLA), polyhydroxybutyrát (PHB), polyglykolová kyselina (PGA) a polysacharidy. Jedním z hlavních problémů biokompozitů je, že mají horší mechanické vlastnosti a vyšší náklady ve srovnání se syntetickými plasty nebo vlákny.⁴

Průmysl nevyžaduje vynikající mechanické vlastnosti, proto mohou být biokompozity na bázi mycelia vhodnou volbou pro nekonstrukční aplikace. Mycokompozitní materiál by mohl potenciálně využít jako surovinu velké množství lignocelulózových vedlejších produktů ze zemědělské výroby. Mycelium v biokompozitu je v posledním kroku výrobního procesu deaktivováno tepelným opracováním, a proto má MK potenciál pro využití v různých aplikacích. Je vhodnou náhradou extrudovaného pěnového polystyrenu (EPS), který se hojně používá v obalových aplikacích. Struktura mycelia slouží jako polymerní matrice kompozitu tím, že váže vnitřní vláknité jádro v sobě a s vnějšími pojivovými vrstvami materiálu. Technologie použitá v tomto biokompozitním materiálu by mohla být testována na mnoha jádrech dřevních vláken, kmenech mycelia. Je důležité vědět, jak jsou různá jádra dřevních vláken, kmeny mycelia ovlivňují fyzikálně-mechanické vlastnosti, jako je objemová hmotnost, nasákavost, pevnost a deformace, které jsou důležité pro obalové aplikace.⁵

2 Cíl bakalářské práce

Cílem práce je stanovení mechanických a fyzikálních vlastností kompozitních materiálů ze dřevních částic pojených mycelii hub, porovnání vhodnosti různých druhů chorošovitých hub z hlediska schopnosti spojit piliny a vhodnosti pro obalové aplikace. V průběhu práce bude provedeno teoretické porovnání metod pěstování substrátů a následného jejich zpracování podle údajů z různých vědeckých experimentů a specifikace výrobního procesu mezinárodních firem, které se zabývají výrobou kompozitních materiálů na bázi dřeva a mycelia hub.

TEORETICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

3 Základní informace o biokompozitech

3.1 Co je kompozitní materiál?

Kompozity jsou dvoufázové nehomogenní materiály, ve kterých je tuhá nebo tvrdá složka nosná výztužná fáze je rozptýlena v měkčí matici. V moderním světě není možné si představit automobilový průmysl, letectví, kosmický průmysl bez použití kompozitních materiálů. Kompozity jsou hluboce zakořeněny v našem každodenním životě a obklopují nás všude. Pokročilé kompozity s polymerní maticí (PMC) - pevné, tuhé výztuže (např. sklo nebo uhlíková vlákna) spojené odolnými polymery (např. epoxid, polyester, nylon, PEEK) - jsou konstrukční materiály, které poskytují významné výhody oproti běžným inženýrským materiálům s homogenní strukturou, jako jsou ocel a hliníkové slitiny. Mezi tyto výhody patří: vysoký poměr tuhosti k hmotnosti a pevnosti; přizpůsobitelné mechanické, tepelné a fyzikální vlastnosti; chemická odolnost; nízká tepelná odolnost; užitečné vlastnosti tlumení energie a schopnost vyrábět velké konstrukční celky.⁶

Přesnější definice biokompozitů říká, že se jedná o kompozitní materiály obsahující jednu nebo více fází biologického původu. Tyto materiály byly klasifikovány třemi různými způsoby: podle výztuže, podle pryskyřice nebo podle použitého procesu.⁷ Z hlediska výztuže lze biologická vlákna rozdělit do tří hlavních kategorií: slámová vlákna, dřevní vlákna a nedřevní vlákna. Mezi slámová vlákna patří kukuřičná, pšeničná, rýžová a další, zatímco dřevní vlákna jsou v podstatě vlákna z měkkého nebo tvrdého dřeva. Obvykle jsou slaměná vlákna vhodná pro jádrový materiál, ale příliš slabá na to, aby se dala použít v biokompozitní výztuži, zatímco dřevěná vlákna jsou méně vláknitá a obtížně se vplétají do textilií. Nedřevní vlákna zaujala průmysl díky svým lepším mechanickým a fyzikálním vlastnostem.⁸

Subklasifikace nedřevních vláken je založena na rostlinném původu: lýko pro len, jutu a konopí; list pro sisal, henequen a ananasové listové vlákno; semeno pro bavlnu; a plod pro kokosový ořech. Pryskyřičná matrice hraje více rolí, včetně ochrany vláken před degradací a mechanickým poškozením, drží vlákna pohromadě a přenáší zatížení v tahu. Obecně se matrice skládá z termosetové nebo termoplastické pryskyřice na bázi ropy nebo zemního plynu; ale s rostoucí

poptávkou po biokompozitech by měla být pryskyřice vyrobena z obnovitelných zdrojů a měla by být šetrná k životnímu prostředí.

3.2 Historie vývoje bio kompozitních materiálů

Známa historie matric vyztužených přírodními vlákny sahá přibližně do doby před 3 000 lety, kdy se stěny domů vyráběly z hlíny vyztužené slámou. Živočichové a rostliny využívají kompozity v mnoha biologických strukturách (např. dřevo, kosti, zuby, rohovina a kůže), kde se uplatňuje vysoká mechanická pevnost a nízká hmotnost. Přírodní kompozity slouží lidstvu jako šablony inspirované biologickými látkami, které lze využít při navrhování syntetických nebo polysyntetických materiálů. Na počátku 20. století se konkrétně Henry Ford přišel s vizionářskou myšlenkou zkoumat přírodní materiály pro použití v průmyslu, které by vykazovaly vysokou pevnost. Byla použita celá řada přírodních materiálů včetně kuřecích kostí, cibule, česneku a zelí, a kukuřičné stonky. Na začátku roku 1942 nechal Ford vyrobit první prototyp automobilu z materiálu konopných vláken, který bohužel nepřešel do běžné výroby z ekonomických důvodů.⁹

Od té doby se přírodní vlákna dále rozšiřovala v mnoha dalších oborech, jako je zboží dlouhodobé spotřeby a letecký průmysl. Například Brother a McKinney vyrobili plasty s použitím sójových bílkovin a různých síťovacích činidel v roce 1940.¹⁰ Drzal a kol v roce 2001 shrnuli, že kombinace biologických vláken, jako je kenaf, konopí, lnu, juty, henequenu, vláken z ananasových listů a sisalu s polymerními matricemi lze použít v automobilovém průmyslu.⁹

3.3 Environmentální náklady a nevýhody kompozitních materiálů

Na počátku třetího tisíciletí zažívají naše společnosti velké otřesy spojené s ohrožením životních podmínek člověka. Těžba fosilních paliv a surovin způsobuje klimatické poruchy a znečištění způsobené antropogenní činností. Zejména stavebnictví v Evropě se podílí na celkové spotřebě vytěžených materiálů a energie zhruba polovinu a na celkové spotřebě vody a produkci odpadů zhruba třetinou.¹¹

Pokud jde o dřevovláknité desky střední hustoty (MDF) a dřevotřískové desky (OSB), k jejich výrobě jsou zapotřebí lepidla a pryskyřice pocházející z ropy nebo jiná lepidla a pryskyřice obsahující formaldehyd. Vzhledem k nedostatku a

znečištění těchto zdrojů je věnována zvýšená pozornost přechodu na metody s biologickou výrobou materiálů z obnovitelných zdrojů.¹²

Většina syntetických kompozitních materiálů jsou získávány především z neobnovitelných zdrojů, jako je ropa, zemní plyn, které podléhají stejným výkyvům cen a dodávek jako jejich výchozí suroviny. Například ceny polyakrylonitrilu, prekurzoru, který se používá pro výrobu přibližně 90 % všech polymerů. Kromě toho existuje mnoho nákladných a časově náročných výrobních kroků pro kompozity: řezání výztuže, impregnace pryskyřicí, vyložení materiálu na textilní materiál.¹²

Kromě vysokých výrobních nákladů, kompozitní materiály na bázi ropy mají špatné možnosti ukončení životnosti kvůli obtížím oddělit smíšený materiál zpět na jeho složky. Jediným ekonomicky výhodným řešením je v současné době spalování na palivo, skladování, nebo případně rozdrčení použitého kompozitu, který následně může sloužit jako výplňový materiál.¹³

V důsledku toho se výzkumníci zabývají využitím přírodních nebo rostlinných vláken jako výztuže pro biokompozity. Hlavní výhody přírodních vláken jako je kenaf, juta, konopí, dřevo, len, bambus a sisal, oproti tradičním syntetickým materiálům (např. uhlíková vlákna, kevlar) jsou nízká cena, nízká hustota, konkurenceschopná pevnost, mechanické vlastnosti, snížená spotřeba energie, nižší obsah oxidu uhličitého (na rozdíl od emisí u syntetických materiálů na bázi ropy), a také nejdůležitější ze všech, biologická rozložitelnost.⁸

Ačkoli kompozitní materiály vyztužené přírodními vlákny mají mnoho výhod ve srovnání s tradičními výztuží materiály, zůstává mnoho problémů s ukončením životnosti, protože syntetické polymery se stále používají jako kompozitní matrice. Ale mají využití i nové materiály s přírodní matricí jako jsou pryskyřice na bázi sóji, kyseliny polymléčné a kardanolu (ze skořápek ořechů kešu).¹⁰

Obecně platí, že přírodní vlákna nemohou poskytovat stejné mechanické vlastnosti jako většina syntetických vláken, jako jsou uhlíková vlákna, ale některá z nich mají podobné vlastnosti jako vlákna skleněná. Mezi další kritické vlastnosti přírodních vláken používaných v biokompozitních aplikacích patří dobrá přilnavost mezi vláknem a matricí bez ohledu na stupeň polymerizace pryskyřice, odolnost

vůči degradaci vlivem vlhkosti, homogenita fyzikálně-mechanických vlastností a hořlavost.¹⁴

4 Obaly z dřevních částic pojených mycelii hub jako náhrada klasických obalu z polymerů.

4.1 Materiály používané na výrobu obalů v současné době.

Jedním z mála odvětví, která během pandemie COVID-19 zaznamenala exponenciální růst, je sektor elektronického obchodování, který miliony lidí zvolili pro doručování zboží domů prostřednictvím online nakupování základních zboží i potravin. Podle nedávných zpráv společnosti "Salesforce" se digitální prodej ve druhém čtvrtletí roku 2020 rozrostl o 71 % a ve třetím o 55 %, což vytvořilo prudký nárůst v používání obalů a obalových materiálů, které nutně končí na skládkách a ve spalovnách, nebo ještě hůře ve vodních nádržích a v přírodním prostředí.¹⁵

Recyklovatelnost obalových materiálů, jako je polystyren nebo polypropylen, je často přeceňována a odhaduje se, že z celosvětové roční produkce téměř 86 milionů tun plastových obalů se recykluje pouze necelých 14 %. Expandovaný polystyren neboli polystyren je lehký materiál, který je bezpečný pro použití s potravinami. Jedná se o výhodný obalový materiál pro potraviny, elektroniku a další křehké výrobky, přičemž se jedná o méně ekologický ropný derivát.¹⁶

Pěnový polystyren se stal hlavní složkou komunálního odpadu a mořského odpadu a je také škodlivý pro volně žijící živočichy, protože se hojně používá k výrobě jednorázových výrobků, jako jsou talíře na jídlo nebo nádoby na potraviny. Tyto výrobky z polystyrenu nejsou biologicky rozložitelné ani recyklovatelné a většinou se používají pouze jednou. Polyethylentereftalát (PET) umožňuje opakovanou recyklaci s mírou obnovy přibližně 19,5 % hmotnosti, zatímco polystyrenové plasty jako extrudovaný polystyren nebo expandovaný polystyren lze recyklovat pouze s mírou obnovy pouhých 0,9 % hmotnosti, což je řadí mezi nejméně recyklované plasty.¹²

Navíc přepravní společnosti obvykle účtují své služby po zvážení faktorů, jako je hmotnost a objem přepravovaného zboží. Vzhledem k tomu budou náklady na

přepřavu EPS relativně velmi vysoké, protože vyžaduje velký poměr objemu k hmotnosti. Likvidace plastového odpadu spalováním je běžnou praxí, která k výrobě energie využívá přístup založený na přeměně odpadu na energii. Ačkoli spalování plastových odpadů může uvolňovat nadměrné množství karcinogenních škodlivin a těžkých kovů, jiné možnosti recyklace, které zahrnují sběr plastových odpadů a jejich přepřavu, jsou rovněž škodlivé pro lidské zdraví a životní prostředí, stejně jako spalování.¹⁷

V 80. letech 20. století zavedli výrobci do polyethylenových směsí polymery na bázi škrobu a začali je prodávat jako "ekologické".¹⁸ Biologicky odbouratelné plastové materiály z obnovitelných zdrojů jsou považovány za náhradu syntetických polymerů. Mezi různé typy bioplastů, které byly vhodné pro obalové aplikace, patřily:

- polysacharidy, jako je škrob nebo celulóza extrahované z biomasy
- polymery jako kyselina polymléčná (PLA)
- polymery jako polyhydroxyalkanoáty (PHA) z mikroorganismů nebo geneticky modifikovaných bakterií.¹⁹

S rostoucím povědomím o problémech životního prostředí a udržitelnosti způsobených obalovými materiály roste poptávka po nalezení ekologicky šetrných materiálů vyrobených z obnovitelných zdrojů se srovnatelnými vlastnostmi, které by nahradily tradiční obalové materiály.¹⁹

4.2 Vývoj mycokompozitních materiálů

Myceliové materiály se většinou skládají z houbové biomasy a lignocelulóзовých odpadu, a proto jsou považovány za obnovitelné kompozitní materiály s uzavřeným cyklem. Kompozitní materiály na bázi mycelia, které tvoří třídu biologických materiálů, se vyrábějí pěstováním mycelia, vegetační části vláknitých hub, na pevných organických substrátech.²⁰

Houby jsou eukaryotické mikroorganismy, které jsou všudypřítomné, vykazují obrovskou rozmanitost v morfologii a životním stylu. Mnoho druhů hub hraje důležitou roli v ekosystémech tím, že rozkládají lignocelulóзовou biomasu a recyklují uhlík.²¹

Vzhledem k jejich metabolickým a fyziologickým charakteristikám mají velký biotechnologický potenciál a pravděpodobně poskytnou odolná, účinná a nákladově efektivní řešení současných environmentálních problémů. Při pěstování mycelia na pevných organických substrátech se získá lehký kompozit sestávající z trojrozměrné protkané sítě přírodních výztužných vláken.²²

První aplikaci materiálů na bázi mycelia vyvinul v roce 1949 Luthardt W. na Technické univerzitě v Drážďanech. Vlákenné desky byly vyráběny z delignifikovaného dřeva při pomoci houbových ligninolytických enzymů. Ukázalo se, že tato metoda zlepšuje mechanické vlastnosti vláknitých desek.²³



Obrázek 1: Dřevotřískové desky "MycoBoard Ecovative".

Komerční vývoj mycelia jako biologického materiálu zahájily společnosti Philip Ross a Ecovative v roce 2007. Tato americká společnost vytvořila obalové materiály, izolační desky, akustické obklady a dřevěné desky MycoBoard. Místo toho, aby byly panely spojovány pomocí formaldehydu a dalších toxických pryskyřic, jsou pěstovány společně pomocí lepicího systému mResin společnosti Ecovative. Mezi společnostmi, které s Ecovative spolupracují na udržitelných alternativách obalů, patří prodejci jako Dell a Ikea. V roce 2009 vytvořil Philip Ross Mycotecture, čajovnu postavenou z myceliových cihel.²⁴

V Belgii přináší družstvo Glimps materiály z mycelia kreativním profesionálům a navrhuje spotřebitelské výrobky, jako je například lampa LumiFungi, vyrobená ve spolupráci s pěstitelem hub PermaFungi.²⁵



Obrázek 2: Koncept stoliček společnosti "Myce" kombinací mycelia se dřevem.

Experimenty Philipa Rosse, jednoho z prvních umělců, kteří zkoumali potenciálu mycelia jako materiálu pro design, ukazují, že mycelium je materiál, který má schopnost pěstovat nebo začlenit do dalších prvků. V rámci projektu The Living for MoMA Ps1 byl demonstrován výroční pavilon Hy-Fi s použitím cihel z mycelia při stavbě.²⁶ Designér Pascal Leboucq vytvořil The Growing Pavilion jako ódu na krásu a sílu biologických materiálů.²⁷



Obrázek 3: Pavilon "Hy-Fi" s použitím cihel z mycelia Philipa Rossu.

Americká architektonická kancelář Redhouse šla ještě o krok dál ještě dál tím, že využila stavební odpad, jako jsou dřevěné panely nebo okenní výplně rámy, který byl rozdrčen na vločky. V Indonésii společnost Mycotech také vyrobila prototyp nazvaný "MycoTree", společně s firmou Block Research Group.²⁸



Obrázek 4: Prostorová konstrukce z nosných prvků mycelia "MycoTree".

Jedná se o prostorovou konstrukci vyrobenou z nosných prvků mycelia se směsí cukrové třtiny a odpadů kořenů manioku (průměrné tlakové napětí 0,61 MPa při 5 % hmotnosti kořenů manioku). V porovnání s jinými nosnými materiály, jako jsou např. cihly, zdivo (průměrná pevnost v tlaku 5,7 MPa) nebo beton (průměrná pevnost v tlaku 5,5 MPa), nemohou materiály na bázi mycelia konkurovat.²⁰



Obrázek 5: Umělá kůže "MuSkin" z mycelia od společnosti Grado Zero Innovation.

Různí umělci a designéři vytvářeli nejrůznější objekty, jako například mycelium na bázi textilií používaných v módě od Aniely Hoitink.²⁹ 3D-tištěné

nábytek od Erica Klarenbeeka³⁰, vypěstované lampy od Jonase Edvarda a Sebastiana Coxe, boty od Kristel Peeters a Mycofabrication: State of the Art, vázy od Maurizia Montaltiho. Společnosti Terreform ONE a Genspace vyvinuly sérii laviček vytvořených z materiálu Mycoform.³¹

V Nizozemsku vyvíjí mycelium kůže společnost Mylium. Fungalogic je nizozemský start-up zaměřený na vytváření stavebních materiálů ze zemědělských odpadů pomocí hub. Materiály vypěstované z mycelia, které lze použít na obaly, akustické panely a interiérové materiály jsou vyvíjeny mexickými společnostmi Polybion a RadialBio. Akustické panely jsou vyrobeny s koeficientem redukce hluku 0,4-0,53 jako unikátní řešení, které se vyznačuje vysokou kvalitou a odolností proti hluku, alternativa ke komerčním akustickým stropním panelům (NRC 0,644).³²



Obrázek 6: Modulární akustické panely firmy "Myamo".

Akustické výrobky na bázi mycelia navíc dobře fungují i jako tepelně izolační desky (0,05 W/mK), což představuje možnou náhradu polystyrenu (0,03-0,04 W/mK) a polyuretanu (0,006-0,18 W/mK).³²

4.3 Využití myceliových obalů

Typické využití mycelia je jako náhrada za pěnový polystyren. Má podobnou strukturu a lze jej tvarovat. Výsledný materiál je zároveň pevný i pružný. Možné jsou různé krabičky a dárková balení, či jen fixační a ochranné prvky do kartonových krabic. Obalové materiály na bázi hub vyvinuté z houbového mycelia byly v posledním desetiletí rozsáhle studovány a zpracovávány. Pěny na bázi mycelia vyvinuté ze zemědělských zbytků nebo materiálů, jako jsou piliny, lze považovat za cenově konkurenceschopnou alternativu se srovnatelnými vlastnostmi jako běžný polystyren. Začlenění mycelia do kompozitních materiálů pro obalové aplikace by mohlo snížit spotřebu styroporu a zvýšit udržitelnost prostřednictvím ekologicky šetrných obalů.³³



Obrázek 7: Obal z MK od společnosti Ecovative.

Materiály na bázi mycelia jsou zcela biologicky odbouratelné a rozloží se během několika týdnů bez pomoci vnějších podnětů. Náklady na tyto materiály lze snížit, pokud se zpracovávají v masovém měřítku v dávkách, a po skončení jejich životnosti je snadnější je biologicky rozložit než recyklovat.¹⁴

5 Základní technologické postupy při výrobě mycokompozitů

O druzích hub je k dispozici velké množství biologických informací, ale ty jsou vždy dávány do souvislosti s výrobou chemických látek nebo enzymů pro použití v biopalivech, medicíně a potravinářství. Podobně existuje množství poznatků o

lignocelulózových a polymerních kompozitech. Přesto však chybí vědecké poznatky a výzkum, které by dávaly faktory do vzájemné souvislosti s výrobními metodami a s nově vznikajícími aplikacemi těchto perspektivních přírodních kompozitů. Dostupná literatura a poznatky jsou velmi roztržštěné. Metodiky publikovaných studií se obvykle liší a neexistuje žádný standardizovaný a srovnávací přehled výrobních parametrů a mechanických vlastností myceliových kompozitů.

5.1 Vyber vhodných hub

Vzhledem k tomu, že houbové hyfy jsou nedílnou součástí myceliového kompozitního materiálu, jejich biologické vlastnosti ovlivňují jak výrobní proces, tak vlastnosti materiálu. K dnešnímu dni bylo pro použití mycelia jako materiálu použito nebo je uvedeno v patentech 27 druhů hub.³⁴

Tato skupina druhů je omezena na fyziologii *Basidiomycota* a zahrnuje *Trametes versicolor*, *Fomes fomentarius*, *Ganoderma lucidum*, *Irpex lacteus*, *Pleurotus djamor*, *Pleurotus ostreatus* a *Schizophyllum commune*. Všechny tyto příklady mají saprotrofní způsob života a basidiomycety řazené mezi primární rozkladače jsou schopny růst na velkém množství lignocelulózové biomasy, a to i na nekvalitních organických odpadech, jako jsou piliny a sláma, proto jsou ideálními kandidáty pro pěstování myceliových materiálů.³⁵

Nejen genetická povaha, ale také vlastnosti vstupní suroviny ovlivňují morfologické vlastnosti houbového organismu: například při změně vstupní suroviny je ovlivněna struktura hyf. Při růstu na bramborovém dextrózovém bujónu (PDB) se hyfy *P. ostreatus* zhroutlí podél své střední části a vykazují menší šířku vláken ve srovnání s růstem na celulóзовém substrátu, což je pozorování spojené s nižším množstvím syntézy chitinu. V důsledku toho materiál s nízkým poměrem chitinu a polysacharidů vykazuje větší absorpci vody, nižší Youngův modul a vyšší elongaci. Ačkoli to není dobře popsáno, lze očekávat, že podobnými principy se řídí i další druhy hub.³⁶

5.2 Vyber vhodného substrátů

Agro-odpad je zbytek z pěstování a zpracování zemědělských produktů, jako jsou piliny, plodiny, ovoce, zelenina, maso, mléčné výrobky, ryby a drůbež. Tyto

produkty mají buď nižší hodnotu, než jsou náklady na sběr, přepravu a zpracování, nebo nemají správné metody manipulace, což vede k velkým ztrátám (vyhození nebo spálení). Roční celosvětová produkce lesnictví je 4,6 Gt odpadní biomasy.³⁷

Podle Programu OSN pro životní prostředí se přibližně 55 % celosvětové těžby dřeva spálí jako palivo, zatímco zbývajících 45 % se použije jako surovina v dřevozpracujícím průmyslu. Z těchto 45 % končí značná část také jako primární nebo druhotně zpracované zbytky. V dřevařském průmyslu se odhaduje, že 80 % původních stromů se ztrácí jako odpad, přičemž pouze 20 % končí ve formě sušeného řeziva.³⁸

Většina vstupních surovin používaných pro výrobu MK obsahuje lignocelulózu. Lignocelulóza je primární strukturální složkou mnoha rostlin a stromů a skládá se z celulózy, hemicelulózy a ligninu, s malým množstvím popela, bílkovin a minerálů. Složení a poměry těchto tří sloučenin ovlivňují průběh vegetace a mechanické vlastnosti. Lignin, spojený s hemicelulózou i celulózou, je aromatický polymer. Je známo, že dává buněčné stěně rostlin strukturální oporu a odolnost proti mikrobiálnímu napadení a oxidačnímu stresu. Obvykle se lignocelulózové odpady používají jako vstupní surovina nebo substrát pro kolonizaci vláknitými houbami při výrobě MK. V ideálním případě houbové mycelium vrůstá do těchto vláken a do dřevěných bloků rozkladem lignocelulózy, čímž vytváří soudržný materiál.³⁹

5.3 Obecný postup při výrobě mycokompozitů

Kromě parametrů, jako je genetická povaha použitého kmene a charakteristik typu vstupní suroviny, existuje mnoho proměnných parametrů, na nichž je založen výrobní proces. Ty jsou závislé na konkrétních laboratorních podmínkách a nejsou vždy dobře popsány z důvodu probíhajícího výzkumu nebo neúplnosti. Příkladem je teplota během růstu, metody sušení nebo postupy následného zpracování. Ačkoli dostupné údaje o těchto parametrech jsou v současné době omezené, snažíme se tímto propojit výsledky z různých studií.

Obecný protokol sestavený z otevřených zdrojů (Arifin a Yusuf, 2013; Elsacker et al., 2019; Haneef et al., 2017; Holt et al., 2012; Jiang et al., 2013, 2017; Moser et al., 2017; Yang et al., 2017; Ross, 2016).

- 1) Mycelium se zpočátku pěstuje na agarových plotnách v zrnitém substrátu, ve tekutém živném roztoku nebo v předem vypěstovaném homogenizovaném substrátu;
- 2) Substrát je autoklávován nebo pasterizován, aby se odstranil jakýkoli typ přítomných mikroorganismů na substrátu, čímž zabrání kontaminaci během růstu a procesu inkubace;
- 3) Do substrátu se přidá určité množství myceliové tkáně. Pokud nebyl substrát před autoklávováním zvlhčen, je třeba přidat sterilní vodu. Pro zlepšení růstu lze přidat sterilní roztok živin;
- 4) Očkovaný substrát se ručně zabalí do sterilizované formy, která má požadovaný tvar. Forma je uzavřena propustným krytem s filtrem vzduchu, aby se udrželo mikroklima;
- 5) Mycelium prorůstá substrátem v kontrolovaném prostředí. Materiál může být pěstován ve dvou fázích: nejprve uvnitř formy, aby se vlákna spojili, a ve druhé fázi mimo formu, aby zpevnit vnější plášť materiálu;
- 6) Vypěstovaný materiál se tepelně zpracovává při určité teplotě po následující dobu několik hodin, aby se ukončil proces růstu a materiál se vysušil;
- 7) Na materiál lze nanést povlak nebo následně zpracovat, aby se zlepšit jeho vlastnosti.



Obrázek 8: Obecný postup při výrobě MK. ³⁸

5.4 Sterilizace substrátů

Při sterilizaci substrátu se používá několik metod: při pomoci teploty, například autoklávováním a pasterizací, nebo ošetřením chemickými nebo

bakteriologickými prostředky. Nejprve lze substrát autoklávovat při různých teplotách, a to v rozmezí 115 až 121 °C a po různé dlouhou dobu, od 15 do 28 minut. Pasterizace spočívá v inkubaci substrátu ve vroucí vodě při ~100 °C po dobu přibližně 100 minut.²²

O vlivu metody sterilizace na vlastnosti materiálu existuje jen málo informací. Schirp a kol. zjistili, že sterilizovaná, naočkovaná sláma je méně tepelně stabilní než nesterilizovaná, naočkovaná sláma.⁴⁰ Metod tepelného opracování může hrát roli i při defibrilaci přírodních vláken, což může mít za následek zvýšenou pružnost vláken. Teplo může také usnadnit rozklad buněčných stěn rostlin a změkčit lignin a hemicelulózu. Působením vysokých teplot dochází k plastifikaci ligninu a oddělování vláken.¹³ Substrát lze také sterilizovat přidáním 0,3 % nebo 10% roztoku peroxidu vodíku. Formu a příslušenství lze sterilizovat pomocí potírání roztoku na bázi alkoholu (70% ethanol).¹⁴

5.5 Metoda očkování

K inokulaci substrátu myceliem lze použít různé přístupy. Při pěstování na agarových deskách se sladovým extraktem se z plně kolonizované desky vyřízne jedna nebo více agarových zátek (10 mm x 10 mm) a inokulují se přímo do substrátu. Mycelium lze také před inokulací vypěstovat na obilných výtrusech, které se následně použijí k inokulaci substrátu s myceliem (10 % až 20 % hmotnosti substrátu).³⁶

Pro homogenní rozložení houbových spor a snadné použití během procesu inokulace lze do směsí aplikovat <20 % objemu tekutého inokula. Alternativně lze předpěstovaný a homogenizovaný substrát tvořený houbovou biomasou rozdělit rovnoměrně. Během procesu očkování se předpěstovaný substrát promíchá a myceliální biomasa se roztrhá na menší části. Tento proces stimuluje růst hyf a zvyšuje jejich pevnost. Čím variabilnější je kombinace inokula a substrátu, tím nepředvídatelnější jsou rozměrové tolerance.⁴¹

Kromě toho Youngův modul pružnosti v ohybu pozoruhodně vyšší (0,67 MPa) u kapalného inokula než u inokulace na bázi zrn (0,25 MPa) (Holt et al., 2012). Pozoruhodné je, že kapalná inokulace má také za následek vyšší pevnost v tlaku (0,07 MPa) ve srovnání s inokulací na bázi zrn (0,002 MPa).⁴²

5.6 Způsob zabalení

Vysoký obsah vzduchu způsobuje nízkou tepelnou vodivost. Kromě toho prázdné prostory mezi vlákny vedou k vysoké pórovitosti. S růstem hyf se zvyšuje frakční objem mycelia, což vede ke vzniku hustě baleného materiálu. Předlisování materiálů během výroby ovlivňuje jejich mechanickou reakci z hlediska pevnosti v tlaku, což má za následek vyšší Youngův modul.²²



Obrázek 9: Balení substrátu "Ecovative" do plastových forem.

Pórovitost a vysoký obsah vzduchu také vysvětlují nárůst napětí a tuhosti po opětovném zatížení materiálů při kompresních zkouškách, protože vzduch je při prvním zatížení vytlačen, což vede ke zvýšení hustoty materiálu. Husté vzorky vykazují vyšší pevnost než vzorky volně uložené. Hyfy rostou aerobně a při setkání s PVC formami vertikálně podél povrchu, aby dosáhly na kyslík, a vytvářejí pohlcující ochrannou vrstvu hyf v kontaktu se vzduchem. Výsledkem je bariéra, která zabraňuje tomu, aby se teplo vyprodukované během růstu rozptýlilo ve středních částech materiálu.⁴³ Vnější vrstva mycelia má za následek nízkou absorpci vody (24-30 %). Orientace vláken a směr povrchu sendvičových panelů ovlivňují redukci rozměrů.²²

5.7 Podmínky růstu

Optimálních růstových podmínek se liší pro každý druh houby na jiném substrátu. Inkubační teploty se pohybují mezi 21 a 30 °C v závislosti na druhu. Celková hmotnost po hydrataci se skládá ze 2/3 z vody a 1/3 ze substrátu. Obsah relativní vlhkosti se obvykle pohybuje mezi 70 a 100 %.³⁶ Hodnota pH se pohybuje mezi 5 a 8. Inkubace probíhá většinou ve tmě, v kontrolovaném prostředí, kde je možná cirkulace vzduchu. Vysoké hustoty materiálu se dosahuje při nízké koncentraci CO₂ a za nepřítomnosti světla. Youngův modul se v důsledku zvýšeného

obsahu CO₂ na světle zdvojnásobuje, zatímco ve tmě je pozorován opačný efekt. Podobné výsledky byly zaznamenány i u pevnosti v tahu.⁴⁴

5.8 Čas růstu

Doba inkubace závisí na velikosti materiálu a obvykle se určuje na místě. Doba růstu se může pohybovat od 5 do 42 dnů. Materiály, které rostly delší dobu, jsou méně pórovité, a proto dochází ke snížení hydraulické propustnosti.²² Delší doba růstu mycelia zlepšuje tepelnou stabilitu. Delší doba inkubace, např. 42 dní, má za následek negativní vliv na modul pružnosti.⁴¹ Naopak dlouhá doba inkubace má pozitivní vliv na pevnost v tlaku, přičemž největší nárůst absolutní hodnoty z 350 na 570 kPa, tedy o více než 60 %, byl zaznamenán u předem inkubovaných a hustě regenerovaných hub.⁴¹

5.9 Způsob sušení

Existuje mnoho způsobů, doby trvání a teplot dehydratace: mikrovlnný ohřev, ohřev v infračervené (IR) peci, ohřev v IR lampě, pečení v peci, konvekční ohřev při 60 °C po dobu 12 h, tepelné lisování při 250 °C po dobu 20 minut použití sušícího stroje při 60 °C po dobu 24 h a sušení na vzduchu.¹⁴

Vysušené vzorky nejsou 100% suché kvůli vlhkostním podmínkám laboratoří. Obsah vlhkosti vysušených materiálů se pohybuje mezi 0,6 % a 20 %. Vzhledem k tomu, že živé materiály se skládají z vysokého obsahu vlhkosti, je tepelná vodivost vyšší. Na konce, když se růst mycelia tepelnou úpravou zastaví, jeho vlákna již nejsou podporována vnitřním hydrostatickým tlakem, a z tohoto důvodu se jeví jako zploštělá. Proto jsou elastické moduly živých vzorků menší ve srovnání se vzorky sušenými.⁴¹

5.10 Následné zpracování

Existuje několik metod následného zpracování MK. V závislosti na funkci materiálu lze použít různé typy povlaků. Pro zajištění odolnosti kompozitu na bázi biobavlny proti povětrnostním vlivům využívají přírodní oleje a šelak. Před přidáním nátěru materiál dezinfikuje pomocí esenciálních olejů.¹⁴

V jiné studii byly použity jedlé fólie z karagenanu, chitosanu a xanthanu, které vytvářejí fyzikální bariéru proti vodě s antimikrobiálními vlastnostmi.⁴⁵ Nebyl pozorován žádný významný pozitivní dopad. Aby stěna mohla dýchat, navrhl Maurizio Montalti nanočástice, například nanocelulóza, která je schopná proniknout do pórů a zároveň udržet strukturu otevřenou.⁴⁶

Kromě aplikací látek odolných proti povětrnostním vlivům lze také využít přírodní pryskyřice ke zvýšení mechanických vlastností materiálu. Výrazná impregnace naopak bude mít za následek nepříznivé vlastnosti struktury¹⁴.

5.11 Vliv druhu hub a substrátů na mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitu

Některé studie prokázaly, že mechanické vlastnosti MK jsou nejvíc ovlivněny jejich výchozí surovinou. Mechanické vlastnosti přírodních vláken používaných při pěstování myceliových materiálů mohou být ovlivněny zpracováním vláken, jejich lignocelulózovým složením a podmínkami prostředí během růstu, které následně ovlivňují vlastnosti samotných MK. Zásadními faktory, které je třeba při výběru vláken zvážit, jsou jejich rozměry, vady, pevnost a struktura.²²

Substráty obsahující přírodní vlákna, která nejsou během výroby myceliových materiálů degradována, vykazují zpevňovací vlastnosti, protože přírodní vlákna slouží k vyztužení materiálu a zabraňují jeho smykovému porušení.⁴¹ Jiná studie uvádí, že pevnost v tlaku materiálů obsahujících dřevní piliny se při smíchání s pískem zvyšuje až o 300 % ve srovnání s čistými materiály. K vláknům lze přidávat přísady, jako je oxid křemičitý, jíla, perlit, metylcelulóza, glycerin a agaróza, které udržují vlhkost nebo zvyšují viskozitu substrátu.⁴⁷

Výsledky různých vědeckých prací prokazují, že MK má lepší tepelné izolační vlastnosti ve srovnání s běžnými izolačními materiály, jako je minerální vlna, skelná vlna a extrudovaný polystyren. Provedené testy ukázaly, že mechanické vlastnosti MK závisí více na typu zpracování vláken (volná, sekaná, předlisovaná a tažená) a velikosti než na chemickém složení vláken.⁴⁸

6 Mechanické a fyzikální vlastnosti mycokompozitů

6.1 Objemová hmotnost

Průměrná objemová hmotnost MK z třísek byla zjištěna na úrovni 178,5 kg/m³, zatímco polystyren má hustotu 30 kg/m³. Kompozitní materiály z mycelia jsou biologicky pěstovány bez působení tlakových sil. Vzorky s vyšší hustotou lze získat předlisováním tohoto materiálu. Toto zhušťování však může způsobit radikální změny dalších vlastností materiálu. Vliv zhušťování v materiálech na bázi mycelia je málo studován nebo popsán.⁴⁹

Obsah vlhkosti ve vzorcích MK se pohybuje kolem 30 %, zatímco EPS má téměř nulovou schopnost udržovat vodu. Udržování vlhkosti je důležitým určujícím faktorem, zejména pokud se jedná o použití v oblasti obalů. Nanesení tenké vrstvy laminace na povrch může výrazně zvýšit odolnost MK proti vlhkosti, což také zvyšuje trvanlivost, ale je to spojeno se snížením biodegradability.⁵⁰

6.2 Tepelné izolační vlastnosti

Tepelná vodivost je množství tepla, které může být přeneseno materiálem při daném rozdílu teplot. Tepelná vodivost MK je o něco vyšší než u EPS. Kompozit mycelia má tepelnou vodivost přibližně 0,069950 W/m.k, zatímco vzorek EPS má 0,053984 W/m.k. Při stejném teplotním rozdílu může MK přenášet více tepla ve srovnání s EPS, proto je expandovaný polystyren nepatrně lepším izolantem.⁵¹

6.3 Nasákavost

Průměrná hustota materiálu na bázi mycelia po absorpci vody je přibližně 318,309 kg/m³. Vzorky biokompozitů zůstaly na hladině i přesto, že dosáhly 120-185 % hmotnosti. MK dokázal zachovat své rozměry bez deformace, rozkladu či pokrivení i po nasátí vody. To naznačuje, že kompozitní materiál je vhodnou náhradou pro obalové aplikace, kde je třeba výrobek skladovat po omezenou dobu. Biokompozitní materiál, který absorbuje vodu, rozhodně není ideálním materiálem pro obaly. Ale MK lze zvážit v případě, že balené předměty jsou suché a neobsahují tekutiny.⁵¹

6.4 Pevnost v tlaků

Bylo zjištěno, že průměrná hodnota pevnosti v tlaku a modulu pružnosti v tlaku MK je vyšší než u EPS. Modul pružnosti v ohybu MK je přibližně pětkrát vyšší než modul pružnosti v ohybu EPS. Jelikož má biokompozitní materiál vyšší modul pružnosti v tlaku a pevnost v tlaku než EPS, lze předpokládat, že biokompozitní materiál je pevnější v tlaku než EPS. Biokompozitní materiál je ve srovnání s EPS schopen snášet vyšší zatížení v tlaku, což pomůže snížit tloušťku materiálu, který se používá pro balení, a tím snížit náklady.⁵⁰

Různé výzkumy uvádí, že typ vlákna (konopí, len, dřevo, lněný odpad) má menší vliv na pevnost v tlaku než stav vlákna (volné, sekané, tažené, předlisované). Youngův modul v tlaku je u všech typů vláken vyšší v sekaném stavu, protože vzorky jsou hustší. Vzorky obsahující sekaná vlákna také vykazují lepší soudržnost a hladší vnější vrstvu.⁵²

II PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

7 Metodika přípravy vzorků

V první části práce byly připravené (vypěstované) zkušební vzorky. Substráty s myceliem byly aplikovány do speciálně upravených plástových forem o rozměrech 160x110x40mm, Po ukončení fáze růstu mycelia MK byl vyndán z plástových boxu a přemístěn do sušárny na dobu 48 hodin při $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkost vzduchu je 60 % a následně označen.

7.1 Příprava sadby

Sadba byla připravena z pšeničných zrn. Zrna byla uvařena ve varném hrnci tak, aby zrna nepopraskala. Uvařené zrno bylo popráno ve studené vodě, odkapáno a smícháno se sádrou, aby došlo k změně pH a bylo zamezeno nadbytečnému shlukování. Směs byla uložena do skleněných lahví uzavřených bavlněnou zátkou. Materiál byl sterilizován autoklávováním po dobu 4 hodin při $121\text{ }^{\circ}\text{C}$. Do baněk byly v prostředí flowboxu naočkovány agarové kultury studovaných hub. Nástroje byly sterilizovány alkoholem a plamenem kotle. Naočkována zrna byla každý týden protřepávána.

7.2 Příprava substrátu

Příprava substrátu probíhala ve výzkumné stanici ČZU v Červeném Újezdě a následně v laboratoři na ČZU. Zjišťovala se vlhkost substrátu a doplňovala se voda pro dosažení požadované v pokusu vlhkosti. Substrát se plnil do kbelíku a následně byl sterilován v autoklávu 4 hodiny při teplotě $121\text{ }^{\circ}\text{C}$. K přípravě substrátu bylo použito 1,5 kg listnatých a 1,5 kg jehličnatých pilin. Původní vlhkost listnatých pilin činila 11,40 % a u jehličnatých 9,95 %. Piliny byly navlhčeny přidáním 2250 ml vody. Výsledná vlhkost činila 61,85 % pro listnáče a 63,35 % pro jehličnany. Měření rychlosti byla provedena ve dnech 18.8., 23.8., 25.8. a 30.8. v závislosti na rychlosti růstu mycelia. Po ukončení růstové zkoušky, mycelia byla přemístěna do plastových boxů se špunty.

7.3 Očkování substrátu a měření mycelia

Následující den po sterilizaci byl substrát naočkován sadbami z láhví. Očkování probíhalo ve flowboxu. Pomocí 4 vertikálních os na povrchu kbelíků byl pravidelně

označován růst mycelia. Pokus končil, jakmile jedno mycelium kolonizovalo celou nádobu.

7.4 Tvarování mycelia do bloků

Po prorůstání bylo mycelium rozmícháno a přemístěno do plastových boxů, které byly předem dezinfikovány lihem.

Houba	Listnáče (počet nádob)	Jehličnany (počet nádob)
<i>Bjerkandera adusta</i>	3	3
<i>Ganoderma „Ecovative“</i>	3	3
<i>Ganoderma lucidum</i>	3	3
<i>Ganoderma oregonense</i>	3	3

Tabulka 1 : Druhový seznam pěstovaných MK



Obrázek 10: Plastové boxy s prorostlým substrátem.

Pokus byl založen 9.8. Bylo naplněno 12 kbelíků listnatými a 12 jehličnatými pilinami. 10.8. sterilizované substráty byly naočkovány sadbami vybraných hub. Po ukončení růstových zkoušek byla mycelia jednotlivých hub přemístěna do plastových boxů. Rychlost růstu mycelia vybraných hub byla porovnána pomocí

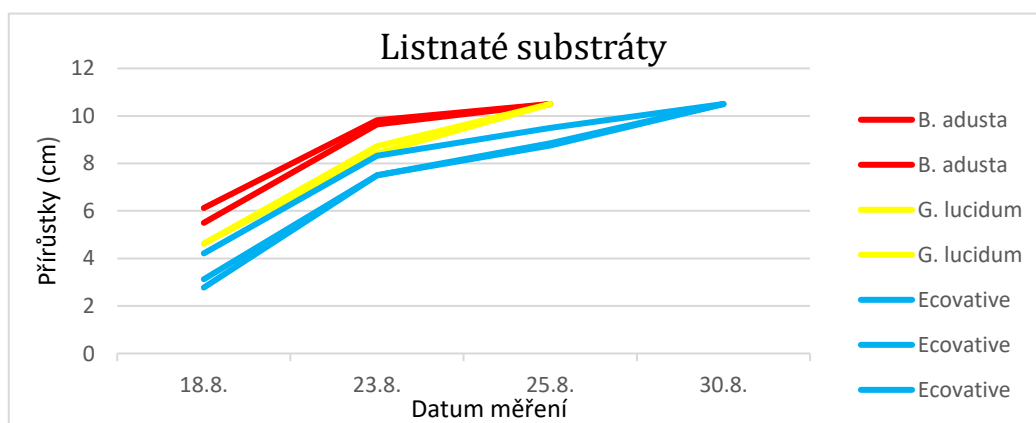
grafů. Plastové boxy pro tvarování mycelia byly změněny tak, aby byl zajištěn přístup kyslíku. Kryty byly proděravěny a do otvorů byly umístěny špunty.

Materiály:

- listnaté piliny (buk)
- jehličnaté piliny (smrk)
- plastové kbelíky (700 ml a 160x110x40mm)
- sadba *Ganoderma „Ecovative“*
- sadba *Ganoderma lucidum*
- sadba *Ganoderma oregonense*
- sadba *Bjerkandera adusta*
- plastové boxy
- lůh technický
- špunty

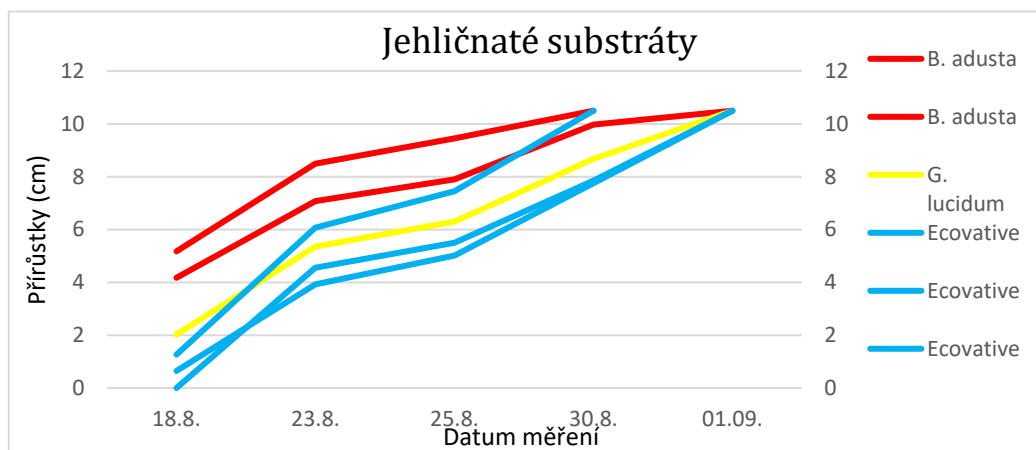
7.5 Použité zkušební vzorky

18.8. byl pozorován vznik plísňové kontaminace ve všech kbelících s *G. „Ecovative“* a v jednom kbelíku s *G. lucidum* obsahujícím jehličnatý substrát. 23.8. kvůli silné kontaminaci substrátu byly vyřazené dva kbelíky s jehličnatými substráty, jeden s myceliem *G. „Ecovative“* a druhý s myceliem *G. lucidum*. Byla také vyřazena mycelia *G. oregonense* kvůli nevyhovující rychlosti substrátu.



Obrázek 11: Graf závislosti přírůstu mycelia na času v listnatém substrátu.

Obrázek č. 11 znázorňuje růst mycelia v listnatém substrátu a obr. č. 12 v substrátu jehličnatém.



Obrázek 12: Graf závislosti přírůstu mycelia na času v jehličnatém substrátu.

Kolonizace jehličnatého substrátu *B. adusta* trvalo o 5 dnů víc než listnatého. Rychlost růstu mycelia *G. „Ecovative“* v daném pokusu byla menší než u *B. adusta*, ale nebyla natolik ovlivněna typem dřeva, spíš kvůli větší frakce pilin jehličnanu.



Obrázek 13: Vzorčky MK po odformování.

Dohromady bylo připraveno 6 druhů MK, 3 vzorků každého typu.

Číslo varianty	Houba	Substrát
1	<i>Ganoderma lucidum</i>	listnaté piliny (buk)
2	<i>Ganoderma lucidum</i>	jehličnaté piliny (smrk)
3	<i>Bjerkandera adusta</i>	listnaté piliny (buk)
4	<i>Bjerkandera adusta</i>	jehličnaté piliny (smrk)
5	<i>Ganoderma „Ecovative“</i>	listnaté piliny (buk)
6	<i>Ganoderma „Ecovative“</i>	jehličnaté piliny (smrk)

Tabulka 2 : Seznam variant MK připravených na zkoušky.

8 Metody hodnocení mycokompozitů

Ve druhé části práce byly stanoveny základní fyzikální, tepelně izolační a mechanické vlastnosti na vytvořených vzorcích MK. Z důvodu toho, že neexistují normy pro měření MK, v praktické části byly použity normy měření dřeva a izolačních materiálů. Po stanovení všech vlastností u všech druhů MK následovalo vyhodnocení.

8.1 Stanovení rozměrů a objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno v souladu s ČSN EN 1602: Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení objemové hmotnosti [27]. S pomocí posuvného měřidla se naměřily rozměry pro stanovení objemu. Následným zvážením vzorků byla zjištěna jeho hmotnost. Tyto hodnoty se dosadily do vzorce pro výpočet objemové hmotnosti ρ_v [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], který se stanoví, jako podíl hmotnosti a objemu zkušební vzorku:

$$\rho_v = \frac{m}{V}$$

kde

m je hmotnost vysušeného vzorku (kg)

V je objem vzorku získaný výpočtem (m^3)

8.2 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

K měření tepelných vlastností materiálů byl použit přístroj ISOMET 2114, který používá nestacionární měřící metodu a redukuje dobu měření na 15–20 minut. Jedná se o přístroj určený k přímému měření součinitele tepelné vodivosti λ [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$], měrné tepelné kapacity c [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$] a teploty kompaktních sybkých a kapalných materiálů pomocí výměnných jehlových sond pro měření sybkých materiálů a plochých sond pro měření zkušebních těles. Měření byly zkušební vzorky o rozměrech 150 x 110 x 40 mm. Všechna měření se prováděli při teplotě $+22^\circ\text{C}$.

Předpokládáme, že by materiál mohl být použit jako vrstva obalu. Proto byl dále spočítán tepelný odpor R (.K/W) z rovnice:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

kde

d je tloušťka vrstvy vzorku (m), v našem případě 0,04 m

λ je součinitel tepelné vodivosti (W/m.K)

8.3 Stanovení nasákavosti

Stanovení krátkodobé nasákavosti u vzorků bylo provedeno podle Stanovení krátkodobé nasákavosti bylo provedeno dle ČSN EN 490104 Metoda zjišťování nasákavosti a navlhavosti.⁵³ Nasákavost je schopnost materiálu přijímat a fyzikálně vázat vodu při ponoření za stanovené teploty a po určenou dobu. Zkouška nasákavosti je založena na zatížení vzorku těžítkem v destilované vodě.

Nasákavost materiálu N [%] se vypočte podle vzorce:

$$N = \frac{m_{24} - m_0}{m_0}$$

kde

m_{24} je hmotnost suchého materiálu v kg,

m_0 je hmotnost mokrého vzorku materiálu v kg.

A je plocha spodního povrchu zkušební vzorku m²

Stanovení nasákavosti bylo prováděno při teplotě 22 °C. Jednotlivá tělíska byla ponořena do vody na 24 hodin. Po uplynutí této doby byla vyjmuta a zvážena. Na základě změřeného nárůstu hmotnosti byla vypočítána nasákavost. Výsledky byly zpracovány do grafů.

8.4 Stanovení pevnosti v tlaku při 10 % deformaci

Vzhledem k tomu, že neexistuje žádný standardní postup testování MK, je možné použít různé geometrie forem. Velká kontaktní plocha se zatížením vedla k většímu rozložení indukce napětí, zatímco omezená výška zabránila selhání vybočením. Stanovení pevnosti v tlaku u vzorků o rozměrech 100x100 mm, bylo provedeno v souladu s ČSN EN 826: Tepelně izolační výrobky pro použití ve stavebnictví – zkouška tlakem. ⁵⁴ Tlaková síla působila danou rychlostí kolmo na hlavní rovnoběžné plochy obdélníkového krychlového vzorku. Dokud nedošlo k porušení před dosažením 10 % deformace, vypočítalo se tlakové napětí při 10 % deformaci. Hodnota byla uvedena jako tlakové napětí při 10 % deformaci.



Obrázek 14: Zkouška pevnost v tlaku.

Stlačené plochy vzorku byly umístěny ve středu mezi rovnoběžnými deskami zatěžovacího stroje. Vzorek byl zatížen počátečním tlakem 250 ± 10 Pa. Zkušební lis je stlačován pohyblivou deskou zatěžovacího stroje konstantní rychlostí 0,1 d za minutu, kde d je tloušťka vzorku v milimetrech. Tímto způsobem byla stanovena pevnost v tlaku nebo bylo dosaženo relativního stlačení 10 %, a tak bylo možné stanovit napětí v tlaku při 10 % deformaci.

Poměrné stlačení ε_m v procentech, se stanovilo dle:

$$\varepsilon_m = \frac{X_m}{d_0}$$

kde:

X_m je přetvoření deformace při maximální síle [mm];

d_0 je počáteční tloušťka zkušební vzorku [mm].

Napětí při 10 % deformaci σ_{10} [kPa] se určilo dle:

$$\sigma^{10} = \frac{10^3 * F_{10}}{A_0}$$

kde:

F_{10} je síla odpovídající 10 % poměrného stlačení [N]

A_0 je počáteční průřez zkušební vzorku [mm²]

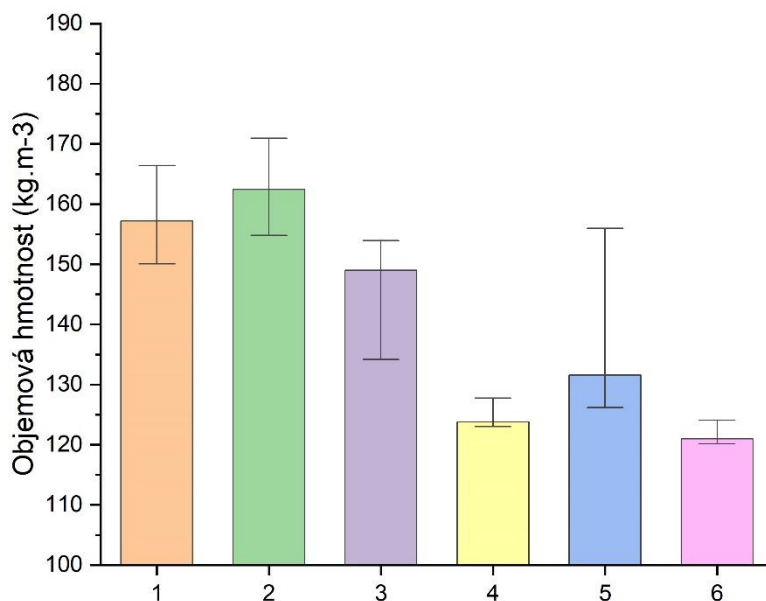
9 Výsledky

9.1 Stanovení objemové hmotnosti

Měření lineárních rozměrů dle ČSN EN 12085 a stanovení objemové hmotnosti dle ČSN EN 1602 bylo stanoveno podle uvedených norem. Měření bylo realizováno 3krát pro každou variantu na vzorcích o rozměrech 150x110x45 mm, které byly připraveny a charakterizovány v kapitole 5.2. Hustota byla vypočtena po vysušení z hmotnosti a objemu každého vzorku připraveného pro tlakovou zkoušku. Průměrné naměřené a stanovené hodnoty pro každou variantu MK jsou uvedeny v následující tabulce.

Číslo varianty	\bar{V} [m ³]	\bar{m} [g]	$\bar{\rho}_v$ [kg.m ⁻³]	$\bar{\rho}_v$ Směrodatná odchylka [kg.m ⁻³]	$\bar{\rho}_v$ Variační rozpětí R [kg.m ⁻³]	$\bar{\rho}_v$ Variační koeficient [kg.m ⁻³]
1	0,000689	108,7	157,90	6,7	44,8	0,04
2	0,000676	109,7	162,73	6,6	43,5	0,04
3	0,000767	111,3	145,69	8,4	70,8	0,06
4	0,000881	110,0	124,84	2,1	4,3	0,02
5	0,000814	111,7	137,91	12,9	167,7	0,09
6	0,000857	104,3	121,75	1,7	2,9	0,01

Tabulka 3: Přehled naměřených hodnot při stanovení objemové hmotnosti.



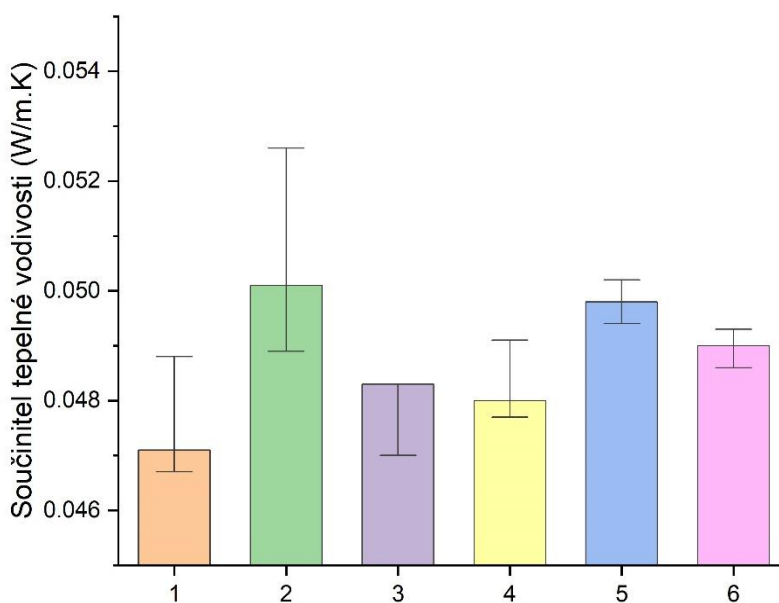
Obrázek 15: Graf hodnot objemové hmotnosti

9.2 Součinitele tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti byl stanoven podle normy ČSN EN 12667. Pro určení součinitele tepelné vodivosti byla vybrána metoda měřiče tepelného toku podle ČSN 72 7012-3 a ISO 8301. Byl použit přístroj pro měření vlastností materiálů při přestupu tepla (Isomet 2114 Applied Precision) pro vzorky s hodnotami tepelné vodivosti mezi 0,015 a 0,70 W/mK s přesností měření hodnoty tepelné vodivosti 5 % z naměřené hodnoty +0,001 W/mK). Od každého druhu MK byl vybrán reprezentativní vzorek (o průměrné objemové hmotnosti), na kterém bylo provedeno měření 3krát. Průměrné naměřené a stanovené hodnoty pro každou variantu MK jsou uvedeny v následující tabulce a grafu.

Číslo varianty	\bar{R} [m ² .K/W]	$\bar{\lambda}$ [W/m.K]	$\bar{\lambda}$ Směrodatná odchylka [W/m.K]	$\bar{\lambda}$ Variační rozpětí R [W/m.K]	$\bar{\lambda}$ Variační koeficient [W/m.K]
1	9,0463	0,0475	0,0009	0,00000083	1,92 %
2	9,1029	0,0505	0,0015	0,00000238	3,05 %
3	8,7744	0,0479	0,0006	0,00000038	1,28 %
4	11,6022	0,0483	0,0006	0,00000036	1,25 %
5	10,0402	0,0498	0,0003	0,00000011	0,66 %
6	10,8237	0,0490	0,0003	0,00000008	0,59 %

Tabulka 4: Přehled hodnot tepelněizolačních vlastností.



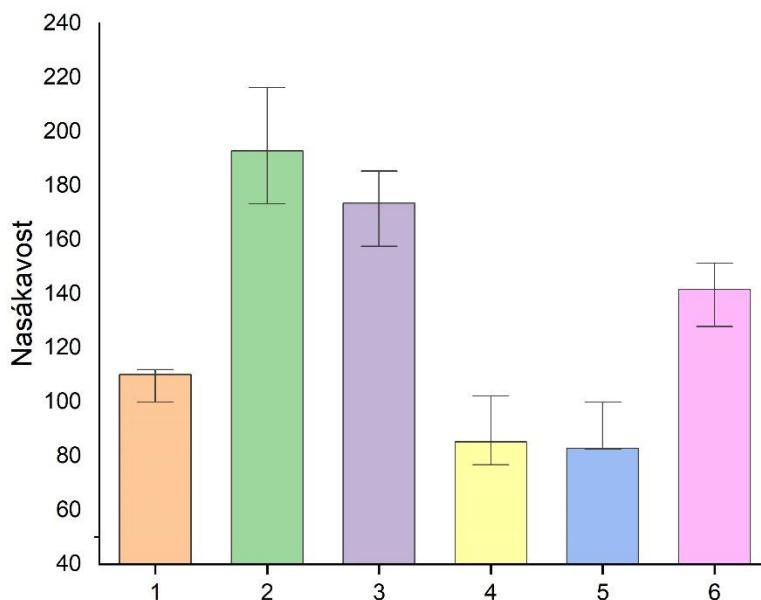
Obrázek 16: Graf hodnot součinitel tépelné vodivosti

9.3 Nasákavost

Stanovení krátkodobé nasákavosti bylo provedeno dle ČSN EN 490104 Metoda zjišťování nasákavosti a navlhavosti.⁵³ Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce. Vzorky byly umístěny do plastových kontejnerů naplněné destilovanou vodou udržovanou při teplotě 23 ± 1 °C a hmotnost byla měřena po 24 hodinách. Při měření byly vzorky vyjmuty z vodní hladiny, povrchová voda byla ručně odstraněna papírem a zvážena do 1 minuty po vyjmutí z vody. Od každého druhů MK bylo vybráno 3 vzorků. Průměrné naměřené a stanovené hodnoty pro každou variantu MK jsou uvedeny v následující tabulce a grafu.

Číslo varianty	\bar{m}_0 [gr]	\bar{m}_{24} [gr]	\bar{N} [%]	\bar{N} Směrodatná odchylka	\bar{N} Variační rozpětí R	\bar{N} Variační koeficient
1	79	164	107,1	5,27	27,78	0,05
2	105	308	193,7	17,58	308,93	0,09
3	108	295	172,0	11,44	130,96	0,07
4	95	179	87,8	10,56	111,51	0,12
5	102	192	88,2	8,16	66,60	0,09
6	109	262	140,3	9,62	92,48	0,07

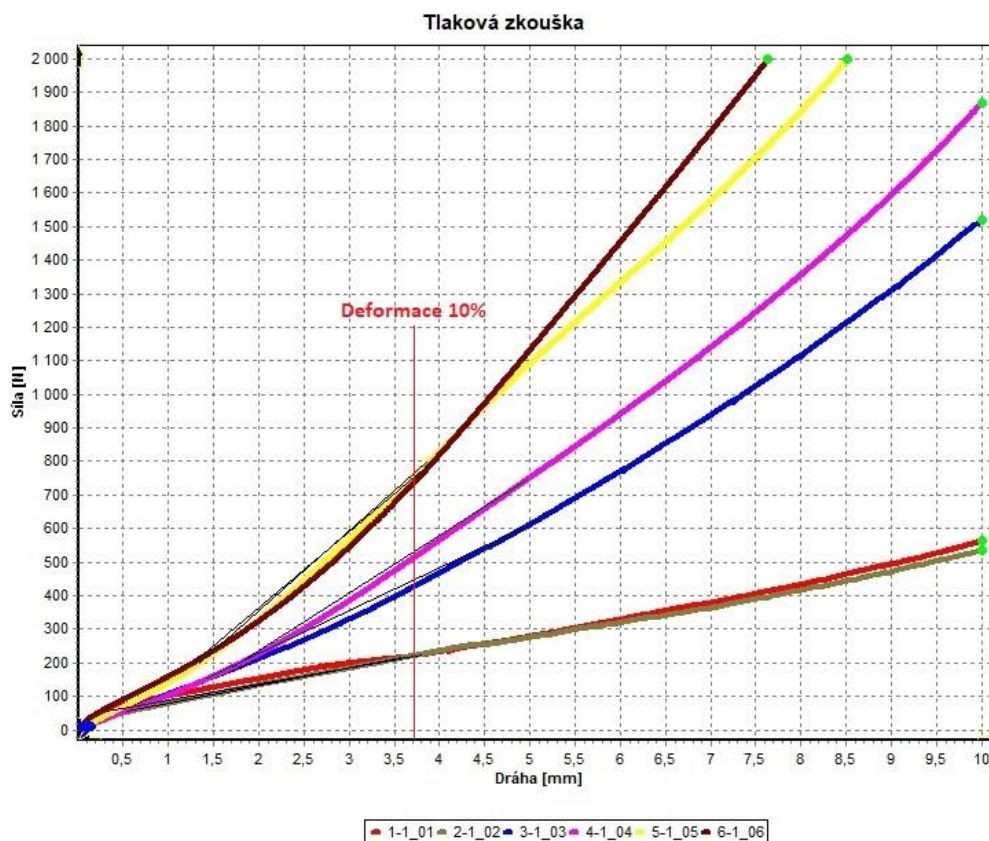
Tabulka 5: Přehled hodnot nasákavosti.



Obrázek 17: Graf hodnot nasákavosti

9.4 Pevnost v tlaku při 10 % deformaci

Zkoušky byly provedeny na univerzálním zkušebním stroji Tiratest 2850 (Schalkau, Německo) při rychlosti prodloužení 4 mm/min a maximální síle 2 kN. Data byla analyzována za účelem získání grafů napětí a deformace. Na obrázku jsou zobrazeny křivky síly a deformace získané pro MK vyrobené v této práci s použitím hub *Ganoderma „Ecovative“*, *Ganoderma lucidum* a *Bjerkandera adusta*. Při jejich



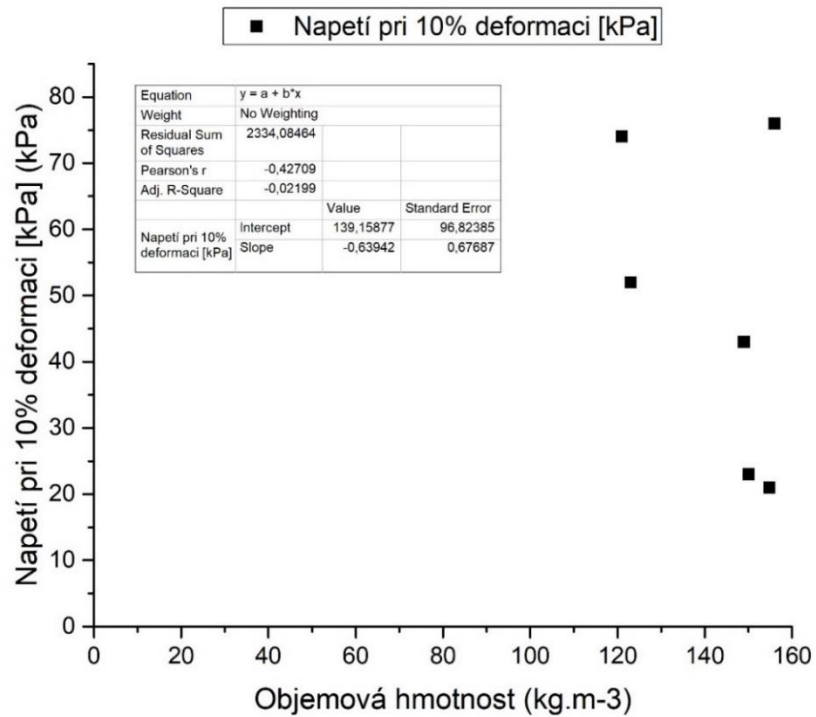
Obrázek 18: Graf průběhu zkoušky pevnost v tlaku

deformaci v tlaku se v tomto případě vzorky zplošťovaly a směřovaly ke tvaru disků. Následně byly provedeny výpočty, aby stanovit pevnost v tlaku při 10 % deformaci.

Číslo varianty	\bar{F}_{10} [kN]	$\bar{\sigma}_{10}$ [kPa]	$\bar{\sigma}_{10}$ Směrodatná odchylka	$\bar{\sigma}_{10}$ Variační rozpětí R	$\bar{\sigma}_{10}$ Variační koeficient
1	0,23	23	1,25	1,56	0,06
2	0,21	21	0,82	0,67	0,04
3	0,43	43	2,16	4,67	0,05
4	0,52	52	2,16	4,67	0,04
5	0,76	76	2,87	8,22	0,04
6	0,74	74	2,49	6,22	0,03

Tabulka 6: Přehled hodnot napětí při 10 % deformaci.

Následně byl z naměřených hodnot sestaven graf závislosti objemové hmotnosti na pevnosti v tlaku při 10 % deformaci. Z grafu je patrné, že mezi objemovou hmotností a napětím při 10 % deformaci není prokazatelná závislost.



Obrázek 19: Graf závislosti napětí při 10 % deformaci na hustotě.

10 Diskuze

10.1 Objemová hmotnost

Z hodnot uvedených v tabulce č. 3 a z grafu obr. č. 15 je patrné, že objemová hmotnost u zkoušených vzorků MK se pohybuje v rozmezí od 121,75 do 162,73 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Nejvyšší hodnotu zaznamenaly vzorky *Ganoderma lucidum* na bázi smrkových a bukových pilin. Výsledky jsou porovnatelné s hodnoty nelisovaných MK v cizích zdrojích: 100-170 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ uvádí Freek V.W. Appels a col.¹², 87,4-159,5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ E. Elsacker⁵², 121,74 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ Ecovative⁵⁵, 178,5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ Rejeesh⁵⁶. Zatímco hustota polystyrenu je v rozmezí 10-40 kg/m^3 . MK byli biologicky pěstováni bez působení jakýchkoli tlakových sil. Vzorky s vyšší hustotou lze získat předlisováním tohoto materiálu. Vliv zhušťování v materiálech na bázi mycelia je málo studován nebo popsán. Jose J. a col. uvádí, že toto zhušťování však může způsobit radikální změny dalších vlastností materiálu.⁴⁹

10.2 Součinitel tepelné vodivosti

Z grafu obr. 16 lze vyčíst, že se hodnoty součinitele tepelné vodivosti různých testovaných vzorků MK nachází kolem průměrných hodnot uváděných v literatuře. Průměrná tepelná vodivost MK je 0,0487 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ (0,062 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ⁴⁶, 0,058 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ²², 0,039 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ⁵⁵) a víceméně podobná hodnotám tepelné vodivosti EPS (0,053984 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ⁵⁰, 0,036 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ⁵⁷, 0,0395 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ⁵¹).

To je v typickém rozmezí běžných izolačních materiálů, jako je minerální vlna, extrudovaný polystyren, pěnový polystyren, skelná vata, polyuretan (PUR), recyklovaná bavlna a polyuretan; mírně nad hodnotami izolačních materiálů na bázi dřeva, jako jsou dřevovláknité izolační desky.

Výsledky potvrdily, že myceliové kompozity se mohou stát alternativním biologickým tepelně izolačním materiálem a náhradou syntetickým obalovým materiálům, jejichž vlastnosti jsou ovlivněny výrobními proměnnými.

10.3 Stanovení nasákavosti

Průměrná hustota materiálu na bázi mycelia po absorpci vody je přibližně 219,59 kg/m³. Vzorky MK zůstaly na hladině i přesto, že nabraly 83-193 % hmotnosti. Kompozit z mycelia si dokázal zachovat své rozměry bez deformace, rozkladu či pokřivení i po nasátí vody. Na grafu obr. 17 je znázorněna nasákavost v závislosti na hustotě vzorků. Z grafu je vidět, že mezi objemovou hmotností a nasákavostí není prokazatelná závislost. Nejvyšší nasákavost prokázala varianta č. 2 a 3, kde se jedná o *Ganoderma lucidum* na bázi smrkového substrátu, která měla hodnotu nasákavosti 193,7 % a *Bjerkandera adusta* na bázi bukových pilin 172 %.

Naopak nejnižší hodnoty dosahovaly varianty č. 4 a 5, kde se jedná o a *Bjerkandera adusta* na bázi smrkového substrátu a *Ganoderma „Ecovative“* na bázi bukových pilin 87,8 % a 88,2 %.

Jak ukazuje některé práce ⁴⁸ hustota vzorků může ovlivnit difuzní koeficient vody. Ale spíše intenzivnější růst na povrchu některých vzorků vedl k hustší vnější hydrofobní vrstvě mycelia, což vysvětluje nižší míru absorpce vody u variant č. 4 a 5. Nejvyšší nasákavost u variant č. 2 a 3 lze vysvětlit tím, že vzorky měli roztřepenou, poškozenou vnější myceliovou vrstvu.

Míra nasákavosti je důležitým faktorem pro použití MK jako obalových materiálů, protože určuje životnost materiálu v čase. Biokompozitní materiál, který absorbuje vodu, rozhodně není ideálním prvkem pro obalový materiál. MK však lze považovat za vhodný v případě, že balené předměty jsou suché a neobsahují tekutiny a kde je třeba produkt skladovat po omezenou dobu. Nanesení tenké vrstvy laminace na povrch může výrazně zvýšit odolnost myceliových kompozitů proti vlhkosti, což také zvyšuje skladovatelnost, ale je to za cenu snížení biologické rozložitelnosti.⁴⁹

10.4 Stanovení pevnosti v tlaku při 10 % deformaci

Nejlepší mechanické vlastnosti z pohledu napětí při 10 % deformaci vykazovali varianty č. 5 a 6, kde se jedná o *Ganoderma „Ecovative“* na bázi bukového substrátu, která měla hodnotu napětí při 10 % deformaci 76,0 kPa a *Ganoderma „Ecovative“* na bázi smrkových pilin 74,0 kPa. Naopak nejnižší hodnoty dosáhli

varianty číslo 1 a 2, kde se jedná o *Ganoderma lucidum* na bázi smrkových pilin a na bázi bukových pilin 23,0 kPa a 21,0 kPa.

Společnost Ecovative uvádí hodnotu napětí při 10 % deformace obalu z MK 124 kPa⁵⁸, Rejeesh a col uvádí napětí MK 288-432 kPa.⁵⁰ Ve srovnání z napětí EPS při 10% deformace (8,05-9,29 kPa⁵⁰, 15-45 kPa⁴⁵). Je patrné, že MK materiál má vyšší pevnost v tlaku, proto je MK pevnější v tlaku než EPS nízké hustoty, který je běžným obalovým materiálem.

Naším cílem bylo posoudit, jak výběr druhů hub ovlivňuje mechanické vlastnosti při stlačování MK. Nízká pevnost může souviset s pórovitostí kompozitů. Odolnost proti stlačení u *Ganoderma „Ecovative“* může souviset s vnějším pláštěm mycelia, protože růst vzorku probíhal hustěji. Nebylo vidět žádná vlákna a vzorky měly homogenní vzhled s hnědošedou vnější vrstvou. Zatímco vzorky *Bjerkandera adusta* držely během testování a manipulace dobře pohromadě, vzorky ze *Ganoderma lucidum* se rozpadaly. Z toho lze vyvodit závěr, že druh hub ovlivňuje vazbu vláken, a tím i mechanické vlastnosti materiálu. Na základě tohoto testu se domníváme, že *Ganoderma lucidum* je vhodným druhem pro vytváření myceliových kompozitů. Měly by být provedeny podrobnější výzkumy mechanického chování myceliových materiálů s více druhy a kmeny.

11 Závěr

U kompozitů na bázi mycelia, které byli vyrobené z různých typu hub a substrátu, byla hodnocena hustota, schopnost absorbovat vodu, mechanické a fyzikální vlastnosti.

Provedené zkoušky v praktické části ukázaly, že mycokompozitní materiál má velký potenciál nahradit EPS v obalovém průmyslu. Kompresní testy ukázaly, že biokompozit je schopen odolávat vyššímu tlakovému zatížení ve srovnání s EPS nízké hustoty, což pomůže snížit tloušťku materiálu používaného pro balení, což následně sníží náklady na balení. Při testu absorpce vody biokompozit absorboval více vody než EPS. To není ideální vlastnost pro materiál určený k použití v obalech. Test tepelné vodivosti ukázal dobré izolační vlastnosti ve srovnání s běžnými izolačními materiály. Můžeme předpokládat, že MK mají potenciál nahradit kompozity na bázi ropy.

Dalšího zlepšení myceliových materiálů lze dosáhnout podporou kolonizace ve střední části substrátu nebo předlisováním substrátu. V dalším výzkumu by měly být testovány i další vlastnosti MK, jako je požární odolnost, stárnutí, akustika, difúze vodní páry.

Obecně lze říci, že na rozdíl od EPS je MK rozložitelný, což usnadňuje po použití likvidaci mycokompozitu. Biokompozit je dobrou náhradou EPS v obalových aplikacích, protože je vysoce trvanlivý a biologicky odbouratelný, a protože většina zboží baleného pomocí EPS je obecně suchá a bez tekutin, biokompozit tuto nevýhodu překonává, protože lze ignorovat vlhkost a absorpci vody. MK jako alternativa k expandovanému polystyrenu by mohly do značné míry změnit způsob, jakým v současnosti funguje obalový průmysl, ale očekává se, že k tomu dojde spíše pomalu než jako k radikální změně.

12 Seznam literatury a použitých zdrojů

- (1) Foy, G. F. Engineering Plastics and Their Commercial Development. *American Chemical Society*. Washington, DC, 1969. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ba-1969-0096.ch001> (accessed 2023-03-06)
- (2) Plastový odpad a jeho recyklace v EU. *Zpravodajství. Evropský parlament*. 2018. <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20181212STO21610/p-lastovy-odpad-a-jeho-recyklace-v-eu-infografika> (accessed 2023-03-06).
- (3) Yumpu.com. Market Statistics and Future Trends in Global Packaging. 2012. <https://www.yumpu.com/en/document/view/5114572/market-statistics-and-future-trends-in-global-packaging> (accessed 2023-03-06).
- (4) Dicker, M. P. M.; Duckworth, P. F.; Baker, A. B.; Francois, G.; Hazzard, M. K.; Weaver, P. M. Green Composites: A Review of Material Attributes and Complementary Applications. 2014, *56*, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.014>. (accessed 2023-03-06).
- (5) Bayer, E. Eben Bayer: Are mushrooms the new plastic? *TED Talk*. https://www.ted.com/talks/eben_bayer_are_mushrooms_the_new_plastic (accessed 2023-03-07).
- (6) Chawla, K. K. Composite Materials: Science and Engineering; Springer Science & Business Media, 1987. ISBN: 978-0-387-74365-3 <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-74365-3> (accessed 2023-02-26).
- (7) Fowler, P. A.; Hughes, J. M.; Elias, R. M. Biocomposites: Technology, Environmental Credentials and Market Forces. *J. Sci. Food Agric.* 2006, *86* (12), 1781–1789. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2558>.
- (8) Amar K. Mohanty. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. *Routledge & CRC Press*. 2005 ISBN 9780429211607 <https://www.routledge.com/Natural-Fibers-Biopolymers-and-Biocomposites/Mohanty-Misra-Drzal/p/book/9780849317415> (accessed 2023-02-27).
- (9) Drzal, L.; Mohanty, A.; Misra, M. Bio-Composite Materials as Alternatives to Petroleum-Based Composites for Automotive Applications. *Michigan State University*, 2001. https://www.researchgate.net/publication/228474911_Bio-composite_Materials_as_Alternatives_to_Petroleum-based_Composites_for_Automotive_Applications (accessed 2023-02-27).
- (10) Brother, G. H.; McKinney, L. L. Protein Plastics from Soybean Products. *ACS Publications*. 1940 <https://doi.org/10.1021/ie50367a034>.
- (11) Zajimej.se. Cirkulární stavebnictví ve veřejných zakázkách. 03-08-2022. <https://zajimej.se/cirkularni-stavebnictvi-ve-verejnych-zakazkach/> (accessed 2023-02-27).
- (12) Chernikova, E. V.; Osipova, N. I.; Plutalova, A. V.; Toms, R. V.; Gervald, A. Y.; Prokopov, N. I.; Kulichikhin, V. G. Melt-Spinnable Polyacrylonitrile—An Alternative Carbon Fiber Precursor. *Polymers* 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14235222>. (accessed 2023-03-01)
- (13) Zhang, X.; Hu, J.; Fan, X.; Yu, X. Naturally Grown Mycelium-Composite as Sustainable Building Insulation Materials. *J. Clean. Prod.* 2022, *342*, 130784. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130784>. (accessed 2023-03-01)

- (14) Jiang, L. A New Manufacturing Process for Biocomposite Sandwich Parts Using A Myceliated Core, Natural Reinforcement and Infused Bioresin, 2015. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4166.5528>. (accessed 2023-03-05)
- (15) Farber, D. 'Forever Changed': Salesforce Looks Back at Year Defined by COVID-19. *Salesforce*. <https://www.salesforce.com/news/stories/fy21-year-in-review/> (accessed 2023-03-05).
- (16) D.V. Rosato, Marlene G. Rosato. Injection Molding Handbook. Springer New York, NY ISBN 978-1-4615-4597-2 06-12-2012. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4597-2> (accessed 2023-03-05).
- (17) Rigamonti, L.; Grosso, M.; Møller, J.; Martinez Sanchez, V.; Magnani, S.; Christensen, T. H. Environmental Evaluation of Plastic Waste Management Scenarios. *Resour. Conserv. Recycl.* 2014, *85*, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.12.012>. (accessed 2023-03-05).
- (18) Iles, A.; Martin, A. N. Expanding Bioplastics Production: Sustainable Business Innovation in the Chemical Industry. *J. Clean. Prod.* 2013, *45*, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.008>. (accessed 2023-03-05).
- (19) Ashok, A.; C R, R.; Ravindranathan, R. Biodegradable Polymers for Sustainable Packaging Applications: A Review. *Int. J. Bionics Biomater.* 2016, *2*, 1–11. https://www.researchgate.net/publication/318531449_Biodegradable_Polymers_for_Sustainable_Packaging_Applications_A_Review (accessed 2023-03-05).
- (20) de Oliveira, B.; Silva, N.; Oliveira, M.; Mussi-Dias, V.; Freire, M. D. G. INFLUENCE OF THE FUNGUS IN COMPRESSION MECHANICAL BEHAVIOR OF MYCOMPOSITES. 2022. https://imechanica.org/files/MyceliumComposite_AuthorCopy.pdf
- (21) Lücking, R.; Leavitt, S.; Hawksworth, D. Species in Lichen-Forming Fungi: Balancing between Conceptual and Practical Considerations, and between Phenotype and Phylogenomics. *Fungal Divers.* 2021, *109*, 1–56. <https://doi.org/10.1007/s13225-021-00477-7>.
- (22) Elsacker, E.; Vandeloock, S.; Van Wylick, A.; Ruytinx, J.; De Laet, L.; Peeters, E. A Comprehensive Framework for the Production of Mycelium-Based Lignocellulosic Composites. *Sci. Total Environ.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>.
- (23) Unbehaun, H.; Dittler, B.; Kühne, G.; Wagenführ, A. Investigation into the Biotechnological Modification of Wood and Its Application in the Wood-based Material Industry. *Acta Biotechnol.* 2004. <https://doi.org/10.1002/abio.370200311>.
- (24) *Home Mogu - mogu*. 2022. <https://mogu.bio/> (accessed 2023-03-07).
- (25) *Myco-material - PermaFungi*. <https://www.permafungi.be/en/permateria/> (accessed 2023-03-07).
- (26) *Young Architects Program 2014: Hy-Fi by The Living | MoMA*. The Museum of Modern Art. <https://www.moma.org/calendar/exhibitions/3664> (accessed 2023-03-07).
- (27) *About The Growing Pavilion*. The Growing Pavilion. <https://thegrowingpavilion.com/about/> (accessed 2023-03-07).
- (28) Heisel, F.; Schlesier, K.; Lee, J.; Rippmann, M.; Saeidi, N.; Javadian, A.; Block, P.; Hebel, D. Pilzmycele in Der Architektur: MycoTree - Nachwachsende Baustoffe Für Die Städte Der Zukunft. *BioSpektrum* 2017. https://www.researchgate.net/publication/321315582_Pilzmycele_in_der_Architektur_MycoTree_-_nachwachsende_Baustoffe_fur_die_Stadte_der_Zukunft

- (29) Aniela Hoitink creates dress from mushroom mycelium. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2016/04/01/aniela-hoitink-neffa-dress-mushroom-mycelium-textile-materials-fashion/> (accessed 2023-03-07).
- (30) Mycelium Chair by Eric Klarenbeek is 3D-printed with living fungus. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2013/10/20/mycelium-chair-by-eric-klarenbeek-is-3d-printed-with-living-fungus/> (accessed 2023-03-07).
- (31) Terreform ONE (Open Network Ecology) New York City. <https://terreform.org/>
- (32) Muvobit. Acoustic. mogu. <https://mogu.bio/acoustic-collection/> (acc. 2023-03-07).
- (33) Pfaltzgraff, L. A.; Bruyn, M. D.; Cooper, E. C.; Budarin, V.; Clark, J. H. Food Waste Biomass: A Resource for High-Value Chemicals. *Green Chem.* 2013, 15 (2), 307–314. <https://doi.org/10.1039/C2GC36978H>.
- (34) 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 (1), 17. <https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y>.
- (35) Grimm D. Mushroom cultivation in the circular economy. *SpringerLink*. 19-06-18 <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-018-9226-8> (acc 2023-03-07).
- (36) Haneef, M.; Ceseracciu, L.; Canale, C.; Bayer, I. S.; Heredia-Guerrero, J. A.; Athanassiou, A. Advanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Sci. Rep.* 2017, 7 (1), <https://doi.org/10.1038/srep41292>.
- (37) Tripathi N. Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. *npj Climate and Atmospheric Science.* 2019 <https://www.nature.com/articles/s41612-019-0093-5> (accessed 2023-03-07).
- (38) Faith groups help to save disappearing forests. UNEP. 11-01-23 <http://www.unep.org/news-and-stories/story/faith-groups-help-save-disappearing-forests> (accessed 2023-03-07).
- (39) Sánchez C. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. *ScienceDirect*. 2009 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975008001092> (accessed 2023-03-07).
- (40) Schirp A. Production and characterization of natural fiber-reinforced thermoplastic composites using wheat straw modified with the fungus *Pleurotus ostreatus*. 2006. *Journal of Applied Polymer Science - Wiley Online Library*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.24724> (accessed 2023-03-07).
- (41) Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol 29, No 7. [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001866](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866) (acc2023-03-07).
- (42) Ziegler A. Evaluation of Physico-Mechanical Properties of Mycelium Reinforced Green Biocomposites Made from Cellulosic Fibers. 2016 <https://doi.org/10.13031/aea.32.11830> (accessed 2023-03-07).
- (43) Lelivelt, R. J. J.; Lindner, G.; Teuffel, P.; Lamers, H. The Production Process and Compressive Strength of Mycelium-Based Materials. *First Int. Conf. Bio-Based Build. Mater.* 22-25 June 2015 Clermont-Ferrand Fr. 2015, 1–6. <https://pure.tue.nl/ws/files/15138585/leliproduct2015.pdf>
- (44) Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Elsevier Enhanced Reader*. 05-01-2019 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>.

- (45) GNIP, I.; Vaitkus, S. Assessment of Strength under Compression of Expanded Polystyrene (EPS) Slabs. Vol. 10 No. 4 (2004)
<https://matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/26652>
- (46) Sàez, D.; Grizmann, D.; Trautz, M.; Werner, A. Analyzing a Fungal Mycelium and Chipped Wood Composite for Use in Construction; Annual Symposium and 7th International Conference on Spatial Structures. 2021
https://www.researchgate.net/publication/354321519_Analyzing_a_fungal_mycelium_and_chipped_wood_composite_for_use_in_construction.
- (47) Travaglini, S.; Noble, J.; Ross, P. G.; Dharan, H. Mycology Matrix Composites. *28th Annu. Tech. Conf. Am. Soc. Compos. 2013 ASC 2013* 2013, 1, 517–535.
https://www.researchgate.net/publication/288202464_Mycology_matrix_composites
- (48) Elsacker, E. V. An Interdisciplinary Exploration of the Fabrication and Properties of Mycelium-Based Materials. PHd. Thesis. Vrije Universiteit. 2021
- (49) Jose, J.; Uvais, K. N.; Sreenadh, T. S.; Deepak, A. V.; Rejeesh, C. R. Investigations into the Development of a Mycelium Biocomposite to Substitute Polystyrene in Packaging Applications. *Arab. J. Sci. Eng.* 2021, 46 (3), 2975–2984.
<https://doi.org/10.1007/s13369-020-05247-2>.
- (50) Sivaprasad, S.; Byju, S.; Prajith, C.; Shaju, J.; C R, R. Development of a Novel Mycelium Bio-Composite Material to Substitute for Polystyrene in Packaging Applications. *Mater. Today Proc.* 2021, 47. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.622>.
- (51) Petre, S.; Isopescu, D.; Pruteanu, M.; Cojocaru, A. Effect of Exposure to Environmental Cycling on the Thermal Conductivity of Expanded Polystyrene. *Materials* 2022, 15, 6921. <https://doi.org/10.3390/ma15196921>.
- (52) Elsacker, E. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. 22-07-19
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954> (accessed 2023-03-04).
- (53) Zkoušky vlastností rostlého dřeva. Metoda zjišťování nasákavosti a navlhavosti. ČSN 49 0104 (490104). Praha: Český normalizační institut, 1988.
- (54) Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví. Zkouška tlakem. ČSN EN 826 (727045). Praha: Český normalizační institut, 2013.
- (55) Ecovative. Mushroom_Packaging_Technical-Data.
https://cdn.shopify.com/s/files/1/0623/3089/6542/files/Mushroom_Packaging_Technical-Data.pdf?v=1675383840 (accessed 2023-03-04).
- (56) C R, R. Packaging Applications of Fungal Mycelium-Based Biodegradable Composites; 2022; pp 189–208. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1000-5_11.
- (57) Chaloupka K. Ploché střechy. <https://www.gradac.cz/ploche-strechy-5708/>
- (58) Ecovative. *Technical-data*. Mushroom Packaging. 2023.
<https://mushroompackaging.com/pages/technical-data> (accessed 2023-03-09).
- (59) Karana, E.; Blauwhoff, D.; Hultink, E.-J.; Camere, S. *When the Material Grows: A Case Study on Designing (with) Mycelium-Based Materials*. *Int. J. Des.* 2018, 12, 119–136.
<http://www.ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/view/2918>
- (60) Lazaro, E.; Vega, K. *From Plastic to Biomaterials: Prototyping DIY Electronics with Mycelium*; 2019. <https://doi.org/10.1145/3341162.3343808>.

13 Seznam tabulek, obrázků a grafů

Obrázek 1: Dřevotřískové desky MycoBoard Ecovative.

Zdroj:<https://ecodesign.vlaanderen.circulair.be/src/Frontend/Files/Cases/image/1200x630/5d0c8fda78a86.jpg>..... 20

Obrázek 2: Koncept stoliček společnosti "Myce" kombinací mycelia se dřevem.

Zdroj:<https://www.facebook.com/Myceen.eu/photos/a.138353078253952/138351664920760/?type=3>..... 21

Obrázek 3: Pavilon "Hy-Fi" s použitím cihel z mycelia Philipa Rosse. Zdroj:

<https://arquitecturaviva.com/works/the-growing-pavilion-eindhoven-9>..... 21

Obrázek 4: Prostorová konstrukce z nosných prvků mycelia "MycoTree". Zdroj:

<https://parametrichouse.com/wp-content/uploads/2021/02/02-01-202000001.jpg>..... 22

Obrázek 5: Umělá kůže "MuSkin" z mycelia od společnosti "Grado Zero Innovation."

Zdroj:https://cdn.shopify.com/s/files/1/0047/1003/9652/t/19/assets/MELINABUCHER_blog_vegan_leather_guide_muskin.jpg..... 22

Obrázek 6: Modulární akustické panely firmy "Myamo".

Zdroj: https://www.gp-award.com/assets/media/3-myamo_blogLarge.jpg..... 23

Obrázek 7: Obal z MK od společnosti "Ecovative".

Zdroj:<https://www.slashgear.com/img/gallery/ikea-to-use-biodegradable-mushroom-based-foam/intro-import.webp>..... 24

Obrázek 8: Obecný postup při výrobě MK. Zdroj: ⁵⁹..... 27

Obrázek 9: Balení substrátu "Ecovative" do plastových forem. Zdroj: ⁶⁰..... 29

Obrázek 10: Plastové boxy s prorostlým substrátem. Zdroj: Bc. Sereda S. 36

Obrázek 11: Graf závislosti přírůstu mycelia na času v listnatém substrátu.

Zdroj: vlastní. 37

Obrázek 12: Graf závislosti přírůstu mycelia na času v jehličnatém substrátu.

Zdroj: vlastní. 38

Obrázek 13: Vzorky MK po odformování. Zdroj: Bc. Sereda S. 38

Obrázek 14: Zkouška pevnost v tlaku. Zdroj: vlastní 41

Obrázek 15: Graf hodnot objemové hmotnosti. Zdroj: vlastní 43

Obrázek 16: Graf hodnot součinitelů tepelné vodivosti. Zdroj: vlastní 44

Obrázek 17: Graf hodnot nasákavosti. Zdroj: vlastní 45

Obrázek 18: Graf průběhu zkoušky pevnost v tlaku. Zdroj: vlastní 46

Obrázek 19: Graf závislosti napětí při 10 % deformaci na hustotě. Zdroj: vlastní 47

TABULKA 1 : DRUHOVÝ SEZNAM PĚSTOVANÝCH MK.....	37
TABULKA 2 : SEZNAM VARIANT MK PŘIPRAVENÝCH NA ZKOUŠKY.	39
TABULKA 3: PŘEHLED NAMĚŘENÝCH HODNOT PŘI STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI.....	44
TABULKA 4: PŘEHLED HODNOT TEPelnĚIZOLAČNÍCH VLASTNOSTÍ.....	45
TABULKA 5: PŘEHLED HODNOT NASÁKAVOSTI.	46
TABULKA 6: PŘEHLED HODNOT NAPĚTÍ PŘI 10 % DEFORMACI.....	47