

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Diplomová práce

**Výzkum mechanických vlastností polymerních materiálů
na bázi PLA vyrobených aditivní technologií**

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Autor: Bc. Martin Zeman

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Zeman

Inženýrství údržby

Název práce

Výzkum mechanických vlastností polymerních materiálů na bázi PLA vyrobených aditivní technologií

Název anglicky

Research on mechanical properties of polymeric materials based on PLA produced by additive technology

Cíle práce

Cílem diplomové práce je výzkum mechanických vlastností polymerních materiálů vyrobených pomocí 3D tisku technologií FDM. Na základě výsledků výzkumu mechanických vlastností bude možné stanovit užité vlastnosti jednotlivých polymerních materiálů pro praktickou aplikaci např. s důrazem na závěry z nízko cyklové únavy. S rozvojem aditivních technologií je nutné provádět intenzivní výzkum v oblasti vývoje tiskových materiálů, tj. např. zohlednění vlivu plniva, parametry tisku, možnosti recyklace filamentu a testování výsledných mechanických vlastností zohledňujících specifika technologie výroby a aplikační oblasti jejich použití.

Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

3D tisk, filament, mechanické vlastnosti, polymery, testování, trendy

Doporučené zdroje informací

Časopis: Composites Part A, B, Journal of Cleaner Production, Polymers, Materials, Manufacturing Technology, Research in Agricultural Engineering, Journal of Materials Processing Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, International Journal of Fatigue, Wear atd.

Firemní literatura a sborníky z konferencí

HLOUSEK, P.: 3D printing: a prospective challenge for manufacturing: a manufacturing revolution. Saarbrücken: AV Akademikerverlag, 2015.

CHUA, CH. K., LEONG, K. F.: 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 4th edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific, 2015.

IZDEBSKA-PODSIADLY, J., et al.: Polymers for 3D printing: methods, properties, and characteristics. Oxford: Cambridge, MA: William Andrew, 2022.

KLOSKI, L. W., KLOSKI, N.: Getting started with 3D printing: a hands-on guide to the hardware, software, and services behind the new manufacturing revolution. San Francisco: Maker Media, 2016.

KOHLGRÜBER, K. et al.: Plastics compounding and polymer processing: fundamentals, machines, equipment, application technology. Munich: Hanser Publishers, 2022.

MILLS, N. J.: Plastics: microstructure and applications. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2005.

NOORANI, R.: 3D printing: technology, applications, and selection. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.

WIMPENNY, D. I., PANDEY, P. M., KUMAR, L. J.: Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2017.

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2023

Elektronicky schváleno dne 8. 2. 2023

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Děkan

V Praze dne 8. 2. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „**Výzkum mechanických vlastností polymerních materiálů na bázi PLA vyrobených aditivní technologií**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Miroslavovi Müllerovi, Ph.D. za poskytnutí praktických zkušeností, jeho ochotu a pomoc, kterou mi věnoval při psaní této práce. Zároveň chci poděkovat Ing. Petrovi Jirků za pomoc s 3D tiskem a své rodině za podporu a trpělivost.

Výzkum mechanických vlastností polymerních materiálů na bázi PLA vyrobených aditivní technologií

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výzkumem mechanických vlastností vzorků vyrobených z PLA pomocí 3D tisku s využitím technologie FDM. Cílem práce bylo zkoumat vliv různých typů výplní a plniv na mechanické vlastnosti těchto vzorků. Konkrétně bylo provedeno srovnání čistého PLA s materiály obsahujícími bambusové a korkové plnivo, a to ve spojení s běžně používanými typy výplní, jako jsou honeycomb, gyroid a grid. Teoretická část práce se věnuje problematice plastů, metodám jejich zpracování, rozdělení bioplastů a používaným aditivům. Následně je popsána historie a využití aditivního výrobního procesu v různých odvětvích. Jsou zde rovněž detailně popsány jednotlivé kroky procesu 3D tisku a představeny hlavní typy 3D tiskáren, jako je FDM a SLA. Praktická část práce se soustředí na provádění experimentálního výzkumu mechanických vlastností vzorků vyrobených z bioplastu PLA. Zkušební vzorky byly vytvořeny prostřednictvím technologie FDM. Každý vzorek byl tisknut s použitím různých plniv a výplní. Následně byly vzorky váženy a podrobeny mechanickým zkouškám pro stanovení pevnostních charakteristik a tvrdosti. Poté byly vzorky upraveny a podrobeny analýze lomové plochy za pomoci skenovacího elektronového mikroskopu. Na základě naměřených dat bylo možné provést srovnání jednotlivých typů výplní a plniv.

Klíčová slova: 3D tisk, filament, mechanické vlastnosti, polymery, testování, trendy

Research on mechanical properties of polymeric materials based on PLA produced by additive technology

Abstract

The thesis focuses on the research of mechanical properties of samples made of PLA by 3D printing using FDM technology. The objective of this work was to investigate the effect of different types of fillers and infills on the mechanical properties of these specimens. Specifically, a comparison of pure PLA with materials containing bamboo and cork fillers was performed in conjunction with commonly used infills types such as honeycomb, gyroid and grid. The theoretical part of the thesis is devoted to the problem of plastics, methods of their processing, classification of bioplastics and used additives. The history and use of the additive manufacturing process in various industries is then described. It also details the steps of the 3D printing process and introduces the main types of 3D printers such as FDM and SLA. The practical part of this thesis focuses on conducting experimental research on the mechanical properties of samples made from PLA bioplastic. The test samples were created using FDM technology. Each sample was printed using different fillers and infills. Subsequently, the samples were weighed and subjected to mechanical tests to determine strength characteristics and hardness. The samples were then processed and subjected to fracture surface analysis using a scanning electron microscope. On the basis of the measured data, it was possible to compare the different types of fillers and infills.

Keywords: 3D printing, filament, mechanical properties, polymers, testing, trends

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Plasty	2
2.1 Zpracování plastů	4
2.1.1 Vstřikování.....	4
2.1.2 Vytlačování	5
2.1.3 Vakuové tvarování	5
2.2 Bioplasty	6
2.2.1 Kyselina polymléčná.....	10
2.2.2 Polyhydroxyalkanoát	12
2.3 Aditiva.....	14
3 Aditivní technologie	17
3.1.1 Historie 3D tisku	17
3.1.2 Budoucnost aditivní technologie	18
3.1.2.1 Aditivní technologie ve stavebnictví	19
3.1.2.2 Aditivní technologie ve farmaceutické výrobě.....	20
3.1.2.3 Aditivní technologie v kulinářství	21
3.1.2.4 Aditivní technologie v letectví a kosmonautice	22
3.1.3 Princip aditivní technologie	24
3.1.4 FDM tiskárny	28
3.1.4.1 Kartézské tiskárny	29
3.1.4.2 Delta	29
3.1.4.3 Polar.....	29
3.1.4.4 Scara	30
3.1.5 Komponenty FDM tiskáren	30
3.1.6 SLA tiskárny	32
3.1.7 SLS tiskárny.....	34
4 Cíl práce.....	35
5 Metodika	35
5.1 Tvorba zkušebního tělesa.....	36
5.2 Skladování vzorků.....	38
5.3 Vážení vzorků	39
5.4 Zkouška tvrdosti.....	40
5.5 Zkouška tahem	41
5.6 Výzkum lomové plochy pomocí SEM.....	43

6	Výsledky a diskuse	45
6.1	Vyhodnocení vážení vzorků.....	45
6.2	Vyhodnocení zkoušky tvrdosti.....	46
6.2.1	Čisté PLA.....	46
6.2.2	Bambusové plnivo	47
6.2.3	Korkové plnivo	48
6.2.4	Porovnání jednotlivých vzorků	49
6.3	Vyhodnocení zkoušky tahem	50
6.3.1	Pevnost.....	51
6.3.2	Tažnost.....	52
6.3.3	Napětí při lomu	53
6.4	Vyhodnocení analýzy lomové plochy	55
7	Závěr.....	58
8	Seznam použitých zdrojů	61
9	Seznam obrázků	65
10	Seznam tabulek	66
11	Seznam grafů	66
12	Přílohy	67

Seznam zkratek

AM – Aditivní výroba

CO₂ – Oxid uhličitý

FDM – Fused Deposition Modeling

PE – Polyethylen

PET – Polyethylentereftalát

PHA – Polyhydroxyalkanoát

PLA – Kyselina polyléčná

PP – Polypropylen

PS – Polystyren

PVC – Polyvinylchlorid

PHB – Polyhydroxybutyrát

LDPE – Low density polyethylene

HDPE – High density polyethylene

PEI – Polyéterimid

SLA – Stereolitografie

UV – Ultrafialové záření

CAD – Computer-aided design

DLP – Digital Light Procesing

MSLA – Masked Stereolithography

LCD – Liquid crystal display

SLS – Selective Laser Sintering

STL – Standard Triangle Language

SEM – Skenovací elektronový mikroskop

1 Úvod

Dosažení současné kvality života po celém světě bylo velkou měrou umožněno výrobou plastů. V současnosti jsou plasty vytvářeny buď jako syntetické nebo polysyntetické, eventuálně z přírodních materiálů, které obsahují organické makromolekulární sloučeniny. Většina polymerů je založena na uhlovodíkových sloučeninách a jejich výroba zahrnuje použití ropy, uhlí, a také přírodních látek jako jsou škroby.

Obrovská variabilita vlastností plastů přináší možnost jejich různého využití. Díky tomu je na výrobce vyvíjen tlak, aby neustále objevovali šetrnější postupy vůči životnímu prostředí. Tento tlak by měl být zodpovězen prostřednictvím tzv. udržitelných technologií, které mají za cíl snížit zatížení životního prostředí, aniž by docházelo k zastavení nebo zpomalení vývoje lidské společnosti. (Zeman 2018)

Jedním z možných řešení je přechod z plastů pocházejících z ropy na plasty, které mají základ v přírodních látkách. Biomasa sloužící k výrobě bioplastů musí být ekologicky udržitelná a pocházet z takových zdrojů, které nepoškozují životní prostředí. Výrobci by měli dávat přednost využití organického odpadu a vedlejších produktů. Taktéž by se měli vyhýbat používání obecných termínů jako „bioplasty“ a místo toho uvádět konkrétní procento biologického obsahu ve výrobku. Tímto způsobem se zajišťuje transparentnost a umožňuje spotřebitelům lepší pochopení složení produktu.

Další možností je využití aditivních technologií jako je 3D tisk. Ten představuje v současné době významný inovační krok v různých průmyslových odvětvích. Oproti tradičním metodám má několik výhod. Jedna z těchto výhod spočívá ve vytváření komplexních geometrických tvarů. Další výhodou je schopnost tisknout s různými materiály, včetně plastů, kovů a keramiky. Technologie také minimalizuje množství odpadu. Je snadno použitelná i pro personalizaci výrobků v malých sériích. Z těchto důvodů je 3D tisk považován za klíčový prvek čtvrté průmyslové revoluce, která spočívá v inteligentní automatizaci a v chytrých továrnách. (Romani 2023)

2 Plasty

Plast je v dnešní době využíván k velkému množství aplikací a je klíčovým materiálem v naší ekonomice. Jeho rozmanité vlastnosti přispívají k řešení mnoha problémů, jimž naše společnost čelí. V automobilovém a leteckém průmyslu jsou schopny například inovativní a lehké materiály snižovat nejen spotřebu paliva, ale také emise CO₂. Efektivní izolační materiály přispívají k úspoře energie a snižují tím náklady na energii. Plasty v obalech zajišťují bezpečnost potravin a redukují plýtvání potravinami. Spolu s technologií 3D tisku mohou biokompaktibilní plastové materiály zachraňovat lidské životy prostřednictvím inovací v oblasti lékařství. (Evropská komise 2018)

Plasty mají významné uplatnění v široké škále odvětví díky své odolnosti, lehkosti a formovatelnosti. Avšak časté využívání plastů v obalech a jednorázových produktech přispívá k problémům s odpadem. Plasty jsou preferovány pro svou stabilitu při různých teplotách a rozmanitosti aplikací, jako je polyethylen pro balicí fólie a polypropylen pro lahve. Ve stavebnictví jsou plastové materiály oblíbené pro svou dlouhou životnost a odolnost vůči povětrnostním podmínkám a plísní, přičemž PVC patří mezi nejčastěji využívané plasty. V oblasti dopravy jsou plasty nezbytné pro svou lehkost, odolnost, a možnost recyklace, a proto se využívají ve vozidlech, leteckých a lodních prostředcích. V kosmonautice jsou plastové materiály preferovány pro svou schopnost odolat extrémním podmínkám. Nicméně, s rostoucí poptávkou po plastech se zvyšují výzvy v oblasti zpracování plastového odpadu, což vyžaduje zdokonalení recyklace a odpadového hospodářství. (Heinrich-Böll-Stiftung 2020)

Značnou část plastového odpadu tvoří odpad z produkce a zpracování plastů, plastové obaly používané k balení a skladování výrobků, plastové odpadky generované ve stavebnictví až po plastový odpad z oblasti zdravotnictví. Kategorie odpadů primárně generovaných v průmyslovém a komerčním sektoru má známé složení a jednoduchou klasifikaci, což zvyšuje potenciál pro jejich recyklaci, který je již využíván. Nicméně, recyklace plastových odpadů z oblasti zdravotnictví je s ohledem na současné technologické postupy neuskutečnitelná.

Primárním úkolem je optimalizace separace použitelných plastů. Největším potenciálem pro rozvoj se nachází zejména v oblastech domácností, kde lze díky systému sběru odpadu přímo z domu dosáhnout téměř stoprocentního oddělení plastů.

Další výzvou je podpora poptávky po výrobcích obsahující recyklované materiály. Nové evropské předpisy stanoví povinné množství recyklátu v nápojových lahvích a plánuje se rozšíření této praxe i na další plastové výrobky. Zájem o tyto produkty lze podnítit i ze strany spotřebitelů, kteří se aktivně starají o životní prostředí a dobrovolně preferují výrobky z recyklovaných materiálů.

Inovace v technologiích zpracování odpadů a jejich recyklace jsou klíčem k výrobě recyklovaných materiálů s vyšší kvalitou, které nepoškozují kvalitu finálních výrobků. Tento proces zahrnuje zejména zvýšenou automatizaci s cílem dosažení vysoké kvality separace plastů na třídících linkách, stejně jako inovace v technologiích a recepturách pro recyklaci.

Recyklace plastového odpadu v České republice je v celku na dobré úrovni. Během recyklace vytříděných plastových odpadů z tříděného sběru je úspěšně recyklována široká škála PET lahví, a to nejen z nápojů, ale i z mléka, olejů a dalších produktů. Následujícím materiálem, který je úspěšně recyklován, jsou průhledné LDPE fólie. Další významným segmentem jsou tvrdé plasty, zahrnující zejména HDPE obaly, jako jsou obaly od drogerie. Obtíže jsou s tříděním a recyklací barevných fólií z PP a PS kvůli obtížnosti rozpoznání těchto materiálů na ručních třídících linkách, kterých je v ČR přibližně 120.

Problém by mohli vyřešit automatizované linky používající technologie blízké infračervenému záření. V České republice byly vybudovány tři nové pokročilé třídící linky, které jsou schopny separace plastů podle polymerů pomocí technologie NIR INFRARED. Tyto technologie zajistily vysoký standart kvality vyráběných sekundárních surovin, určených k další recyklaci. (Replastuj 2023)

2.1 Zpracování plastů

Vzhledem k neustále se zvyšující poptávce po plastech, mají výrobci snahu přicházet s dalšími metodami, jak produkovat plastové produkty s vysokou kvalitou a co nejefektivnějším způsobem. Výrobci mají na výběr velké množství metod, jak zpracovávat plasty na produkty, které budou splňovat jejich požadavky. Tudiž hledání optimální technologie může být časově náročné. (Chandankar 2023)

2.1.1 Vstřikování

Mezi nejvyužívanější výrobní procesy ke zpracování plastů patří vstřikování. Metoda vychází z technologie tlakového lití, avšak využívá zcela rozdílných teplot a tokových charakteristik taveniny. Výrobky z této metody mohou být ve finálním stavu nebo jsou součástí většího celku, do kterého jsou posléze zkompletovány. Vstřikované součásti se vyznačují velkou variabilitou vzhledem k jejich tvaru, rozměrům a hmotnosti.

Technologie vstřikování nabízí výrobky s vysokou přesností rozměrů a tvarů, opakovatelnosti procesu v sériové výrobě, možnost získat konečný díl v jednom cyklu, vynikající jakost povrchu a vysoká rychlost výroby. Zároveň u vstřikování se téměř nevytváří odpad, protože všechny přebytečný materiál je možné využít v dalších sériích. To přispívá ke snížení nákladů na materiál a zároveň omezuje negativní vliv na životní prostředí. (Běhálek et.al. 2019)

Metoda vstřikování požaduje velké prvotní náklady na stroje a jejich vybavení, tudíž to není úplně vhodné pro kusovou výrobu. Optimální využití je pro malé a středně objemné součásti. Naprogramování a prvotní nastavení strojů může být komplikované, časově obtížné a často je zapotřebí proškolená obsluha. Přestože vstřikování je schopno produkovat vysoce jakostní součásti, tak vady, jako deformace či dutiny mohou nastat vždy. (Chandankar 2023)

2.1.2 Vytlačování

Druhou nejvyužívanější technologií na zpracování plastů je vytlačování. Metoda produkuje polotovary ve formě desek, trubek, fólií a profilů, které se dále zpracovávají různými technologiemi, například lepení, tvarování a svařování. Principem vytlačování je nahřátí plastu do kapalného stavu a protlačení taveniny přes formu odpovídající požadovanému tvaru. Následuje ochlazení vodou nebo vzduchem. (Běhálek et.al. 2019)

Vyfukování představuje efektivní metodu, která je schopna sériové výroby plastových součástí s malými náklady na jeden výrobek. Výrobci mohou díky vyfukování dosahovat složitých tvarů a designů, které jsou pro jiné metody velmi obtížně dosažitelné. Metoda zaručuje konzistentní kvalitu součástí, a je schopna přesné výroby tvaru a velikosti. Součásti jsou extrémně odolné vůči opotřebení, což je činí vhodnými k využití v drsných prostředích. Dále jsou velmi lehké, což zjednodušuje jejich přepravu a manipulaci. Díky tomu jsou nižší náklady na dopravu a skladování.

Nevýhodou metody je možnost využití omezeného množství materiálu, jako je PE, PP a PVC. Výrobky vyrobené vyfukováním mají omezení na velikost tloušťky stěn, což je problém pro využití na místech, kde je zapotřebí robustnější konstrukce. Zároveň vyšší náklady na výrobu forem dělají tuto metodu méně využitelnou pro kusové výroby. (Chandankar 2023)

2.1.3 Vakuové tvarování

V rámci tvarování je nejvíce využíváno vakuového tvarování. Touto metodou se formují tenké fólie a desky z termoplastu. Nejdříve je zapotřebí nahřát plast do kaučkovitého stavu, kdy se dá materiál dobře tvářit. Poté je z formy odveden vzduch soustavou kanálků umístěných ve formě k dosažení podtlaku. Vakuové tvarování se dělí podle druhu tváření na pozitivní a negativní. Pozitivní je tváření na tvárník a negativní do dutiny. (Hluchý 2001)

Výrobci používají pevnější materiály na výrobu krabic, kelímků, plastových obalů a víček. K tomuto zpracování je zapotřebí tepelně tvarovatelných plastů, jelikož materiál musí být schopen změknutí a následně po ochlazení znovu ztuhnout.

Vakuové tvarování je velmi ekonomicky výhodné ve srovnání s ostatními metodami a lze jej realizovat pomocí jednoduchého vybavení. Tepelné formování je vhodné na různé modely a prototypy. Tento postup je rovněž bezpečný, neboť nezahrnuje žádné nebezpečné chemikálie ani vysoké teploty. Výrobní proces, může být ekologicky šetrný, jelikož spotřebovává méně materiálu a produkuje menší množství odpadu v porovnání s ostatními metodami.

Nicméně, je určena k produkci jednoduchých tvarů, jelikož po zchladnutí se materiál srazí, což není vhodné pro přesné aplikace. Je rovněž zapotřebí použít poměrně tenký plastový materiál, i když mnoho listů může být spojeno laminací, aby se dosáhlo pevnějšího výrobku. Vakuové tvarování je proces výroby, která je obvykle pomalejší než jiné metody, kupříkladu vstříkovaní (Williams 2018)

2.2 Bioplasty

Bioplasty nejsou omezeny na jediný materiál, ale představují rozsáhlou rodinu materiálů s různými charakteristikami a použitím. Materiál se stává bioplastem, když splňuje alespoň jednu z těchto tří charakteristik: je na bázi biologických surovin, je biologicky odbouratelný nebo je kombinací obou těchto vlastností. (Bioplastics Europe 2022)

Bio-based je označení pro materiál nebo výrobek, který je přinejmenším z části odvozen z biomasy, což jsou materiály pocházející z rostlin. Bioplasty mohou být vyráběny buď z první generace biologických surovin, jako jsou kukuřice a řepka, nebo z druhé generace biologických surovin, což zahrnuje organické zbytky a odpad, jako jsou zemědělské zbytky, použité rostlinné oleje, hnůj atd. Pro stanovení biologického obsahu se obvykle používá metoda hmotnostní bilance, kde se určuje podíl biologických surovin v materiálu na základě hmotnosti vstupních surovin. (Plastic Europe 2023)

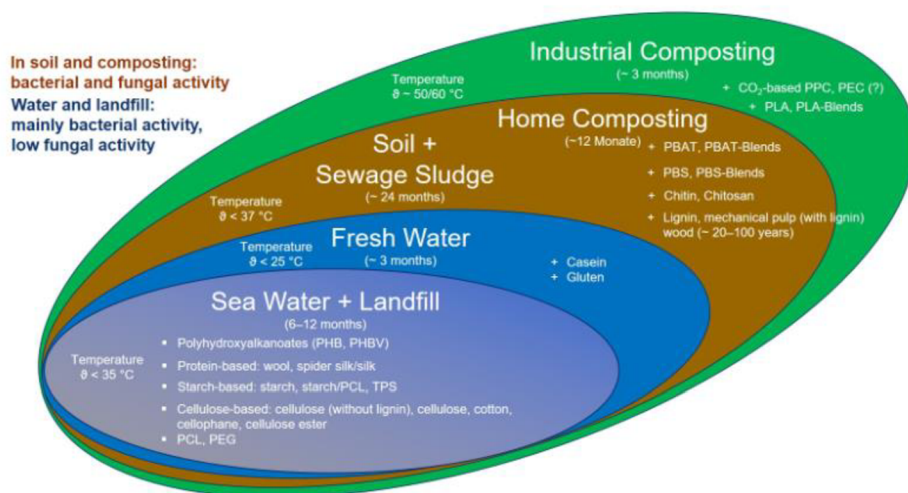
Biologicky odbouratelné materiály jsou schopny být transformovány různými přírodními organismy na přírodní látky, jako je oxid uhličitý, kompost a voda. Většinou probíhá tento proces mikrobiologickou biodegradací, která závisí na podmínkách pro mikroorganismy v půdě a vodě. Důležitým faktorem je také přítomnost nebo nepřítomnost kyslíku. Biologická rozkladatelnost není ovlivněna surovinovou bází, ale spíše jeho chemickou strukturou, jelikož existují plasty vyrobené z biologických surovin, které nejsou schopny biologického rozkladu. Na druhou stranu, některé plasty vyrobené z fosilních paliv mohou být za určitých podmínek prostředí biologicky rozloženy. Také biologická odbouratelnost nezahrnuje specifický časový rámec nebo konkrétní podmínky nutné k přirozené degradaci materiálu. (Bioplastics Europe 2020)

Důležitou věcí je jasné a přesné rozlišení mezi certifikovanými kompostovatelnými a ekologicky rozložitelnými plasty. Ekologicky rozložitelné plasty jsou biodegradovány mikroorganismy ve specifických prostředí, jako je zemědělská půda nebo sladká voda. Kompostovatelné jsou schopny rozkladu pouze v průmyslových kompostárnách. Standardizace má klíčovou roli při ověřování tvrzení o biologické rozložitelnosti a vyžaduje jednotné požadavky na postupy průmyslového kompostování, testování a certifikace. Tyto normy pomáhají vytvářet jednotná pravidla a postupy pro identifikaci a zpracování bioplastů. Tím se usnadňuje třídění a recyklace materiálu, což má pozitivní dopad na životní prostředí a snižuje množství odpadu na skládkách. (Plastic Europe 2023)

Biologická degradace biopolymerů závisí na řadě faktorů, včetně fyzikálně-chemických podmínek a aktivity mikroorganismů v daném prostředí. Klíčový vliv na degradaci má také samotná materiálová struktura plastové součásti.

Nejvýhodnější podmínky pro degradaci se vyskytují v prostředí kompostování. S velkou mikrobiální diverzitou a vysokou aktivitou, zejména při dostatku kyslíku, kompostování poskytuje ideální podmínky pro biologickou rozložitelnost plastových materiálů. Podobně v domácích i průmyslových kompostárnách se zachovává vysoká aktivita mikroorganismů, podporována dobrou dostupností kyslíku a zvyšujících se teplot. V domácích kompostech je složitější udržování ideálních podmínek, jako je například regulace teploty, což může způsobit prodloužení doby rozkladu.

V půdě jsou stále přítomny četné mikroorganismy, ale teplotní podmínky mohou být ovlivněny regionálními výkyvy. Vodní prostředí, jako je sladká i mořská voda, vykazují nižší biologickou aktivitu kvůli zředění, které voda poskytuje. Obr. 1 shrnuje přehled biologické rozložitelnosti biopolymerů v různých prostředích. (Kliem Silvia 2020)



Obr. 1 Biologická degradace různých polymerů v různých prostředích – Kliem Silvia 2020

V současné době jsou dostupné čtyři hlavní varianty plastů (Obr.2). Na prvním místě se nacházejí tradiční plasty vytvořené z fosilních surovin, které mají omezenou schopnost biodegradace v přírodě. Jejich předností je snadná manipulace, dlouhá životnost a obecně efektivní recyklovatelnost. Jedním z nedostatků tradičních plastů je uhlíková stopa, dlouhá dekompoziční doba, závislost na fosilních surovinách a nepříznivé dopady na ekosystémy či organismy. Následující tři skupiny se již počítají mezi bioplasty, a to bez ohledu na to, zda jsou vytvořeny jak z ropných, tak biologických zdrojů. V pořadí druhý typ stále využívá fosilní zdroje, avšak již je klasifikován jako bioplast.

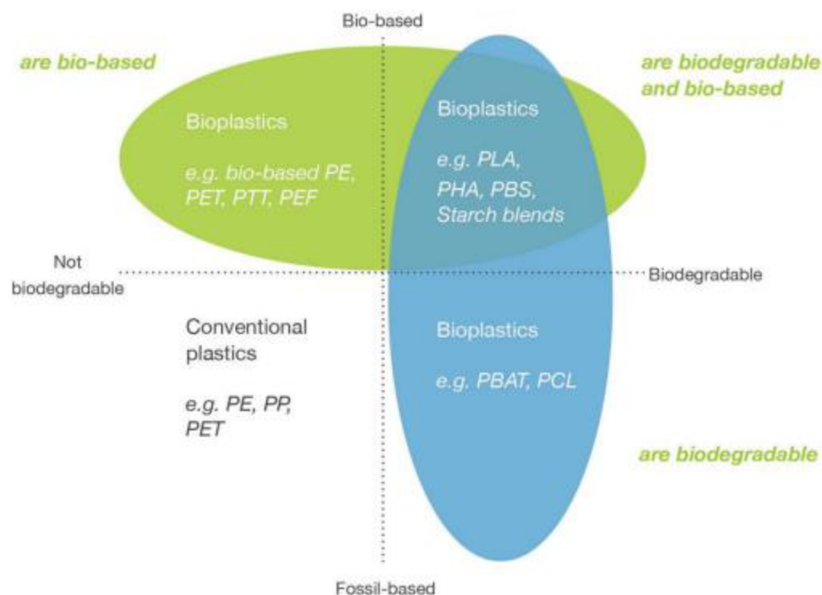
Druhá kategorie plastů pořád využívá fosilní suroviny, ale zde se uplatňuje proces výběru a úpravy vhodných molekul, čímž je dosažena biodegradabilita, a proto se řadí mezi bioplasty. Mezi jeho zástupce patří polykaprolakton a Polybutylene terephthalate.

Třetí kategorie představují plasty, které vznikají na základě přírodních materiálů. Těmto materiálům je dána schopnost vytvářet identické molekuly, jako ty, které jsou přítomny v ropě, což zajišťuje podobné vlastnosti a umožňuje snadnou zpracovatelnost a recyklaci. Přesto, co se týká rozkladu, plasty z této kategorie se nacházejí na stejné úrovni

jako plastové výrobky vyrobené z fosilních surovin. V současné době se tento typ plastů často uplatňuje v obalovém průmyslu jako náhrada za tradiční materiály PE a PET.

Poslední kategorii tvoří plasty, které zahrnují biosložku, což znamená, že obsahují uhlík z atmosféry, který byl původně spotřebován rostlinami. Díky pokročilým technologiím je tento uhlík transformován do surovin, ze kterých mohou být vytvořeny ekologicky šetrné materiály. Tento typ bioplastu je biodegradovatelný a je založen na biologické bázi. Tyto materiály se vyrábí buď syntetickou cestou, kupříkladu PLA, nebo jsou produkovány bakteriemi, které tvoří materiály jako PHA. (No Greenwashing 2021)

Výroba bioplastů první generace, které využívají jedlé suroviny jako kukuřice, cukrovou třtinu nebo brambory, je spojena s velkým množstvím surovin. Například k produkci jedné tuny bioplastu první generace je nutné spotřebovat osmnáct tun brambor. Tento přístup nelze v dnešní době považovat za udržitelné řešení, jelikož vyžaduje velké množství vody a orné půdy, které máme s neustále rostoucí populací stále větší nedostatek.



Obr. 2 Druhy plastů – Plastic Europe 2022

Je tedy stále důležitější hledat a vyvíjet udržitelnější způsoby výroby plastů, které by minimalizovaly zátěž na životní prostředí a přispěly k efektivnímu využití dostupných zdrojů. To může zahrnovat vývoje druhé a třetí generace bioplastů, které využívají suroviny,

jako jsou dřevo, řasy nebo odpadní biomasa. Tyto alternativní zdroje mohou přinést udržitelnější možnosti pro výrobu plastů a pomoci snížit tlak na zemědělské zdroje. (Heinrich-Böll-Stiftung 2020)

Bioplasty druhé generace, vyráběné z odpadů, mohou skutečně představovat udržitelnější alternativu. Technologie jako HYDAL, která průmyslově zpracovává a recykluje použitý filtrovací olej a přeměňuje ho na biopolymer typu PHB, mohou představovat inovativní způsob výroby bioplastů. Tento proces umožňuje přeměnu odpadu na cennou surovinu pro výrobu bioplastů nebo na přírodně rozložitelný mikroplast. Takové technologie mají potenciál snižovat závislost na nových surovinách a zároveň redukovat množství odpadu. (Svaz moderní energetiky 2018)

2.2.1 Kyselina polylactonová

Kyselina polylactonová se vyrábí z kukuřičného škrobu, cukrové řepy nebo třtiny. Proces zahrnuje fermentaci těchto surovin, během níž vznikají monomery kyseliny mléčné. Tyto monomery jsou následně spojeny do polymerní struktury, vytvářející samotnou kyselinu polylactonovou. Tento materiál je známý svou biodegradabilitou a je často používán jako alternativa k tradičním plastům, vyrobených z fosilních surovin. (RADIUS 2020)

Během výrobního procesu PLA se často přidávají změkčovadla ke zlepšení jeho zpracovatelnosti a obecných vlastností. Kvůli vyšší ceně PLA ve srovnání s ostatními polymery na ropné bázi bývá také smíchán s jinými polymery. Přidáním různých přísad lze ovlivnit nejen cenu, ale i mechanické a tepelné vlastnosti PLA.

Ačkoliv je PLA kompostovatelný, je důležité zdůraznit, že degradace závisí na různých faktorech, včetně vlastností materiálu samotného a podmínek v okolí, jako jsou vlhkost, mikrobiální prostředí a teplota. PLA našlo uplatnění v mnoha odvětvích, včetně vstřikování plastů, tváření za tepla, vytlačování a technologie 3D tisku. Nedávno byl materiál na bázi kyseliny mléčné využit k výrobě opakovaně použitelných masek proti COVID-19, což demonstrovalo jeho širokou paletu využití. Jeho výrobní proces je zobrazen na obr.3. (Teixeira et.al 2021)

PLA má dobré mechanické vlastnosti, které jsou námětem výzkumu v oblasti polymerních materiálů. Vysoká pevnost v tahu a Youngův modul u PLA představují významné přednosti, což jej činí vhodným pro různé aplikace v oblasti obalů a průmyslových materiálů. Pevnost v ohybu PLA je také dobrá a v některých případech překračuje hodnoty jiných polymerních materiálů, jako jsou PS, PP a PE.

Je však nutné zdůraznit, že i přes tyto pozitivní vlastnosti je PLA omezen svou křehkostí, vyjádřenou méně než 10% prodloužení při přetržení a nízkou houževnatostí. Tato charakteristika vytváří omezení v použití PLA v aplikacích, které vyžadují plastickou deformaci při vysokých namáháních. Navíc, i když jsou pevnost v tahu a modul pružnosti PLA srovnatelné s PET, vykazuje PLA vyšší křehkost, což je důležité brát v úvahu při navrhování materiálu pro specifické aplikace, např. šrouby, dlahy na fixaci zlomeniny a v oblasti obalů, kde se očekává vysoká flexibilita a odolnost. (Murariu 2016)

Dále zpracovatelnost PLA se ukazuje jako výjimečná ve srovnání s dalšími biopolymery, například PHA. PLA exceluje v tepelné zpracovatelnosti, což znamená, že se lépe zpracovává za vyšších teplot, což může poskytnout výhodu v průmyslových procesech.

Významným faktorem je také úspora energie při výrobě PLA. Oproti polymerům na bázi ropy vyžaduje PLA k výrobě zhruba o 25-55% méně energie. Odhady ukazují, že v budoucnu by tato úspora energie mohla být dokonce snížena na méně než 10%. Nižší energetická spotřeba nejen přináší environmentální výhody, ale také může znamenat nižší náklady při výrobě PLA, což posiluje jeho pozici v oblasti náhrady tradičních plastů. (Rasal 2010)

PLA se v široké míře využívá k balení suchých potravin a produktů náchylných k rychlé zkáze, například ovoce a zeleniny. Používání PLA jako obalového materiálu přináší několik výhod. Jeho kompostovatelnost v průmyslových podmínkách znamená, že lze efektivně recyklovat ve speciálních kompostárnách. Tato vlastnost spolu s tím, že PLA je vyráběn z obnovitelných zdrojů, činí tento materiál šetrný k životnímu prostředí.

Díky biokompatibilitě a recyklovatelnosti může PLA poskytovat udržitelnější alternativu ke konvenčním plastovým materiálům. V neposlední řadě má PLA potenciál nahradit tradiční plastové obaly, což je důležité v kontextu snah o snížení environmentálních odpadů a přechod k udržitelnějším obalovým materiálům. (Nilsen-Nygaard et.al 2021)

V případě úspěšné implementace PLA ve spotřebitelských a biomedicínských aplikacích jsou klíčové nejen mechanické vlastnosti, které jsou buď lepší nebo srovnatelné s konvenčními plasty, ale také řízené vlastnosti povrchu, jako je hydrofilita, drsnost a reaktivní funkce. Modifikace PLA byla rozsáhle prováděna, především za účelem zlepšení houževnatosti a rychlosti degradace. Byly provedeny experimenty na modifikaci povrchu PLA s cílem ovlivnit hydrofilitu, drsnost a přidání reaktivních skupin. Zlepšení houževnatosti je klíčovým požadavkem pro mnoho spotřebitelských aplikací, zatímco vylepšení hydrofility a přidáním reaktivních skupin jsou prospěšné pro biomedicínské aplikace. Rovněž zrychlení rychlosti degradace by mohlo být důležité jak ve spotřebitelských, tak biomedicínských aplikacích. (Rasal 2010)

2.2.2 Polyhydroxyalkanoát

Polyhydroxyalkanoáty představují lineární termoplastické polymery, vytvářené mnoha mikroorganismy jako intracelulární zásoby uhlíku a energie. Tato skupina bioplastů patří mezi všestranné bio polyesterové polymery s více než 150 různými monomerními druhy. I když je průmyslová výroba PHA vzácná a často nahrazena komerčně dostupnějším polyhydroxybutyrátem, tyto polymery nabízejí různorodé vlastnosti podle svého chemického složení. (Nilsen-Nygaard et.al 2021)

V dnešní době bylo úspěšně dosaženo ovládnutí velikosti částic PHA vědci, což umožňuje přípravu mikro a nanočástic různých rozměrů. PHA může být produkováno mnoha způsoby, jako polymerace monomerů, membránová emulgace, odpařování rozpouštědla, mikrofluidní technologie, ultrazvukové emulgace a sušení rozprašováním. (Jiaxuan Liu 2023)

PHA jsou obvykle odolné vůči hydrolytické degradaci, nerozpustné ve vodě, a projevují dobrou odolnost vůči ultrafialovému záření, ale mají menší odolnost vůči

kyselinám a zásadám. Jsou rozpustné v chloroformu a dalších chlorovaných a netoxických uhlovodících. S vlastnostmi podobnými konvenčním potravinářským obalovým materiálům, jako jsou PE, PP nebo PET, jsou PHA vhodné pro různé aplikace v potravinářském průmyslu.

Díky své hydrofobnosti projevují PHA vynikající bariérové vlastnosti vůči kyslíku, vodě, vodní páře a CO₂. PHA je zpracovatelné různými metodami, včetně vstřikováním a vyfukováním, což umožňuje jejich využití v široké škále aplikací, jako jsou obaly, lisované výrobky, nátěry papíru, lepidla, filmy a další. (Nilsen-Nygaard et.al 2021)

PHA představují biologicky odbouratelné polyestery. Tyto polymery jsou syntetizovány širokou škálou bakteriálních kmenů. Výroba PHA probíhá v prostředí s omezenými živinami a dostatkem uhlíkových zdrojů, které mohou zahrnovat škrob, glukózu, celulózu, sacharózu a další.

PHA mají několik výhod, které je činí vhodnými pro širokou škálu aplikací, zejména v oblasti lékařských a biologických odvětví. Jsou obvykle nealergické, nepyrogenní, nehemolytické a nekarcinogenní, což je činí vhodnými pro regenerativní medicínu. Jejich rozsáhlé využití v různých průmyslových odvětvích, jako je výroba biopaliv, balení potravin a další, vytváří základy pro jejich použití v oblasti tkáňového inženýrství. (Žur-Pińska 2023)

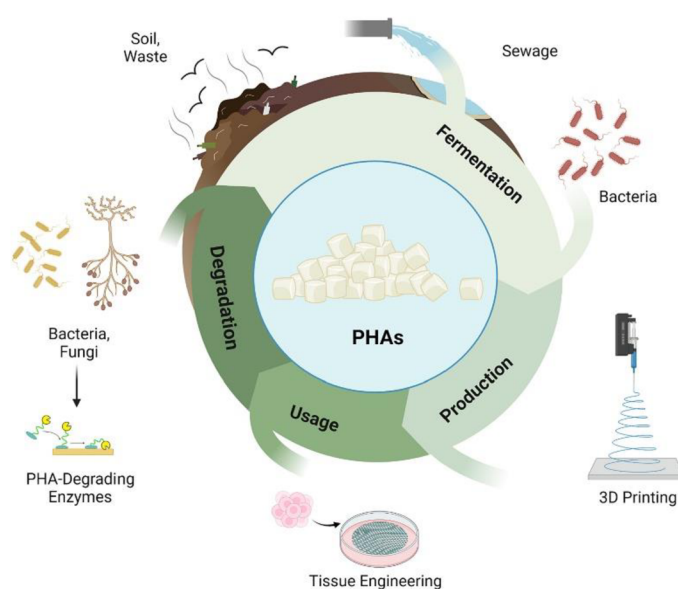
Kromě svých biologických vlastností mají PHA vynikající fyzikálně-chemické charakteristiky, což zahrnuje vysokou pevnost v tahu, odolnost vůči UV záření, poréznost, piezoelektrické vlastnosti, termoplasticitu a relativně pružný povrch. Tyto vlastnosti činí PHA vynikajícím materiálem pro moderní zpracovatelské techniky, zejména 3D tisk.

S rychlým vývojem 3D tisku a jeho nárůstem využití v technickém inženýrství a regenerativní medicíně je nutné nalézt vhodné biomateriály, které jsou vhodné pro tuto specifickou metodu výroby. PHA nabízí atraktivní vlastnosti pro 3D tisk, což zahrnuje schopnost tvořit složité struktury s vysokou přesností a reprodukovatelností.

Vzhledem k pevnosti v tahu, termoplasticitě a poréznosti lze PHA využít pro vytváření biokompaktibilních a bioresorbovatelných struktur, které lze přizpůsobit

specifickým požadavkům pro různé inženýrské a lékařské aplikace. Tímto způsobem se PHA stávají perspektivními materiály v oblasti 3D tisku biomateriálů pro pokročilé inženýrství tkání a vývoj regenerativních léčebných metod.

Zavádění udržitelnosti do odvětví tisku odpovídá plánu harmonického soužití lidí s přírodou, protože moderní tiskové techniky vedou ke snížení odpadu a materiálu potřebného pro produkci, což je ekologicky šetrné. Kromě toho využívání kompostovatelných polymerů v aditivní produkci má za následek nižší produkci těkavých vedlejších produktů a škodlivin než syntetické polymery z ropného základu. To snižuje objem produkovaného odpadu a zjednodušuje systém likvidace odpadu, zejména pokud jde o kompostovatelné polymery. Udržitelnost 3D tisku PHA pro tkáňové inženýrství je ilustrována na obr.3. (Žur-Piňska 2023)



Obr. 3 Cyklus zpracování PHA ukazující udržitelnost přístupu (Žur-Piňska 2023)

2.3 Aditiva

Aditiva jsou v oblasti plastů využívána ke zlepšení jejich vlastností podle specifických požadavků v různých odvětvích. Celkově existuje tisíce plastových aditiv, která mohou přijít do kontaktu s koncovým uživatelem. K posílení plastových produktů používají výrobci látky, jako je bisfenol. Pro dosažení určité pružnosti a měkkosti plastu se mohou využívat změkčovadla, například ftaláty. Některé z těchto látek mohou být zdraví škodlivé a byly zjištěny v lidské krvi. (Plastic Soup Foundation 2019)

Změkčovadla, řadící se mezi organické kapaliny, podléhající termickému rozkladu při vysokých teplotách. Ve výrobním procesu jsou využívána ke zkvalitnění zpracovatelnosti materiálu, zvýšení rázové houževnatosti a ohebnosti, snížení viskozity plastů. (Běhálek et. al 2019) Změkčování polymerů pomocí změkčovadel zvyšuje jejich vnitřní pohyblivost, což má vliv na jejich teplotu a tuhost zesklenní. (Ducháček 2006)

Stabilizátory jsou v plastech používány k prodloužení životnosti výrobku a k minimalizaci degradačních procesů způsobených světlem a teplem. Tepelné stabilizátory se uplatňují zejména k posílení tepelné rezistence plastu při jeho zpracování. Světelné stabilizátory jsou navrženy především pro ochranu proti slunečnímu záření, zahrnující zejména UV záření. Pro ochranu proti němu se využívají dvě hlavní skupiny stabilizátorů. První skupina zabraňuje průchodu jakéhokoli UV záření, zatímco druhá skupina je schopna transformovat UV záření na teplo nebo na záření s odlišnou vlnovou délkou, které není pro plasty nijak škodlivé. (Běhálek et.al 2019)

Antioxidanty jsou používány k prevenci oxidačního stárnutí, způsobeného působením atmosférického kyslíku. Za běžných teplot se oxidační stárnutí projevuje až po deseti letech. Nicméně, při vystavení zvýšené teplotě dochází k zřetelnému urychlení degradačního procesu, a této jevové situaci přisuzujeme označení tepelně-oxidační stárnutí. Klíčová ochrana spočívá zejména v potlačení řetězové reakce oxidace. (Ducháček 2006)

Nadouvadla jsou materiály, které se v polymerovém zpracování používají k produkci lehčích hmot. Při dosažení teploty odpovídající té, při níž je zpracován samotný polymer, dochází k rozkládání a uvolňování plynu těchto složek. Plyny, které se uvolní, mají za následek tvorbu uzavřených, otevřených nebo navzájem propojené pórů. Tímto způsobem nadouvadla přispívají k tepelně-izolačním vlastnostem výrobku. (Běhálek 2015)

Maziva jsou v plastech využívána k vylepšení tekutosti taveniny během procesu výroby a ulehčení vyjmutí produktu z formy. Většina maziv plní tyto obě funkce zároveň, přičemž efektivita závisí na schopnosti polymeru rozpouštět mazivo. Složky, které se snadno rozpouštějí v polymeru, snižují viskozitu taveniny a usnadňují zpracování. Avšak maziva s nižší rozpustností v polymeru tvoří vrstvu na povrchu výrobku, což usnadňuje vyndávání

výrobku z formy. Tyto látky mohou rovněž zlepšovat tepelnou a světelnou stabilitu, odolnost proti povětrnosti a vzhled povrchu. (Běhálek et.al 2019)

Antistatika se používají u plastů, kde je nutné zabránit tvorbě elektrostatického náboje. Při odvíjení fólií například může vzniknout elektrostatický náboj, který způsobuje elektrostatické šoky a výboje, což může představovat riziko požáru. Tyto složky rovněž navyšují elektrickou vodivost plastů. Látky mohou zahrnovat vedle uhlíku a kyslíku také síru, fosfor a dusík. (Ducháček 2006)

Retardéry hoření jsou látky, které slouží k omezení hořlavosti plastů. Nacházejí uplatnění zejména v elektronických a izolačních materiálech. Tyto látky se přidávají do plastů za účelem snížit zápalnost, maximální rychlost uvolňování tepla a celkovou účinnost hoření. Avšak ne všechny retardéry hoření jsou šetrné k životnímu prostředí, jelikož mohou být toxické, a obtížně se rozkládají. Nedávná omezení, která byla uvalena na alogenní zpomalovače hoření vyústila ve vznik udržitelných alternativ. Udržitelné zpomalovače se produkují z materiálů například prášku z lastur ústřic, odpadu z biomas jako vaječné skořápky a rýžové slupky. (Rhoda et.al. 2022)

Barviva a pigmenty jsou používány k získání určitého odstínu a barvy. Tyto látky mohou být buď anorganického nebo organického původu. Rozdílem mezi anorganickými a organickými barvivy je ten, že organické mají schopnost se rozpustit v polymeru. Ke změně barvy je možné využít přes 200 pigmentů, které pocházejí z obou uvedených zdrojů. (Běhálek 2015)

Plniva se do plastů přidávají za účelem vylepšení chemických a mechanických vlastností, která jsou rozdělována na vyztužující a nevyztužující vzhledem k jejich vlivu na mechanické charakteristiky. Nevyztužující plniva se do plastů primárně integrují s cílem snížit náklady, přičemž nemají výrazný vliv na jejich mechanické vlastnosti. Naopak, vyztužující plniva se do polymerů začleňují především pro posílení pevnosti, tvarové stálosti polymerů a tuhosti. (Lenfeld 2005)

3 Aditivní technologie

Aditivní technologie, často označovaná také jako 3D tisk, byla původně nazývána metodou rychlých prototypových výrobků. AM technologie našla využití v různých průmyslových odvětvích, kde sloužila k rychlé výrobě prvotních modelů (Obr. 4). Tyto modely mohly být prezentovány a testovány během předvývojové fáze pro konečný výrobek. 3D tisk se nachází v čele dnešní průmyslové revoluce a dovoluje výrobu komplikovaných tvarů pomocí velkého rozsahu materiálů, a to bez potřeby rozměrných výrobních zařízení. (Gibson 2015)



Obr. 4 Vytisknutý model v 3D tisku (Kloski 2021)

3.1.1 Historie 3D tisku

Historie 3D tisku se začala psát na konci 80. let 20. století, kdy se této technologii říkalo Rapid Prototyping. Tyto procesy byly zprvu koncipovány jako rychlý cenově efektivní způsob vytváření prototypů pro průmyslové vyvíjení produktů. Prvním neoficiálním objevitelem je Dr. Kodoma, který přišel s aditivním přístupem, kdy se vrstva po vrstvě nanáší pomocí fotocitlivé pryskyřice, která je polymerizována pomocí UV světla. Ovšem úplná patentová specifikace nebyla podána včas a on o svůj patent přišel. (ČVUT 2014)

Skutečné začátky 3D tisku lze vystopovat do roku 1986, kdy si Charles Hull nechal patentovat stereolitografický aparát. Roku 1988 byl prodán první systém SLA, ačkoliv v té době byly v průmyslu vyvíjeny i jiné technologie, například selektivní laserové sintrování

od Carla Deckarda, patentované v roce 1988, nebo Fused Deposition Modeling od Scotta Crumpa, patentované v roce 1989 a dnes hojně využívané. (Noorani 2018)

V Německu byla roku 1989 založena firma EOS vedená Hansem Langerem, která se zaměřila na technologii laserového sinitrování. Postupem času byly patentovány i další technologie, včetně Balistic Particle Manufacturing, Laminated Object Manufacturing, Solid Ground Curing a třírozměrný tisk. V 90. letech a na začátku 21. století přibyly další technologie, které se specializovaly na průmyslové aplikace, jako Rapid Tooling, Rapid Casting Manufacturing. (3D Printing Industry 2017)

Zlomový okamžik pro 3D tisk byl v roce 2005, kdy byl zahájen projekt RepRap na Univerzitě of Bath. Cílem bylo vytvořit 3D tiskárnu, která by byla schopna vytisknout co nejvíce svých vlastních součástí. Do projektu se mohl zapojit každý nadšenec, jelikož byl od počátku vytvořen jako open-source. Díky této otevřené spolupráci se RepRap tiskárny prudce vyvíjí. Došlo k nepřetržitému zdokonalování tiskáren a tiskových materiálů. Tiskárny, které původně pocházely z firemního prostředí, se dostaly i mezi běžné uživatele a kutily. (Stříteský 2019)

Postupem času se 3D tisk rozdělil do dvou hlavních směrů: špičkový 3D tisk s drahými systémy pro složité díly ve vysoce hodnotných odvětvích, a stolní 3D tiskárny zaměřené na vývoj konceptů a funkční prototypování s přívětivým designem pro uživatele. Diverzifikace vedla k novým aplikacím v leteckém, lékařském, automobilovém a šperkařském průmyslu. Celkově lze říci, že od počátků na konci 80. let prošel 3D tisk výrazným vývojem, kde hrály klíčovou roli inovace, výzkum a konkurenční prostředí. Dnes je 3D tisk integrován ve více odvětvích a slibuje stále nové možnosti a aplikace pro budoucnost. (3D Printing Industry 2017)

3.1.2 Budoucnost aditivní technologie

Zprvu byla AM využívána k produkci konceptuálních modelů produktů pro estetické a ergonomické účely, odhalení konstrukčních vad a testování výrobků v průběhu návrhového procesu. V současné době roste skutečná produkce výrobků, a mezi ně patří nábytek, hračky, letecké a automobilové produkty a lékařské přístroje, což zahrnuje mnoho

položek produkované touto technologií. Rozšiřující se průmyslové použití AM je motivováno jejich unikátními vlastnostmi, a to zejména: možnosti rychlé úpravy návrhů, možnosti vyrábět bez nástrojů, jednoduché přizpůsobování zakázkám, optimalizaci výrobku pro jejich funkci.

3.1.2.1 Aditivní technologie ve stavebnictví

V oblasti stavebnictví využívají především ty procesy AM, které jsou založené na vytlačování a tryskání pojiva. Tyto procesy najdou uplatnění jak mimo místo, tak i na místě stavby. To zahrnuje výrobu nových stavebních prvků, domů (obr.5), a také aplikace oprav. Procesy, opírající se o extruze, mohou využívat tiskové hlavy instalované v rámech, robotických systémech nebo jeřábech.

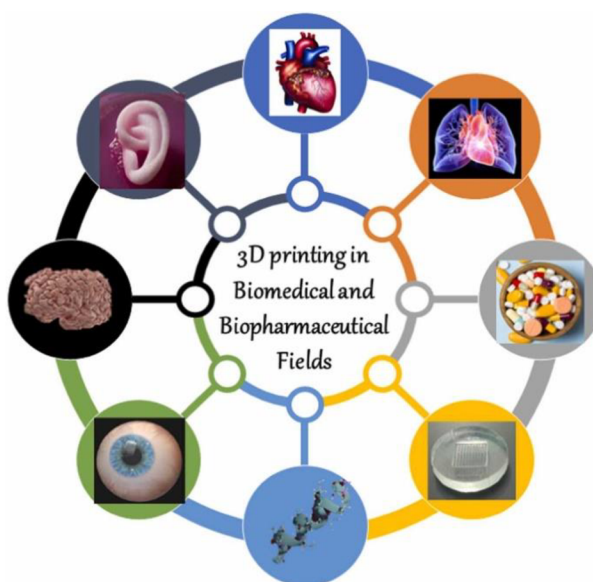
Jednou z metod je Contour Crafting, která se řadí mezi první AM metody pro stavební průmysl. Technologie kombinuje extruzi pro vytvoření vnějších částí struktury a postup plnění pro tvorbu jádra struktury. Při této metodě je využíván k extruzi keramický nebo betonový materiál přes 3D tiskové hlavy přidělané na mostovém jeřábu. (Flávio 2019)



Obr. 5 Vytlaštěný dům za 48h Milán (Flávio 2019)

3.1.2.2 Aditivní technologie ve farmaceutické výrobě

V dnešní době se 3D tisk čím dál více využívá i ve farmaceutickém průmyslu, kde se podílí na rozvoji technologie medicíny. Přináší možnost nákladově efektivní produkci léků s velkým potenciálem realizovat radikální přeměnu v oblasti léčiv a lékových forem. Ve farmaceutickém průmyslu jsou využívány rozdílné druhy 3D tisku pro produkci léčiv, například vytlačování taveniny, stereolitografie a biotisk. AM nabízí možnost upravovat lékové formy na základě individuálních požadavků. Na obr. 6 je znázorněno využití technologie 3D tisku v oblasti biomedicíny a biofarmacie.



Obr. 6 Využití 3D tisku v biomedicině (Niha 2024)

V biomedicínských oblastech je 3D tisk rozsáhle využíván, například při tisku orgánu pro dentální a ortopedické aplikace. Další aplikace zahrnují vytváření kardiostimulátorů, srdcí rohovek, sítnic a umělých nosů. Pro tento proces se používá propracovaný počítačový program pro počítačovou tomografii a magnetickou rezonanci. Tyto programy generují topografické obrazy složitých fyziologických systémů. Následně systém získané snímky upravuje k produkci umělých orgánů se značnou přesností a účinností, což umožňuje nahrazovat špatné orgány, které by bylo dosti složité produkovat jinou cestou. Transplantace orgánů čelí problémům spojeným s nedostatkem tkání a orgánů od dárců. Tuto situaci by mohl 3D tisk zlepšit.

Ve farmaceutickém průmyslu se u biotisku jako materiál k produkci 3D struktur tkání využívá biomateriál, například hydrogel, kolagen a další látky. Kmenové buňky, které jsou generovány na hydrogelovém substrátu nacházejí uplatnění jako bioinkoust. Tento inkoust je hlavním stavebním kamenem při 3D tisku. Proteinové inkousty jako bioinkoust se těší zvláštnímu zájmu v této oblasti, díky svým mnoha výhodám v porovnání s jinými materiály, včetně biokompatibility, přizpůsobivosti, biologické odbouratelnosti a schopnost integrovat se do komplexních struktur. Proteiny, včetně kreatinu, fibrinu, hedvábného proteinu, a potravinových proteinů jako vajec, sójového proteinu, mléka, se využívají k produkci 3D tištěných lešení. Tyto proteiny slouží jako základní prvky pro stavbu biologických struktur, které byly úspěšně použity k reprodukci skeletů, které nejenom napodobují vzhled, ale též zachovávají funkčnost biologických struktur. (Niha 2024)

3.1.2.3 Aditivní technologie v kulinářství

V oblasti 3D tisku potravin se propojují věda o materiálech, kulinářské dovednosti a inženýrství, přinášejíce revoluci do produkce a konzumace potravin. Díky AM může být změněn potravinářský průmysl, a to prostřednictvím přizpůsobení výživy jednotlivci na míru, speciálních kuchařských prožitků a účinné produkci potravin. (Muhammad 2023)

Existuje mnoho principů technologie 3D tisku, nicméně u tisku potravin převládají čtyři hlavní metody: vytlačování, selektivní laserové slinování, otryskávání pojivem a inkoustové. Metoda vytlačování je nejpoužívanější aplikací v oblasti 3D tisku potravin. Nejpoužívanější pro tyto účely jsou tiskárny Delta, které se normálně využívají k potravinovému tisku, hlavně pro tisk těst a čokolád. (Jingfu 2024)

Díly potřebné pro fungování 3D potravinářských tiskáren zahrnují tiskárnu, počítač a řídicí skříňku. Pokrmy jsou tisknuty na základě počítačového modelu v CAD systému. Procesy, jako je řízené vytlačování nebo jiné metody nanášení materiálu, umožňuje exaktní umístění surovin. Během tisku tiskárna rovněž reguluje teplotu materiálu, a to buď jejich ohříváním, nebo ochlazováním.

Pro vytvoření tištěné potraviny je využíván CAD program nebo 3D sken. Materiály pro tisk, například prášky, pasty a gely, se volí takové, aby vyhovovaly požadovaným

podmínkám pro tisk. Připravené jídlo je umístováno tiskárnou do stříkaček nebo zásobníků. Poté je prováděn samotný tisk, kdy produkování struktur potravin je zhotovováno vrstvou po vrstvě. Vrstvy jsou řízené z modelu digitálního návrhu. Při ukončení procesu je možné potraviny následně usušit, ochladit nebo ohřát. Tím se vylepšuje chuť, textura nebo zachovává tvar. (Muhammad 2023)

Různé metody jsou používány k utváření potravinářských produktů. Na obr.7 jsou znázorněny hlavní metody 3D tisku v kulinářském odvětví.



Obr. 7 Hlavní metody 3D tisku potravin (Muhammad 2023)

a) Metoda vytlačování materiálu b) Bider Jetting c) Laserové slinování d) Inkoustová tiskárna

3.1.2.4 Aditivní technologie v letectví a kosmonautice

Podobně jako v oboru lékařství, tak i v leteckém průmyslu bylo v počátečních letech nasazení technologií 3D tisku využíváno především k vývoji produktů a prototypů. Firmy působící v tomto odvětví často spolupracují s výzkumnými či akademickými ústavy a byly průkopníky při vylepšování a aplikování aditivních metod do výrobních aplikací. K výrazným uživatelům se řadí GE Aviation, Airbus, Rolls-Royce atd. (3D Printing Industry 2017)

Pro letecké a kosmické účely jsou klíčové komponenty, které jsou nejen lehké, ale zároveň zvyšují efektivitu paliva a celkového výkonu letadla či rakety. Využitím 3D tisku lze vytvářet lehké konstrukce s využitím pokročilých materiálů. Metoda přispívá

ke snižování hmotnosti letadel a vesmírných lodí, aniž by utrpěla strukturální pevnost. AM technologie je schopna rychlého prototypování, což dává inženýrům možnost produkovat a testovat mnoho dílů a systémů.

Technologie 3D tisku má potenciál ulehčit dodavatelskému řetězci, tím že usnadní montáž, sníží počet součástí potřebných držet na skladě atd. Dovoluje také vytvářet vysoce individualizované součásti, které lze přizpůsobit specifickým potřebám letounu či konkrétním misím. Poskytuje možnosti efektivní výroby náhradních dílů, včetně těch pro starší nebo již neprodukované modely letadel, čímž zajistí zlepšenou podporu údržby.

Široká škála letadel a kosmických zařízení, od proudových letadel až po stíhačky, satelity, vojenské drony a hypersonická letadla, včetně městské letecké mobility, bylo ovlivněno použitím komponent vyrobených technologií 3D tisku. Technologie nachází uplatnění při výrobě komplikovaných částí motorů obr. 8, včetně palivových trysek, lopatek turbín a vložek spalovací komory, které jsou součástí plynových turbínových motorů využívaných v letadlech.

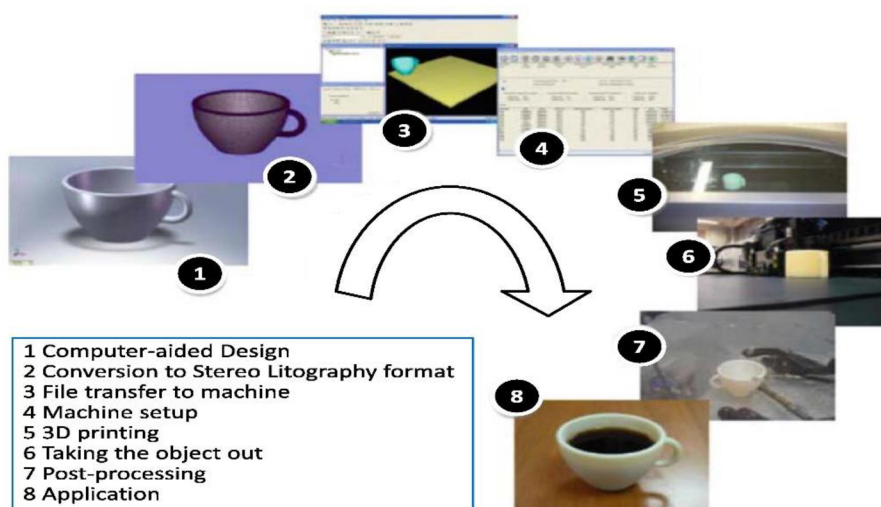
Technologický vývoj nepřetržitě poskytuje nové příležitosti pro inovace, redukování nákladů a dosahování vyššího výkonu v leteckém průmyslu. Co se týče budoucnosti, očekávají se vylepšení ve formě výroby širšího rozsahu komponent, neustálého zvyšování výkonu, výrobu na místě a integraci s novými technologiemi, například umělou inteligencí. (Boretti 2024)



Obr. 8 Spalovací komora (Boretti 2024)

3.1.3 Princip aditivní technologie

AM se skládá z několika kroků od samotného návrhu součásti po aplikaci vytištěného dílu. V závislosti na obtížnosti a rozměrech produktů je postup výroby různorodý a obsahuje variabilní počet kroků, kterých je nutné udělat k dosažení finálního stavu výrobku. V případě menších a jednoduchých výtisků, které jsou určeny převážně pro vizualizaci a nevyžadují vysokou celkovou pevnost, je možné model tisknout s malým procentem výplně. Tím lze dosáhnout snížení množství materiálu a zkrácení doby tisku. Naopak u rozměrnějších a komplikovanějších výrobků, které plní funkci prototypu, je proces náročnější a požaduje několik dalších fází, jak při samotném tisku, tak i u dalšího zpracování nebo lakování. Ve fázi prvotního vývoje bývá prioritou rychlost výroby před kvalitou, což vede k tisku hrubých součástí. Dále v procesu mohou být díly podrobeny důkladnému čištění a dalšímu zpracování, například lakování, broušení a přípravy povrchu. Postup tisku má většinou 8 kroků zobrazených na obr 9. (France 2013)



Obr. 9 Postup 3D tisku (Gibson 2015)

1. Tvorba modelu

Všechny komponenty AM výroby musí vzniknout z digitálního modelu, který komplexně popisuje vnější geometrii. Tento proces může obsahovat využití prakticky libovolného profesionálního CAD software, který slouží k vytváření modelů těles. Nicméně výsledkem musí být třírozměrné zobrazení povrchu nebo tělesa. Další možností ke tvorbě 3D modelu je regresivní inženýrství, jako je například technologie optické nebo laserové skenování, které zachycuje celý povrch a strany skenovaného objektu. (Gibson 2015)

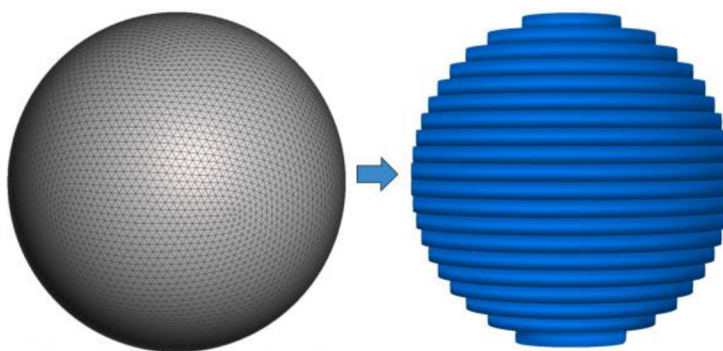
2. Převod do STL formátu

Nejpoužívanějším způsobem pro sdílení informací o 3D modelování je soubor typu STL. Skoro všechny tiskárny podporují formát STL a stal se dnešním standardem. Téměř každý CAD systém je schopen vygenerovat tento typ souboru. Při online vyhledávání modelů pravděpodobně narazíte na tento typ souboru. STL obsahuje popis vnějších povrchů z vytvořeného 3D modelu a slouží jako podklad na výpočet řezů. Používají se i další typy formátů, mezi které patří 3D Manufacturing format, Object file format a Additive Manufacturing File (Torta 2019)

Převod 3D modelu do STL souboru je celkem snadný proces za využití programů, jako například Tinkercad nebo Fusion 360. Většina podobných programů nabízí funkci přímého exportu do formátu STL. Tento soubor je následně jednoduše uložen do počítače. (Střiteský 2019)

3. Tvorba G-Kódu

V následujícím kroku se STL soubor otvírá v programu, který je určen pro řezání. Je vhodné začít s programem, který specifikuje přímo výrobce tiskárny, a podle potřeby přejít na další řezací nástroje v pozdější fázi. Proces řezání objektu zahrnuje rozdělení modelu na několik tenkých vodorovných plátků, jak je znázorněno na obr. 10. Vrstvy slouží jako vzor pro 3D tiskárnu, která díky tomu pozná kde má nanést materiál. Pro zajištění odpovídajícího tisku objektu může být nezbytné zhotovit podpěry, které se po vytištění odstraňují.



Obr. 10 ukázka rozřezaného 3D modelu (Kloski 2021)

Zároveň bývá programem vygenerován srozumitelný kód pro konkrétní tiskárnu, na základě kterého jsou řízeny pohyby tiskárny. Běžně se používá formát G-Code, avšak v závislosti na výrobci tiskárny může nést jiné označení nebo může být specifický pro daný typ tiskárny. Například, pokud využíváte tiskárnu SLA s technologií DLP, může se jednat o řadu obrázků ve formátu .png. G-Code obsahuje tisíce řádků, které udávají tiskárně změny souřadnic XY a příkazy pro ovládání procesu vytlačování, které má tiskárna za úkol provést. Soubor obsahující G-Code je nahrán do tiskárny prostřednictvím přímého spojení, bezdrátové či kabelové sítě, nebo vložení SD karty do tiskárny. (Kloski 2021)

4. Nastavení tiskárny

Tiskárna musí být pro optimální provoz vhodně nastavena. Při využití tiskárny typu FDM jde hlavně o kalibraci počáteční vrstvy, což zahrnuje nastavení vzdálenosti trysky od podložky. Dalším důležitým krokem může být stanovení optimálního napnutí řemenu a odstranění nečistot z trysky, která se může ucpávat plastem při tisku. Rovněž je upravována tisková podložka v souladu s vybraným materiálem. Pro dosažení lepší adheze se na desku nanáší vrstva lepidla, laku nebo dochází k jejímu odmaštění. U nového tisku je vždy nutné zkontrolovat vhodný filament v zásobníku. K čištění tiskové hlavy se využívá čistící struna, která ji dokáže ideálně pročistit od pozůstatků z předešlého tisku. (Menken 2012)

5. Tisk

Samotný tisk součásti je z velké části automatizovaný proces, který může probíhat bez kontroly obsluhy. Při tisku je nutné dělat pouze povrchové kontrolování tiskárny, s cílem zajistit bezchybný tisk. Při tisku může docházet k problémům například s napájením, programovým chybám nebo k vyčerpání materiálu. (Gibson 2015)

6. Vyjmutí výtisku z 3D tiskárny

Po ukončení procesu tištění je zapotřebí výtisk opatrně odstranit z tiskové podložky, a to buď ručně nebo pomocí vypichovací pomůcky. Následně je potřeba odstranit všechny podpěry za pomoci kleští či ručně. Při používání standartního filamentu stačí pouze odstranit součást z tiskové podložky. V případě tiskárny s pryskyřicí je však nezbytné součást vyjmout, vyčistit a poté pod slunečním nebo UV světlem vytvrdit. (Kloski 2021)

7. Postprocessing

Většinou lze součásti bezprostředně po dokončení tisku využít jako funkční součásti. Nicméně v případě, že jsou kladeny vyšší nároky na estetiku součásti, se uplatňuje postup zvaný postprocessing. Tento proces zahrnuje různé techniky a dílčí úpravy modelu s obecným záměrem dosáhnout barevného, hladkého a esteticky příjemného povrchu. Plastové výtisky lze upravovat ručním broušením, použitím karosářského tmelu, natírat akrylovými barvami, nanášet plničem, stříkat barvou ve spreji a provádět mnoho dalších úprav. Při vrstvení tmelu nebo kytu je však třeba myslet na možnou ztrátu detailu součásti. (Stříteský 2019)

8. Aplikace a údržba

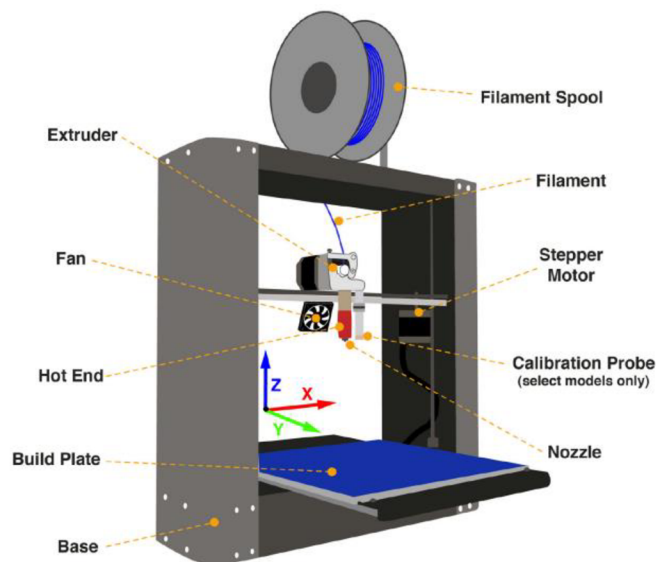
Vytištěné modely se po případném postprocessingu, můžou považovat za hotové výrobky. Následně je možné, že bude nutné tyto díly sestavit dohromady s dalšími elektronickými nebo mechanickými komponenty k dosažení finální podoby výtisku.

Po dokončení tisku je nutné se zaměřit na to, že většina 3D tiskáren vyžaduje pravidelnou údržbu. Řada 3D tiskáren využívá křehkou laserovou nebo tiskovou technologii, kterou je nutné bedlivě monitorovat, a to ideálně v čistém a tichém prostředí. I když jsou přístroje obecně konstruovány tak, aby fungovaly bez lidského dozoru, je klíčové začlenit pravidelné kontroly do plánů údržby, ale je nutné rozlišovat jednotlivé technologie, jelikož každá požaduje jiný stupeň údržby. Několik prodejců AM přístrojů poskytuje vzorky pro pravidelné testování, aby se ověřilo, že přístroje fungují v přijatelných mezích. (Gibson 2015)

3.1.4 FDM tiskárny

FDM tisk představuje jeden z RP postupů, kde se výrobek vytváří postupným nanášením roztaveného termoplastického materiálu ve vrstvách. V průběhu výrobního procesu projde termoplastické vlákno topným prvkem, který zčásti roztaví vlákno. Následně je toto poloroztavené vlákno vypuštěno tryskou, pohybující se v rovině XY po pracovní ploše (obr.11). Způsob nanesení materiálu na podložku probíhá dle programu vytvořeného softwarem dle modelu ve 3D. Model je tisknut vrstvu po vrstvě, a po dokončení každé z nich je plošina vertikálně posunuta v ose Z, umožňující nanesení následující vrstvy. Nově přivedené ohřáté vlákno se slévá s hmotou v okolních vrstvách zčásti vytvořeného dílu. Celý proces může trvat několik hodin, během nichž se na pracovní ploše postupně vytvoří hotový díl.

V případě výčnělků nebo složitých geometrií výrobku je nutné použití přídavného materiálu, který vyztuží výrobek po čas tisku. Přídavná látka je dodávána prostřednictvím druhé trysky, umístěné vedle té první. Po dokončení procesu lze snadno podpurný materiál odstranit dvěma způsoby, buď rozpuštěním v teplé vodní lázni nebo odlomením. (Wimpenny 2017)



Obr. 11 FDM tiskárna (Kloski 2021)

3.1.4.1 Kartézské tiskárny

Kartézské 3D tiskárny (obr.12) představují nejrozšířenější a nejběžnější typ dostupných tiskáren. Tyto tiskárny využívají kartézský souřadnicový systém, což je matematický koncept pracující s třemi osami: X, Y a Z. Struktura umožňuje plynulý pohyb a přesné umístění tiskové hlavy. Běžně se u těchto tiskáren podložka pohybuje pouze podél osy Z, což umožňuje tisk dvourozměrně v rovině X, Y. Existují však také varianty, kde se tisková hlava pohybuje v ose X a Z, zatímco podložka se pohybuje v ose Y. V dnešní době se tyto tiskárny vyznačují jako nejvíce vyspělé a flexibilní. Některé z nich disponují dokonce různými tisky pro laserové řezání a stroje s počítačovým numerickým řízením. (Torta 2019)

3.1.4.2 Delta

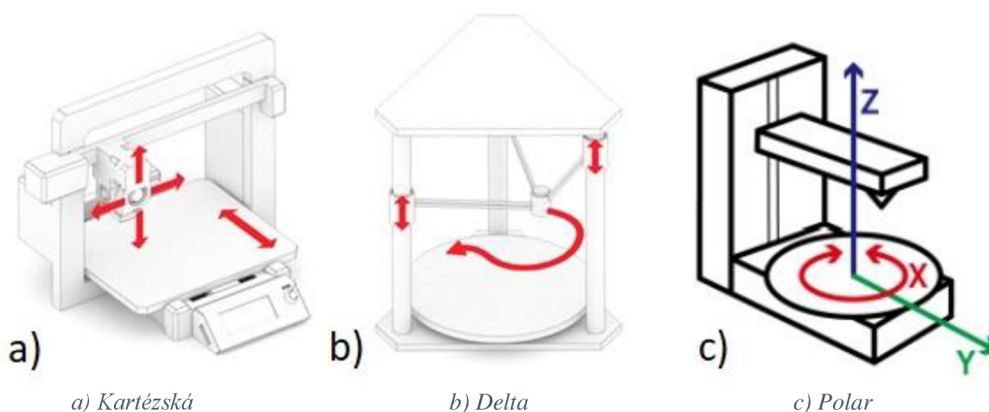
Delta tiskárny nejsou tolik využívány jako předchozí, ale opět používají kartézský systém. Tiskárny se spoléhají na tiskovou hlavu, která je uchycena na sestavě tří pohyblivých ramen. Ty jsou obvykle umístěny na lineárním vedení. K pohybu tiskové hlavy je nezbytné vypočítávat trigonometrické rovnice, což představuje vyšší výpočetní náročnost ve srovnání s kartézskými tiskárnami. Delta tiskárny (obr. 12) jsou koncipovány pro vysokorychlostní tisk, nicméně s omezením v dosažené úrovni detailů. Mezi další výhody patří velikost tiskových rozměrů zejména v ose Z, kde mají schopnost tisknout až dvakrát vyšší objem ve srovnání s kartézskými tiskárnami. Na tisk rozměrnějších výrobků je vhodnější nepohyblivá tisková podložka. (Svět hardware 2019)

3.1.4.3 Polar

V případě polárních 3D tiskáren je použit odlišný souřadnicový systém, jelikož umístění tiskové hlavy se nedefinuje souřadnicemi X, Y a Z, ale spíše úhlem a délkou. U těchto tiskáren tisková podložka provádí rotaci a extruder realizuje pohyb v osách X a Z. Jeden z benefitů těchto tiskáren spočívá v tom, že pro pohyb na požadované souřadnice využívají pouze dva motory, což přináší úsporu nákladů a komponent. (Torta 2019)

3.1.4.4 Scara

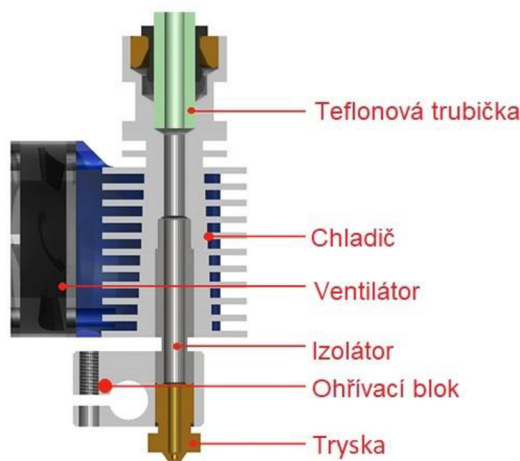
Tiskárny Scara nejsou příliš využívány pro sériové výroby a jsou zaměřené především na nadšence. Extruder obvykle drží dvojice mechanických paží, které ho ovládají, a současně se celá konstrukce pohybuje nahoru v ose Z. Tisková deska setrvává na svém místě a není nezbytně propojena s konstrukcí tiskárny. Metoda Scara má potenciál být využívána pro tisk rozsáhlejších výrobků, ale nastává tu problém s požadavkem na ohřev tiskové desky a prostoru. (Svět hardware 2019)



Obr. 12 Schéma konstrukcí FDM tiskáren (Stříteský 2019, Kakabadze 2020)

3.1.5 Komponenty FDM tiskáren

Extruder – Nejdůležitější částí 3D tiskárny je extruder (obr. 13), který má za úkol aplikovat jednotlivé tiskové vrstvy. Extruder se skládá z následujících komponent: trysky, ohřívacího bloku, izolátoru, ventilátoru, chladiče a teflonové trubičky. Pro optimální funkci je klíčový kvalitní Hotend, který odpovídá za ohřev a zároveň chlazení tištěného filamentu. (Svět hardware 2019)



Obr. 13 Extruder FDM tiskárny (Svět hardware 2019)

Zprvu prochází materiál za pokojové teploty teflonovou trubičkou do extruderu. Poté materiál putuje přes chladič, který slouží k odvodu teploty. Tím se šíření tepla přes izolátor minimalizuje a co nejvíce zmenšuje oblast mezi pevným a roztaveným materiálem. Na zvýšení účinnosti chladiče bývá připevněn ventilátor, který pomáhá odvádět teplo. Izolátor lze přirovnat k úzké trubičce s vnějším závitem. Významné zúžení izolátoru v určitém místě má za cíl dosáhnout minimálního průřezu a tím omezit přenos tepla směrem vzhůru, kde by měl materiál zůstat neroztavený. Ohřívací blok představuje část z materiálu s vysokou tepelnou vodivostí, často z hliníku. Uvnitř se nachází elektrické topné těleso a termistor sloužící k získání informace o současné teplotě. Ve fázi, kdy materiál prochází přes ohřívací blok, tak je již v tekutém stavu a dochází k jeho vytlačování ven skrz trysku. Z uživatelské perspektivy je tryska pravděpodobně jediným relevantním prvkem extruderu, pokud jde o možnost výměny. Při manipulaci s průměrem trysky dochází ke změně kvality a doby tisku. (Stříteský 2019)

Tisková deska – Na tiskovou plochu, kde jsou tisknuty objekty, bývá obvykle používána hliníková základna s různými typy povrchů a volitelným topným prvkem. Účelem topného prvku je zvýšit přilnavost rozdílných materiálů k podložce a zároveň regulovat teplotu tisknutého předmětu, což minimalizuje deformace v důsledku příliš rychlého ochlazení. Materiálu během procesu tisku pomáhá přilnout k podkladové desce materiál, ze kterého je vyroben. Různé typy povrchů zahrnují malířskou nebo kaptonovu pásku, borosilikátové sklo, ohebné desky a fólie PEI. (Torta 2019)

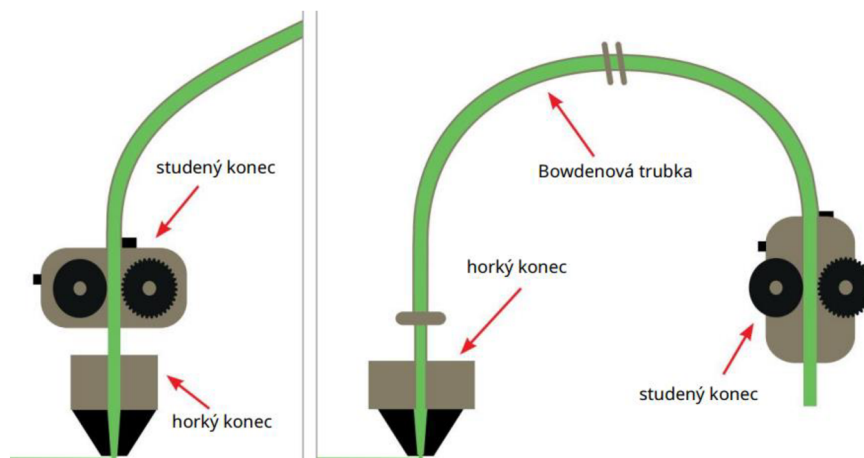
Rám – Nosnou konstrukci 3D tiskárny tvoří rám, jehož tuhost a přesnost zhotovení mají klíčový dopad na celkovou kvalitu tisku. Robustní a stabilní rám efektivně potlačuje vibrace, což umožňuje tisk bez narušení kvality výsledného produktu.

Krokové motory – Veškeré mechanické pohyby tiskové hlavy a tiskové podložky v 3D prostoru jsou zajišťovány krokovými motory. Dodatečný motor řídí přívod tiskového materiálu do tiskové hlavy. Mezi benefity těchto motorů je pevně stanovená délka kroku, což přináší určitou přesnost a kontrolu nad pohybem. Krokové motory se dělí na dva hlavní druhy: Bowdenové a přímé pohony. Tyto motory se odlišují ve způsobu manipulace s filamentem a způsobu, jakým s ním pohybují. (Stříteský 2019)

Při přímém pohonu je studený konec umístěn přímo nad horkým koncem a pohybují se současně jako jeden celek. Filament je veden z cívky přes studený konec a následně přiváděn přímo k horkému konci.

Při Bowdenovém pohonu je studený konec izolovaný a neměnný, propojení prostřednictvím dlouhé trubky, známé jako Bowdenova trubka, s horkým koncem. Následně je filament stejně jako u předchozího motoru veden od cívky přes studený konec a přiváděn přímo k horkému konci, jak je zobrazeno na obr. 14. (Torta 2019)

Řídící jednotka – Hlavní úlohou této jednotky je řízení celého provozu tiskárny. Základní úlohou je interpretace a zpracování vstupního souboru obsahující G-kód, který stanovuje pohyby jednotlivých krokových motorů a reguluje teplotu trysky a tiskové podložky. (Stříteský 2019)



Obr. 14 Přímý a Bowdenový krokový pohon (Torta 2019)

3.1.6 SLA tiskárny

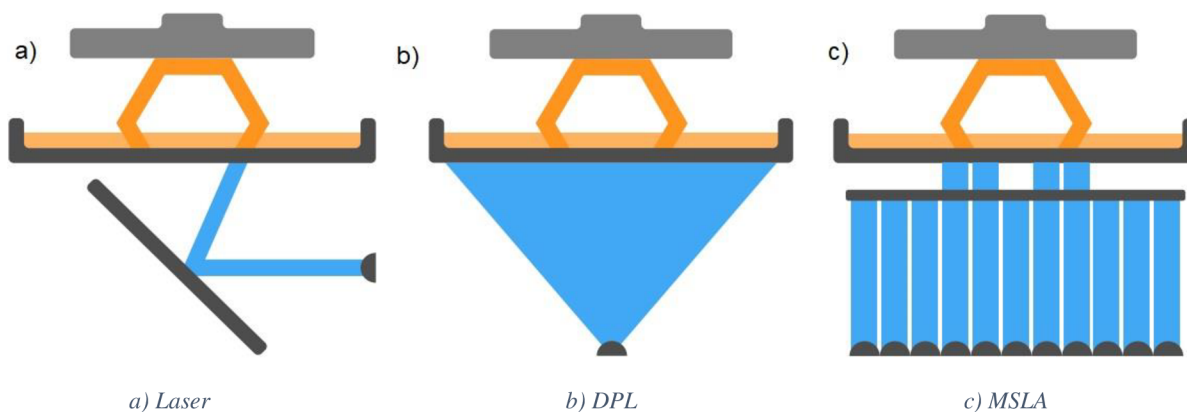
SLA tiskárny pracují na principu polymerace kapalného polymeru za využití laserového záření dle obr. 15. 3D tiskárny tohoto typu jsou schopny precizního tisku s vysokým stupněm detailu, avšak jejich ovládání je náročnější, a proto je klíčové být seznámen s jejich silnými stránkami a omezeními. Základem technologie SLA je vytváření

objektů z fototvrdnoucí tekuté pryskyřice, která podléhá tvrdnutí při dostačujícím ozáření UV světlem. Tento proces je známý jako fotopolymerace. V průběhu procesu tisku je postupně ponořován stůl do kapalné pryskyřice a ozáření určitých míst dle programu dochází k následnému ztuhnutí pryskyřice. Tento proces se neustále opakuje, dokud není dokončen celý výrobek. Jednou z hlavních nevýhod je toxicita použité pryskyřice, kde je rozhodně vhodné zabránit přímému styku pryskyřice s kůží a zároveň se vyhnout vdechování výparů během tiskového procesu. Další nevýhoda spočívá ve zhotovování podpor pod částmi výtisku, i když ty jsou nezbytné při procesu 3D tisku. (Noorani 2018)

SLA – Laser – ozáření zahrnuje použití UV laserového paprsku, který je řízen dvěma zrcadly, postupně vytváří tiskovou vrstvu. Čas, který je potřebný k vytištění jedné vrstvy, je závislý na velikosti plochy, která se má v současné vrstvě vytvrdit. Tisk většího množství předmětů znamená delší dobu tisku.

DLP – metoda je schopna vytvrdit celou plochu najednou a k tomu je využit digitální projektor. Hlavní výhodou tohoto druhu ozařování je doba vytvrzení jedné vrstvy, jelikož doba tisku jednoho objektu je stejná jako dvou a více.

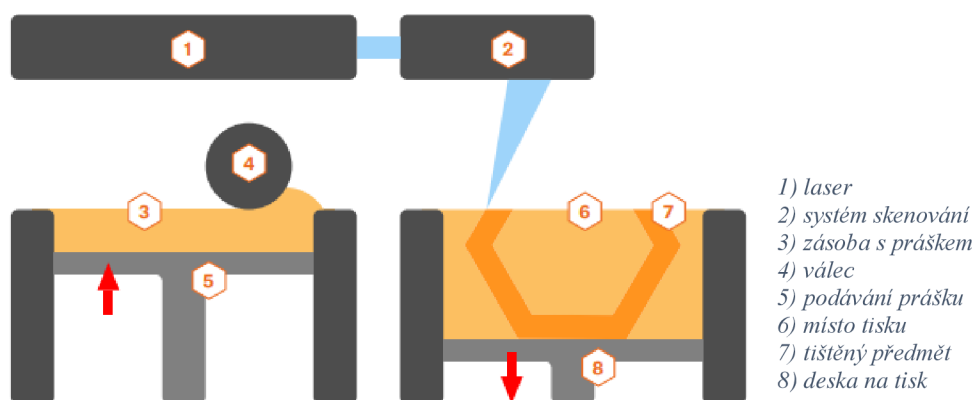
MSLA – metoda využívá k vytvrzování UV LED světlo a současně zakrývá celé plochy objektu LCD displejem. Tento displej ovlivňuje místa, která budou vytvrzena aktivováním určitých pixelů, které se rozsvítí bílou barvou. Vzhledem k tomu, že je LCD displej sestaven z čtvercových pixelů s přesně daným rozlišením, což určuje rozlišení výtisku v osách X a Y. Proces vytvrzování je časově nezávislý na tisku více výtisků najednou, jelikož jako u předchozího typu se vytvrzuje celá plocha jedné vrstvy najednou. (Stříteský 2019)



Obr. 15 druhy ozařování pryskyřice (Střiteský 2019)

3.1.7 SLS tiskárny

Tiskárny SLS obr. 16 využívají k roztavení drobných částic polymerního prášku velmi výkonný laser. Metoda se dobře využívá pro průmyslové aplikace, jelikož je schopna produkovat robustní a funkční komponenty. Při tisku každé nové vrstvy je nutné, aby válec nanesl vrstvu prášku, která je následně laserem spečena. Tímto způsobem se vytvářejí části, které tvoří finální produkt. Proces tisku končí tak, když je tištěný model obklopen jemným práškem. Prášek, který není vytvrzen, stabilizuje výtisk v průběhu tisku a odstraňuje potřebu zvláštních opěrných struktur. Tím se SLS stává vhodným pro výrobu složitých geometrií, podřezů, negativních a vnitřních prvků a tenkých stěn. Výsledné díly mají prvotřídní mechanické vlastnosti, přičemž jejich pevnost je srovnatelná se vstřikovanými díly. Díly vyráběné SLS mají vynikající mechanické vlastnosti, přičemž pevnost se podobá vstřikovaným dílům. (ČVUT 2014)



Obr. 16 SLS tisk (Střiteský 2019)

4 Cíl práce

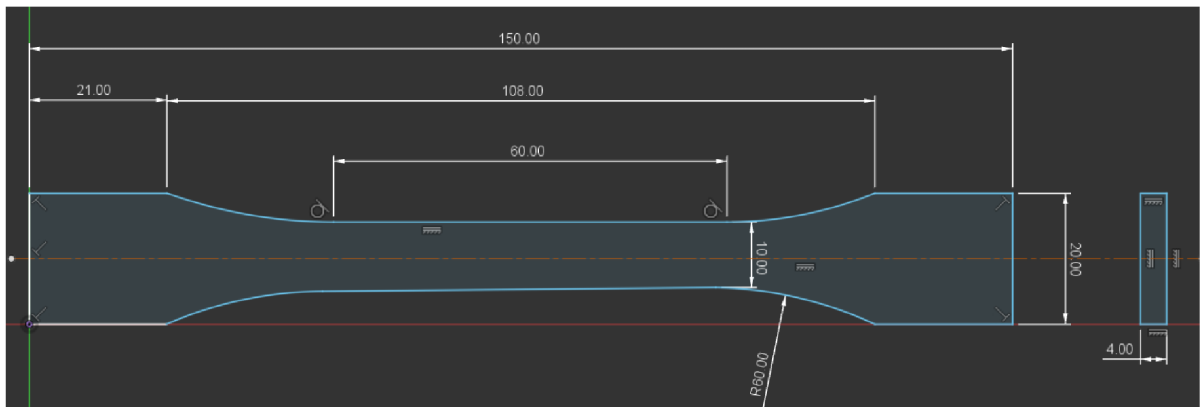
Cílem diplomové práce je provést výzkum mechanických vlastností polymerních materiálů vyrobených pomocí technologie 3D tisku metodou FDM. Teoretická část práce se zaměřuje na problematiku plastů a aditivní technologie. Praktická část je věnována mechanickým zkouškám na vzorcích. Poté byly vzorky upraveny a podrobeny analýze lomové plochy za pomoci skenovacího elektronového mikroskopu. Následuje srovnání vlivu různých typů výplní a plniv na mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků.

5 Metodika

Praktická část je zaměřena na zkoumání mechanických vlastností zkušebních vzorků z materiálu PLA, vytištěných na 3D tiskárně metodou FDM. Vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám s cílem analyzovat jejich chování v závislosti na různých typech plniv a jejich výplňových struktur. Pro zjištění mechanických vlastností byla zvolena statická tahová zkouška, která umožňuje posoudit mechanické vlastnosti materiálů, jako je pevnost, tažnost a pružnost. Porovnáním různých plniv a výplní je možné získat informace o jejich vlivu na tyto vlastnosti a zjistit, které kombinace materiálů a struktur jsou nejvhodnější pro určité aplikace. Tahová zkouška také umožňuje identifikovat optimální strukturu materiálu pro dosažení požadovaných mechanických vlastností. Porovnáním různých typů výplní je možné zjistit, která struktura poskytuje nejlepší rovnováhu mezi pevností a tažností, což může být klíčové pro konkrétní aplikace. Zkouška tvrdosti poskytuje informace o jeho odolnosti vůči deformaci, což je klíčové pro určení jeho schopnosti odolat zatížení a otěru. Porovnání výsledků statických tahových zkoušek s výsledky zkoušek tvrdosti může sloužit k validaci mechanických vlastností materiálů. Konzistentní výsledky z obou typů zkoušek posilují důvěryhodnost zjištěných vlastností. Vážení vzorků bylo provedeno za účelem sledovat konzistenci tisku při použití různých kombinací plniv a výplní. Změny ve hmotnosti mohou indikovat nežádoucí variace ve složení materiálu, které by mohli vést k nerovnoměrnému nebo nespolehlivému tisku.

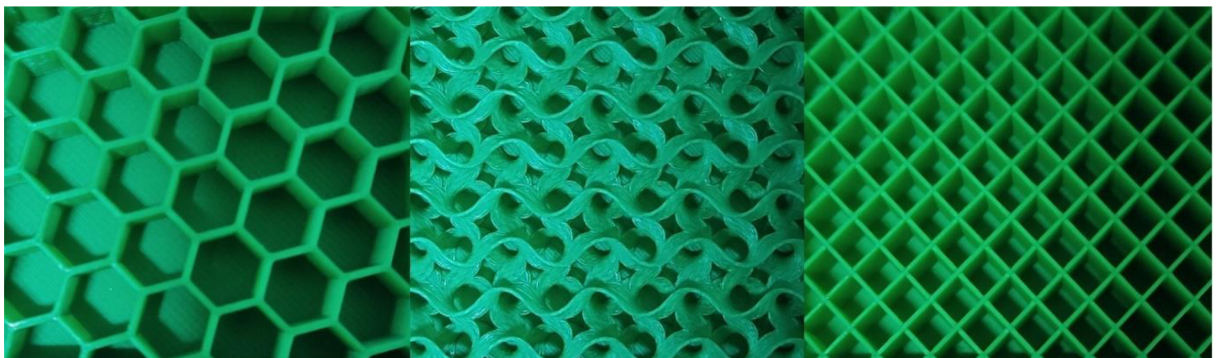
5.1 Tvorba zkušební tělesa

Na začátku výzkumu bylo zapotřebí vytvoření zkušebních vzorků, na kterých byly zkoumány mechanické vlastnosti. Pro stanovení rozměrů těchto těles byla použita norma ČSN EN ISO 527-2, která stanovuje přesné rozměry a tolerance vhodné pro měření tahových vlastností. Obrázek 17 zobrazuje náčrt zkušební tělesa s uvedenými rozměry. Tento náčrt byl vytvořen pomocí softwaru Fusion 360 od společnosti Autodesk. Tento software byl zvolen kvůli dostupnosti licencí a schopnosti exportovat model do formátu STL, který je nezbytný pro 3D tiskové procesy.



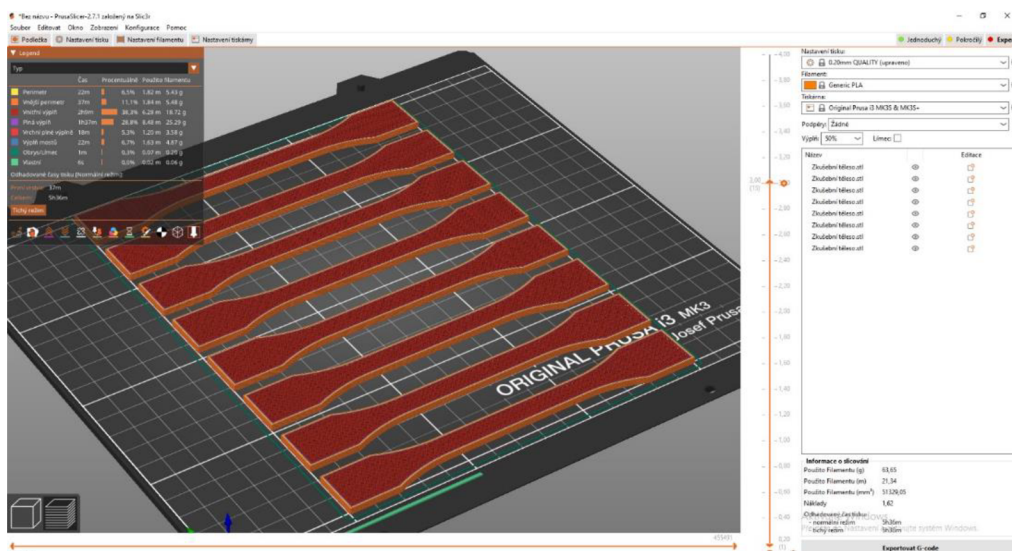
Obr. 17 Náčrt zkušební tělesa (vlastní tvorba)

Vzorky byly vytištěny s použitím tří různých typů výplní a tří druhů plniv. První byl použit čistý PLA, následně bambusové plnivo a nakonec korek. Jako výplně byly zvoleny struktury typu honeycomb, gyroid a grid (obr.18). Pro realizaci této studie bylo vyrobeno celkem 72 vzorků.



Obr. 18 Druhy výplní: Honeycomb, Gyroid, Grid (vlastní tvorba)

Model ve formátu STL byl načten do softwaru PrusaSlicer verze 2.7.1 (viz obr. 19), což je speciálně navržený software pro tiskárny Prusa. V tomto softwaru byly nastaveny všechny potřebné parametry pro 3D tisk. Poté byl vytvořený G-code exportován do paměťové karty. Pro tisk vzorků byla využita 3D tiskárna Prusa i3 MK3S, která je zobrazena na obr. 20.



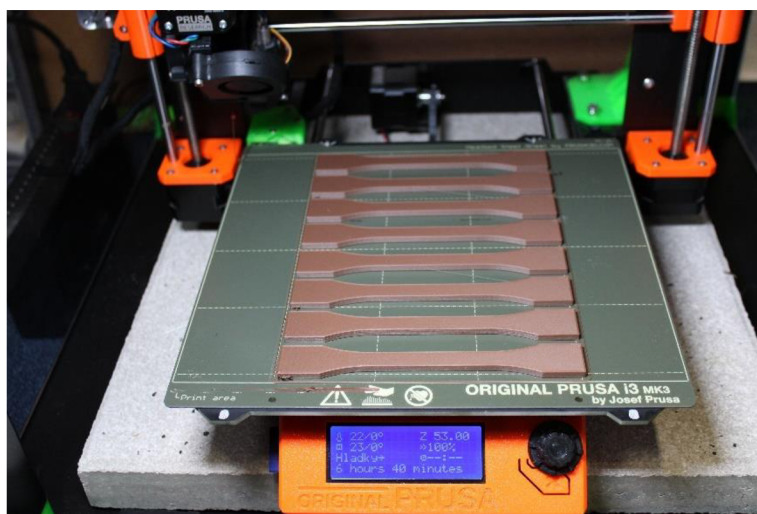
Obr. 19 PrusaSlicer v.2.7.1 (vlastní tvorba)

K tisku byl použit filament o průměru 1,75 mm od firmy PlastikaTrček. Pro tisk vzorků byla použita tryska o průměru 0,4 mm. Výška jednotlivých vrstev byla nastavena na 0,2 mm a úhel výplně byl zvolen 45°. Vzorky byly tisknuty v sériích po osmi kusech s výplní 50%. Čas tisku se lišil u vzorků s různými typy výplně. Například délka tisku pro honeycomb byla 6h 49min, zatímco pro gyroid to bylo 5h 36min. Nejkratší doba tisku byla dosažena u vzorků s výplní grid, a to 4h 31min.



Obr. 20 Prusa i3 MK3S (Prusa 3D)

Pro tisk byl použit ocelový tiskový plát s hladkým oboustranným PEI povrchem, který poskytuje vynikající přilnavost pro většinu materiálů a je ideální pro tisk vzorků z PLA. Teplota trysky pro tisk byla 215 °C pro první vrstvu a 210 °C pro následující vrstvy. První vrstva byla tisknuta pomaleji a při vyšší teplotě, aby byla zajištěna lepší a kontrolovanější přilnavosti materiálu k podložce. První vrstva byla odhadnuta v PrusaSliceru na 37 min. Podložka byla nastavena na teplotu 60 °C. Průběh tisku je zobrazen na obr. 21.



Obr. 21 Průběh tisku (vlastní tvorba)

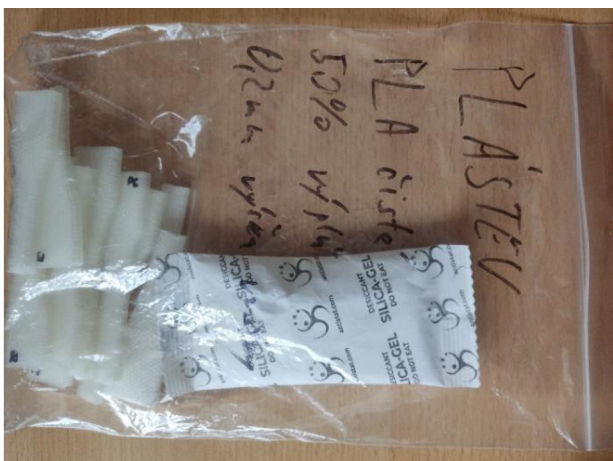
5.2 Skladování vzorků

Vytištěné vzorky byly po tisku rozříděny dle výplně a plniv do skupin viz obr. 22. Jednotlivé vzorky byly poté označeny podle typu výplně a jejich pořadí např. P1. Označení bylo nezbytné pro následující zkoušky, aby nedošlo k záměně, a aby byly jednotlivé vzorky testovány ve stejném pořadí. Zároveň byly tyto vzorky přeměřeny pomocí digitálního posuvného měřítka ke kontrole rozměrů (obr. 23).



Obr. 22 Rozříděné vzorky (vlastní tvorba)

Následně byly vzorky uloženy v polyetylenových ZIP sáčcích (obr.24), které jsou ideální pro skladování menších předmětů. Pro ochranu před vlhkostí byly použity vysoušecí sáčky se silikagelem, jelikož vlhkost by mohla negativně ovlivnit mechanické vlastnosti naměřené z jednotlivých zkoušek. Silikagely byly umístěny do sáčků společně se vzorky, které byly předem řádně rozříděny.



Obr. 24 Uskladnění vzorků se silikagelem (vlastní tvorba)



Obr. 23 Posuvné měřítko (vlastní tvorba)

5.3 Vážení vzorků

Pro měření hmotnosti byla použita přesná stolní váha KERN GAB 6K0.05 N (obr.25). Váha má maximální váhovou kapacitu 6 kg s přesností 0,05g. Při začátku měření bylo nejprve nutné provést vycentrování váhy pomocí šroubovatelných nožiček v souladu s principem vodováhy. Kvůli vysoké přesnosti váhy bylo nutné uzavřít všechna okna, aby nedocházelo k ovlivnění vážení vzorků působením proudění vzduchu. Následně byla váha vynulována a přistoupilo se k samotnému měření hmotnosti vzorků. Vzorky byly váženy postupně, jeden po druhém, podle jednotlivých typů plniv a výplní.



Obr. 25 Váha KERN GAB 6K0.05 N (vlastní tvorba)

5.4 Zkouška tvrdosti

K měření tvrdosti byl využit přístroj DuraJet G5 Rockwell Hardness Tester zobrazen na obr. 26. Tento přístroj je vysoce univerzální a umožňuje měření tvrdosti podle metod Rockwella, Brinella a Vickerse. Přístroj je schopen vyvinout zatížení od 9,8 do 2450 N. Provedení měření vtláčování kuličky bylo realizováno pomocí kuličky o průměru 5 mm a použitá zatěžovací síla činila 132 N. V našem případě byla použita Brinellova metoda pro zkoušení materiálů.

Měření probíhalo systematicky a postupně pro jednotlivé typy plniv a výplní. Pro měření tvrdosti vzorků byla zvolena hladká strana vzorků, a to z důvodu udržení konzistence výsledků u měření. Opačná strana zkoušených těles vykazovala hrubší povrch, což by mohlo

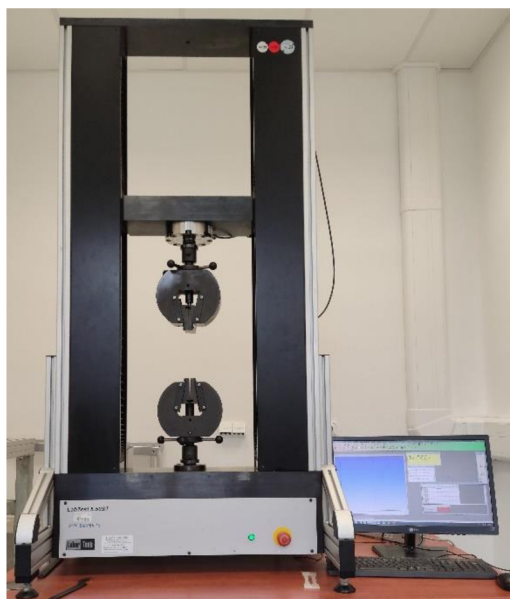


Obr. 26 Tvrdoměr DuraJet G5 a průběh zkoušek tvrdosti (vlastní tvorba)

nepříznivě ovlivnit výsledky měření. Po vybrání strany vzorku, byla kost umístěna na oporu a po stisknutí tlačítka byla aktivována upínací fáze vzorku. Upínací fáze probíhala do zaznění zvukového signálu. Následně bylo spuštěno samotné měření a po dokončení procesu byl vzorek automaticky uvolněn. Naměřená tvrdost byla zobrazena na displeji přístroje.

5.5 Zkouška tahem

Pro určení pevnosti v tahu a míry prodloužení vzorku byla realizována statická tahová zkouška. Pro tento účel byl využit stolní zkušební stroj LabTest 5.50ST (viz obr. 27), určený pro mechanické zkoušky v tahu a tlaku, s možností statického i dynamického namáhání vzorků. Tento stroj disponuje maximální zkušební silou 50kN a minimální zkušební rychlostí 0,001 mm/min. Pro řízení zkušebního stroje a komunikaci s obsluhou slouží software Test&Motion, který umožňuje zaznamenávat parametry zkoušky, zobrazovat grafy v reálném čase a exportovat data do aplikace Excel.



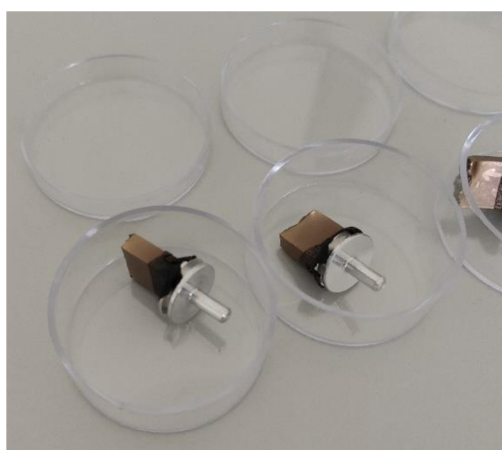
Obr. 27 Zkušební stroj LabTest 5.50ST (vlastní tvorba)

Nejprve bylo nutné nastavit parametry statické tahové zkoušky. Rychlost zkoušky byla stanovena na 10 mm/min a jako bezpečnostní opatření byla stanovena síla 45000 N, při jejímž dosažení by byl proces ukončen. Ukládané hodnoty zahrnovaly čas, dráhu, sílu a protažení. Po nastavení parametrů zkušebního stroje byla definována vzdálenost mezi čelistmi, která pro naše vzorky činila 300,17 mm. Následně byly vzorky upnuty mezi horní

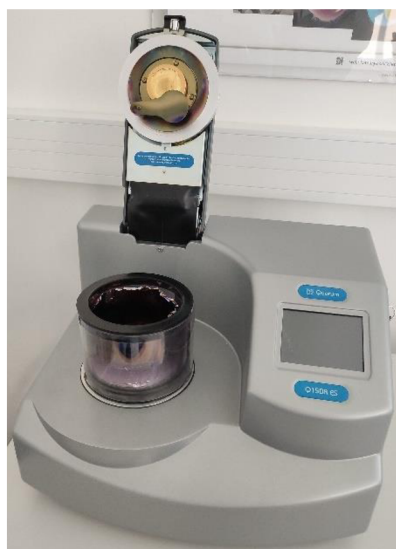
5.6 Výzkum lomové plochy pomocí SEM

Pro zkoumání struktury lomové plochy pomocí skenovacího elektronového mikroskopu bylo nezbytné upravit zkušební vzorky tak, aby bylo možné je vložit do mikroskopu. Tato úprava probíhala následovně: nejprve byl vybírán vhodný vzorek k úpravě, poté byl upevněn do svěráku a pomocí pily na železo byl z něj uříznut centimetrový kus s lomovou plochou. Na řezanou plochu byla před vyjmutím vzorku umístěna značka v podobě tečky, aby nedošlo k jejímu zaměnění s lomovou plochou, a byla označena číslicemi 1 až 3, které určují druh výplně. Vzorky byly následně rozděleny do oddělených mističek podle typu plniva, což zajišťovalo přehlednost v dalším postupu analýzy.

Následně byly připravené vzorky vyčištěny pomocí stlačeného vzduchu a poté byly připevněny k hliníkovému terčíku za pomoci uhlíkové pásky. Tyto vzorky se po připevnění vložily do přístroje určeného pro naprašování zlatem a paládiem (obr.30). K tomuto účelu slouží na naší fakultě zařízení Quorum Q150Res (viz. obr. 31), které umožňuje aplikaci tenké vrstvy vodivého materiálu na vzorek, což umožňuje jeho následné zkoumání ve skenovacím elektronovém mikroskopu. Parametry pro nanášení byly popsány v tab.1.



Obr. 30 Upravené vzorky (vlastní tvorba)

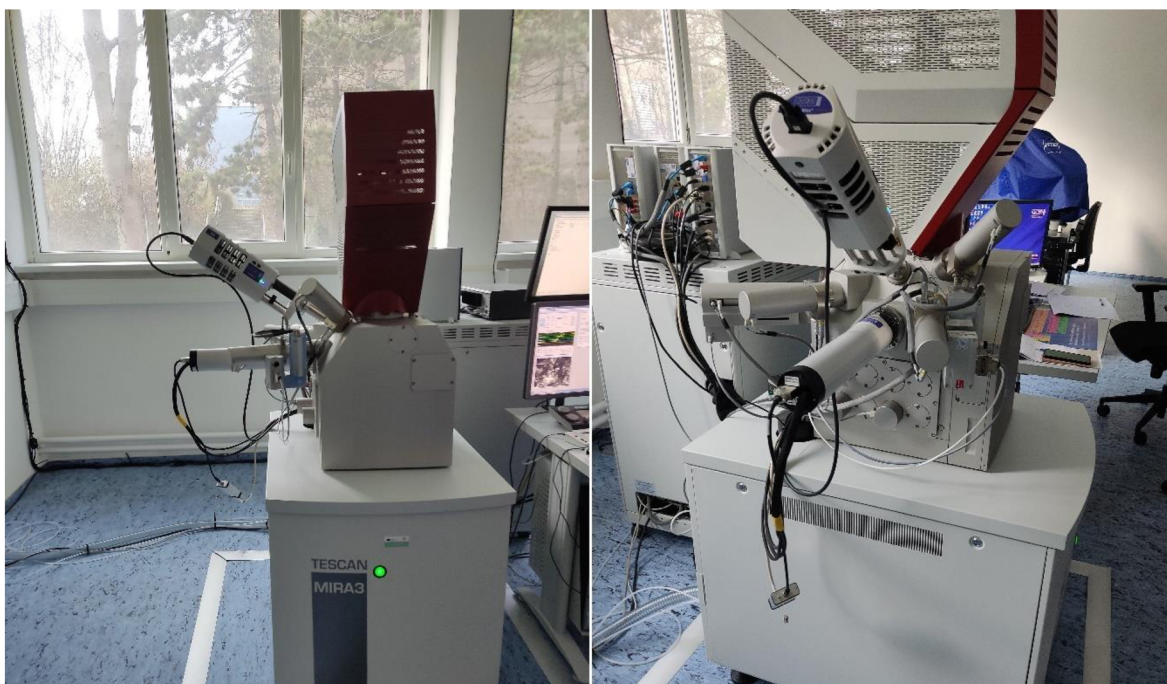


Obr. 31 Nanášecí přístroj Quorum Q150Res (vlastní tvorba)

Parametr	Hodnota
Materiál	Zlato
Rozprašovací čas	60 s
Rozprašovací proud	20 mA
Rotace podstavce	Ano
Rychlost rotace	60
Nástrojový faktor	1

Tab. 1 Parametry nanášení (vlastní tvorba)

Pozlacené vzorky byly pečlivě uspořádány na hliníkový stojánek a vloženy do skenovacího elektronového mikroskopu TESCAN MIRA3 (obr.32), kde analýza probíhá ve vakuu. Při analýze vzorků bylo využito urychlovacího napětí o hodnotě 10kV a snímky byly pořizovány při jednotlivých zvětšení 25x, 500x, 1000x a 2500x.



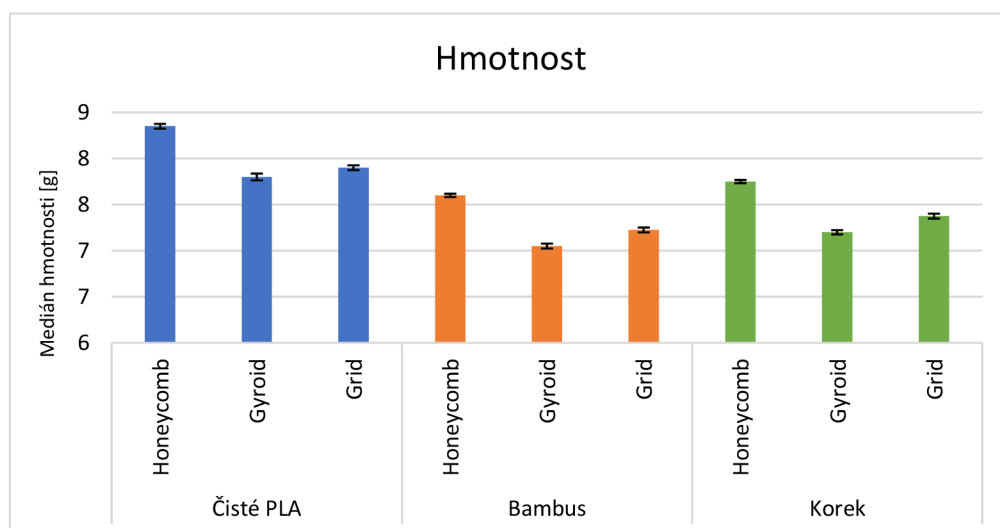
Obr. 32 Mikroskop TESCAN MIRA3 (vlastní tvorba)

6 Výsledky a diskuse

Následující část práce je zaměřena na vyhodnocení naměřených hodnot, které byly získány prostřednictvím zkoušek provedených v dílnách technické fakulty. Data byla získána z několika různých měření, konkrétně ze statické zkoušky tahem, zkoušky tvrdosti vtlačováním kuličky do materiálu, hodnocení kvality tisku a analýzy struktury lomové plochy pomocí skenovacího elektronového mikroskopu. Všechna naměřená data byla následně vyhodnocena a zpracována pomocí softwaru Excel.

6.1 Vyhodnocení vážení vzorků

První zkouškou provedenou v rámci měření bylo vážení vzorků s cílem analyzovat vliv plniv a výplní na celkovou hmotnost vzorku a současně sledovat kvalitu tisku. Naměřené hodnoty byly systematicky zaznamenány a následně zpracovány do tabulky 2. Rozdílná hmotnost je způsobena druhem plniva a geometrií jednotlivých výplní, např. výplň honeycomb je složena ze šestiúhelníkových buněk, grid má pravidelnou mřížku a gyroid má složitější a obvykle dutější strukturu. Graf 1 zobrazuje medián hmotností vzorků s různými typy výplní a plniv. Z vizualizace lze dedukovat, že nejtěžší vzorky pocházely z čistého PLA, následovány vzorky s korkovým plnivem, zatímco vzorky s bambusovým plnivem vykazovaly nejnižší hmotnost. Váha vzorků se také lišila mezi jednotlivými výplněmi při stejném plnivu. U všech zkoumaných variant byly nejtěžší vzorky s výplní honeycomb a nejlehčí s výplní gyroid. Vzhledem k tomu, že všechny naměřené hodnoty byly v toleranci 0,05g, lze konstatovat, že kvalita tisku byla z hlediska hmotnosti v pořádku.



Graf 1 Porovnání hmotnosti vzorků (vlastní tvorba)

Hmotnost byla určena z aritmetického průměru a směrodatné odchylky:

Čisté PLA Honeycomb: $m = 8,33 \pm 0,03$ g Bambus Honeycomb: $m = 7,61 \pm 0,02$ g

Gyroid: $m = 7,78 \pm 0,04$ g Gyroid: $m = 7,05 \pm 0,03$ g

Grid: $m = 7,92 \pm 0,03$ g Grid: $m = 7,23 \pm 0,03$ g

Korek Honeycomb: $m = 7,76 \pm 0,02$ g

Gyroid: $m = 7,21 \pm 0,02$ g

Grid: $m = 7,38 \pm 0,03$ g

Hmotnost [g]	Čisté PLA			Bambus			Korek		
	Honeycomb	Gyroid	Grid	Honeycomb	Gyroid	Grid	Honeycomb	Gyroid	Grid
Průměr	8,33	7,78	7,92	7,61	7,05	7,23	7,76	7,21	7,38
Medián	8,35	7,80	7,90	7,60	7,05	7,23	7,75	7,20	7,38
S.odchylka	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03
Minimum	8,30	7,70	7,90	7,60	7,00	7,20	7,75	7,20	7,35
Maximum	8,35	7,80	7,95	7,65	7,10	7,25	7,80	7,25	7,40

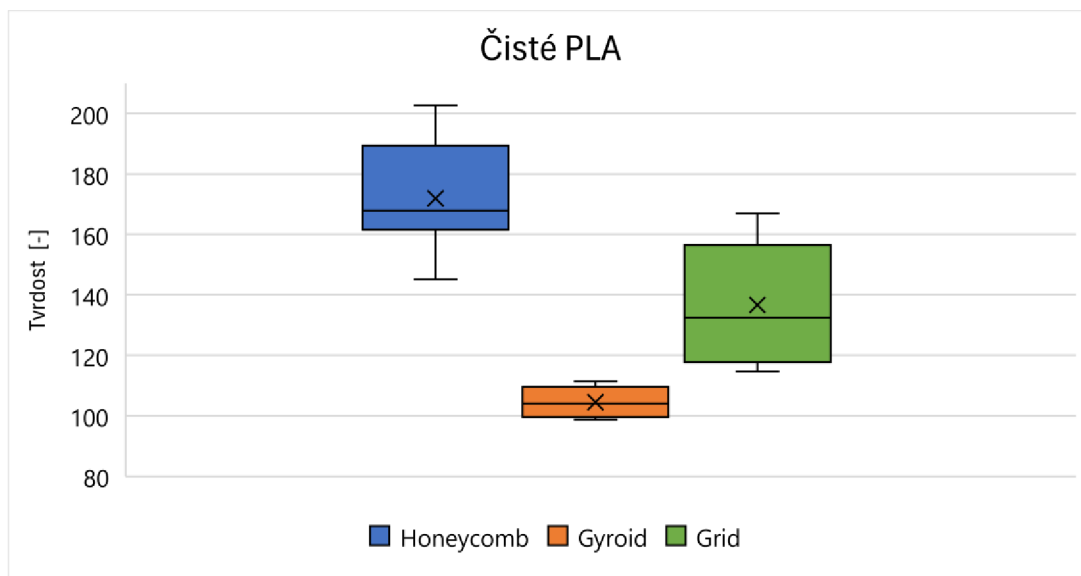
Tab. 2 Statistické vyhodnocení hmotnosti vzorků (vlastní tvorba)

6.2 Vyhodnocení zkoušky tvrdosti

Měření tvrdosti vtlačování kuličky proběhlo na 9 různých variantách, přičemž každá varianta obsahovala 8 vzorků, což celkem představuje 72 měření. Zkoušené vzorky byly zatěžovány stejnou silou 132N a zkoušeny ze stejné strany. Z naměřených hodnot, jež byly zaznamenány v excelové tabulce, byly vypočteny hodnoty jako je aritmetický průměr, směrodatná odchylka a další statické parametry.

6.2.1 Čisté PLA

Jako první byly měřeny vzorky s čistým PLA. Výsledky jsou znázorněny v grafu 2 a zapsány v tabulce 3. Ze získaných dat lze pozorovat, že vliv výplně má významný vliv na tvrdost vzorku. V porovnání s ostatními vzorky s odlišnými plnivými mají tyto vzorky větší rozptyl hodnot. Nejvyšší tvrdosti dosáhly vzorky s výplní honeycomb, následovány vzorky s výplní grid a nejméně tvrdé byly vzorky s výplní gyroid. Tento jev pravděpodobně souvisí s odlišným vrstvením materiálu při různých typech výplní.



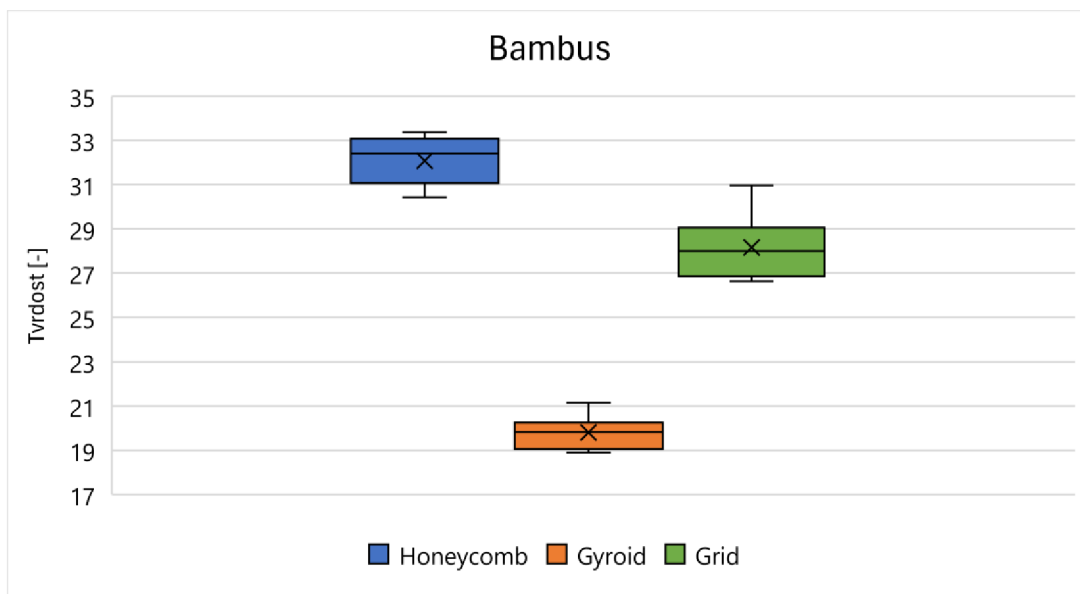
Graf 2 Porovnání výplní – čisté PLA (vlastní tvorba)

Tvrdość [-]	Čisté PLA		
	Honeycomb	Gyroid	Grid
Průměr	171,94	104,55	136,66
Minimum	145,10	98,70	114,70
Maximum	202,70	111,40	167,00
Medián	167,95	104,10	132,40
Směrodatná odchylka	18,69	4,81	19,72
Rozptyl	349,33	23,10	388,89
Variační koeficient	11%	5%	14%
Kvartil Q1	161,45	99,67	117,70
Kvartil Q2	189,40	109,63	156,40

Tab. 3 Statistické vyhodnocení – čisté PLA (vlastní tvorba)

6.2.2 Bambusové plnivo

Dále byly zkoumány vzorky s použitým plnivem bambusu. Jako v předchozím měření jsou data zapsána v tabulce 4 a graficky znázorněna v grafu 3. Z grafu lze pozorovat, že opět vzorky s výplní honeycomb dosahují nejvyšší tvrdosti, následovány vzorky s výplní grid a vzorky gyroid vykazují nejmenší tvrdost. Tyto vzorky vykazují nejmenší rozptyl hodnot mezi zkoumanými vzorky.



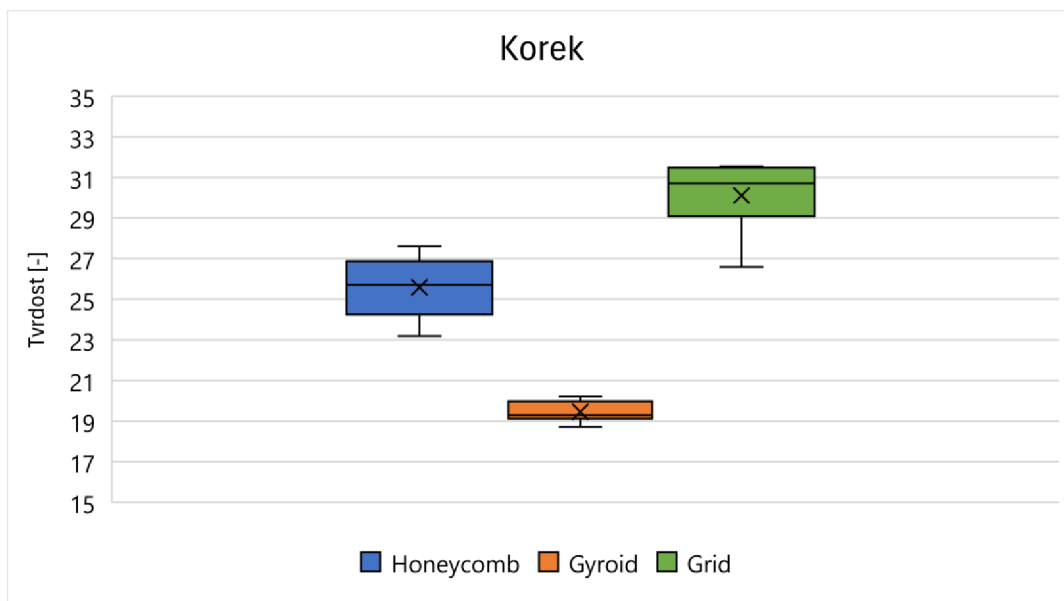
Graf 3 Porovnání výplní – bambusové plnivo (vlastní tvorba)

Tvrlost [-]	Bambus		
	Honeycomb	Gyroid	Grid
Průměr	32,08	19,80	28,16
Minimum	30,43	18,89	26,63
Maximum	33,38	21,15	30,96
Medián	32,42	19,82	28,00
Směrodatná odchylka	1,16	0,57	2,05
Rozptyl	1,08	0,76	1,43
Variační koeficient	3%	4%	5%
Kvartil Q1	31,06	19,06	26,87
Kvartil Q2	33,08	20,26	29,06

Tab. 4 Statistické vyhodnocení – bambusové plnivo (vlastní tvorba)

6.2.3 Korkové plnivo

Posledním sledovaným typem vzorků byly ty s použitím plniva korku. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tab.5 a graficky znázorněny v grafu 4. Z těchto grafů lze vyčíst, že při použití korkového plniva a zachování konzistentních tiskových parametrů pro všechny vzorky vykazuje výplň grid největší tvrdost, následována výplní honeycomb a nejmenší tvrdost vykazovala výplň gyroid. U korkových vzorků je rozptyl hodnot o něco větší než u bambusu, nicméně stále výrazně menší než u čistého PLA.



Graf 4 Porovnání výplní – korkové plnivo (vlastní tvorba)

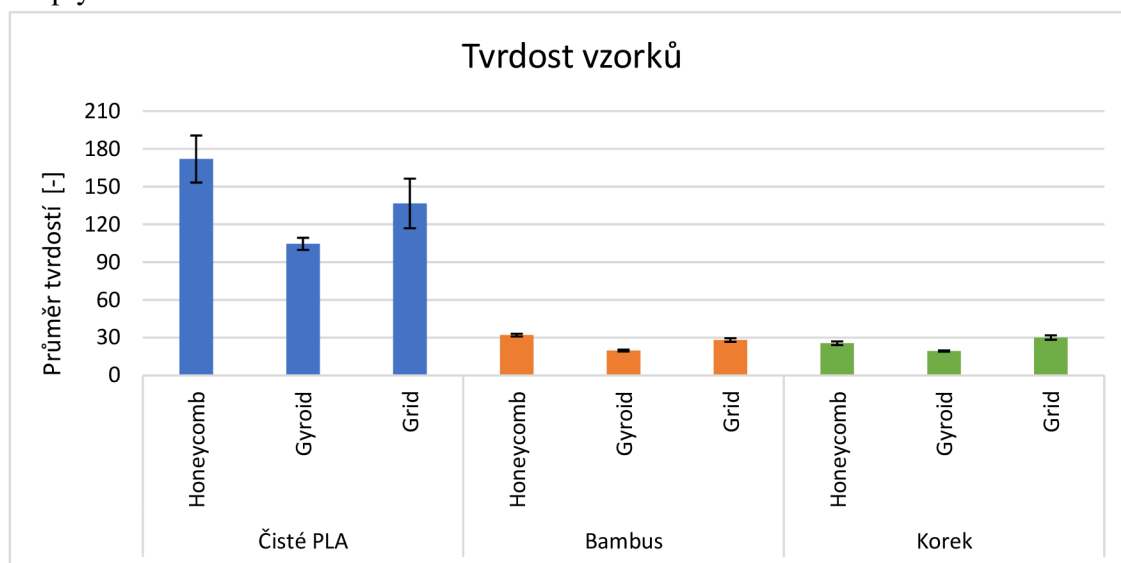
Tvrdost [-]	Korek		
	Honeycomb	Gyroid	Grid
Průměr	25,58	19,46	30,12
Minimum	23,19	18,72	26,59
Maximum	27,61	20,21	31,55
Medián	25,72	19,30	30,71
Směrodatná odchylka	1,57	0,52	1,74
Rozptyl	2,46	0,27	3,04
Variační koeficient	6%	2%	6%
Kvartil Q1	24,24	19,13	29,07
Kvartil Q2	26,88	19,98	31,49

Tab. 5 Statistické vyhodnocení – korkové plnivo (vlastní tvorba)

6.2.4 Porovnání jednotlivých vzorků

Všechny naměřené hodnoty byly graficky znázorněny v grafu 5, který jednoznačně ukazuje, že nejvyšší tvrdost byla dosažena u vzorků vyrobených z čistého PLA. Z výsledků měření lze usoudit, že použití různých plniv a odlišných typů výplní má významný vliv na tvrdost vzorků. U vzorků z čistého PLA a bambusu vykazují největší hodnoty tvrdosti při výplni honeycomb, následované gridem a nakonec gyroidem. U vzorku s korkem dosahovala největší tvrdosti výplň grid, poté honeycomb a jako poslední gyroid. Čisté PLA vykazuje výrazně vyšší tvrdost ve srovnání s ostatními druhy plniv. Tento jev může být způsoben větší homogenitou materiálu a menším výskytem vzduchových bublin. Zároveň je

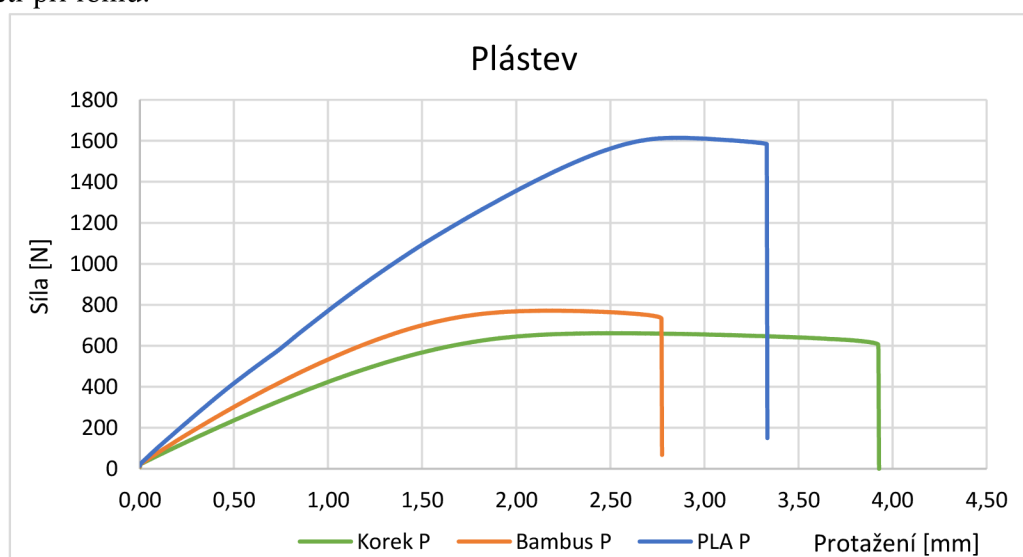
vidět, že výplň typu honeycomb je za použitých tiskových parametrů netvrďší. Nejmenší tvrdost vykazovala výplň typu gyroid bez ohledu na typ plniva, avšak zároveň měla nejvyšší rozptyl hodnot.



Graf 5 Porovnání tvrdosti vzorků (vlastní tvorba)

6.3 Vyhodnocení zkoušky tahem

Naměřené hodnoty byly systematicky zaznamenány v tabulce programu Microsoft Excel a následně podrobeny statistickému vyhodnocení. Během tahové zkoušky byly všechny vzorky testovány až do přetržení, což zajišťovalo soulad s normou ČSN EN ISO 527-2. Tahová zkouška byla prováděna s rychlostí 10 mm/min a celkem bylo testováno 72 vzorků. Během tohoto měření byly sledovány hodnoty pevnosti, tažnosti a napětí při lomu.



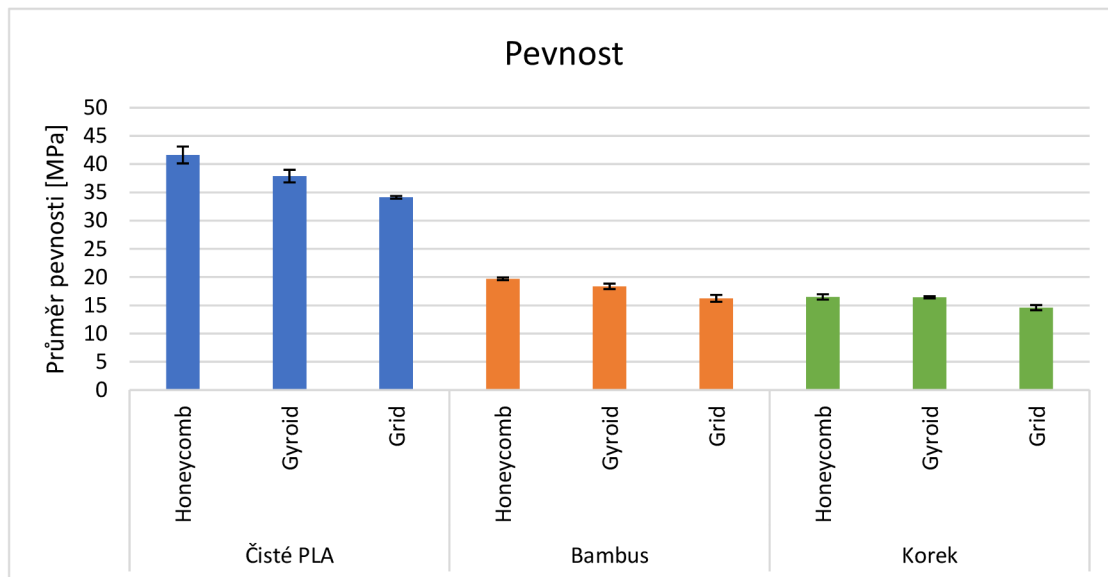
Graf 6 Průběh tahové zkoušky honeycombu (vlastní tvorba)

Porovnání průběhu statické tahové zkoušky s výplní typu honeycomb je zobrazeno v grafu 6, kde byl vybrán průběh nejbližší k průměrné hodnotě pro každý typ plniva. Honeycomb byl zvolen z důvodu jeho schopnosti poskytnout plynulý průběh od meze pevnosti k bodu přetržení. Porovnání ostatních typů výplní je k dispozici v příloze 1,2.

6.3.1 Pevnost

Z naměřených dat bylo provedeno statistické vyhodnocení napětí na mezích pevnosti, následně byla tato hodnota podělena průřezem kolmého řezu S . Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 6 a porovnání pevnosti mezi jednotlivými vzorky je zobrazeno v grafu 7, kde jsou hodnoty vyhodnocené prostřednictvím aritmetického průměru a směrodatné odchylky. Pro výpočet pevnosti byl použit následující vzorec:

$$\sigma_m = \frac{F}{S} = \frac{F}{a * b} = \frac{F [N]}{40 [mm^2]}$$



Graf 7 Vyhodnocení meze pevnosti (vlastní tvorba)

Z grafu lze pozorovat, že vzorky vyrobené z čistého PLA prokázaly nejvyšší pevnostní charakteristiku, zatímco vzorky s korkovým plnivem vykazovaly nejnižší úroveň pevnosti. Vliv použité výplně na pevnostní vlastnosti je zřejmý, a při srovnání jednotlivých typů výplní se ukázalo, že nejvýrazněji pozitivně ovlivňovala pevnost výplň typu

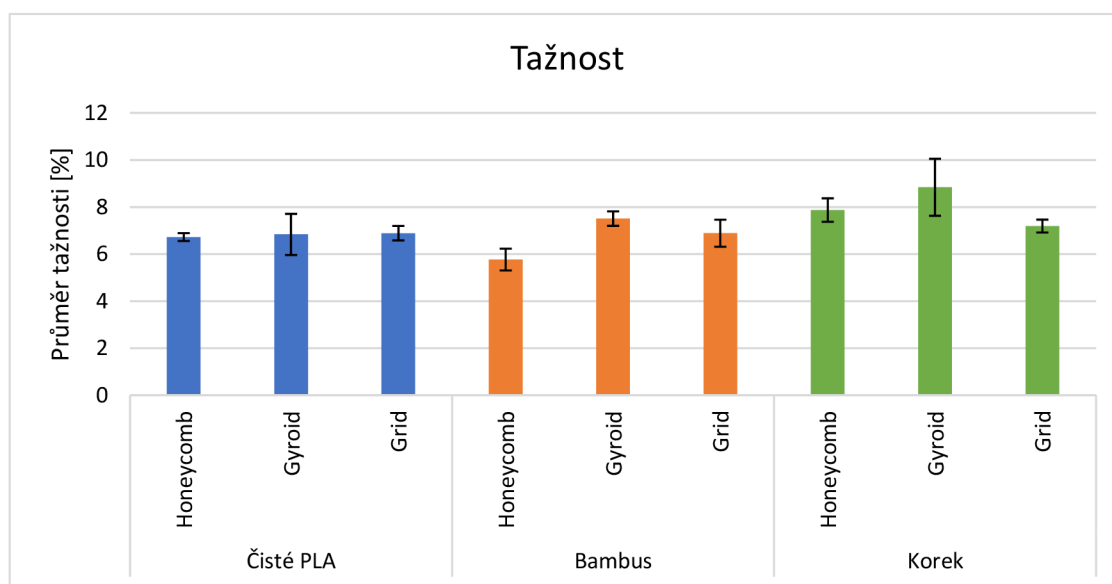
honeycomb, následována výplní typu gyroid, zatímco nejméně efektivní se jevila výplň typu grid. Při srovnání výplně typu honeycomb u vzorků vyrobených z čistého PLA a korku je zajištěn rozdíl ve výsledných hodnotách pevnosti ve výši 60,39 %.

Pevnost [MPa]	Čisté PLA			Bambus			Korek		
	Plástev	Gyroid	Grid	Plástev	Gyroid	Grid	Plástev	Gyroid	Grid
Průměr	41,63	37,89	34,12	19,68	18,36	16,24	16,49	16,43	14,59
Medián	42,35	38,13	34,26	19,69	18,50	16,14	16,49	16,38	14,73
S.odchylka	1,49	1,11	0,24	0,24	0,48	0,61	0,46	0,19	0,46
Rozptyl	89,22	56,44	31,15	2,23	9,15	13,83	8,59	1,43	8,34
Variační koef.	4%	3%	1%	1%	3%	4%	3%	1%	3%
Min	39,19	35,29	32,65	19,29	17,45	15,13	15,88	16,15	13,83
Max	42,93	39,36	35,20	19,99	18,94	17,13	17,10	16,76	15,08
Kvartil Q1	40,08	37,63	33,42	19,53	18,04	16,05	16,01	16,31	14,23
Kvartil Q2	42,67	38,52	34,93	19,86	18,56	16,64	16,98	16,56	14,96

Tab. 6 Vyhodnocení pevnosti (vlastní tvorba)

6.3.2 Tažnost

Hodnoty tažnosti byly přímo získány z měření prostřednictvím softwaru Test&Motion, kde byly zaznamenávány jako procentuální prodloužení AB. Jednotlivé hodnoty byly dále statisticky vyhodnoceny a zaneseny do tabulky 7. Grafické znázornění těchto hodnot je zobrazeno v grafu 8.



Graf 8 Vyhodnocení tažnosti (vlastní tvorba)

Z grafu je zřejmé, že nejvyšší úrovně tažnosti dosahují vzorky s korkovým plnivem. Typ výplně významně ovlivňuje tažnost vzorků. U všech použitých plniv je pozorován rozdíl v tažnosti s ohledem na konkrétní typ výplně. Z naměřených dat vyplývá, že částice korku mají pozitivní efekt na tažnost vzorků. Nejvyšší tažnost byla zaznamenána u vzorků s výplní typu gyroid, následovaných výplní honeycomb a grid. V případě vzorků s bambusovým plnivem vykazovala nejvyšší tažnost opět výplň gyroid, následovaná výplní grid a honeycomb. Vzorky vyrobené z čistého PLA vykazovaly menší citlivost na vliv použité výplně, přičemž výplň grid vykazovala nejlepší výsledky, následovaná výplněmi gyroid a honeycomb.

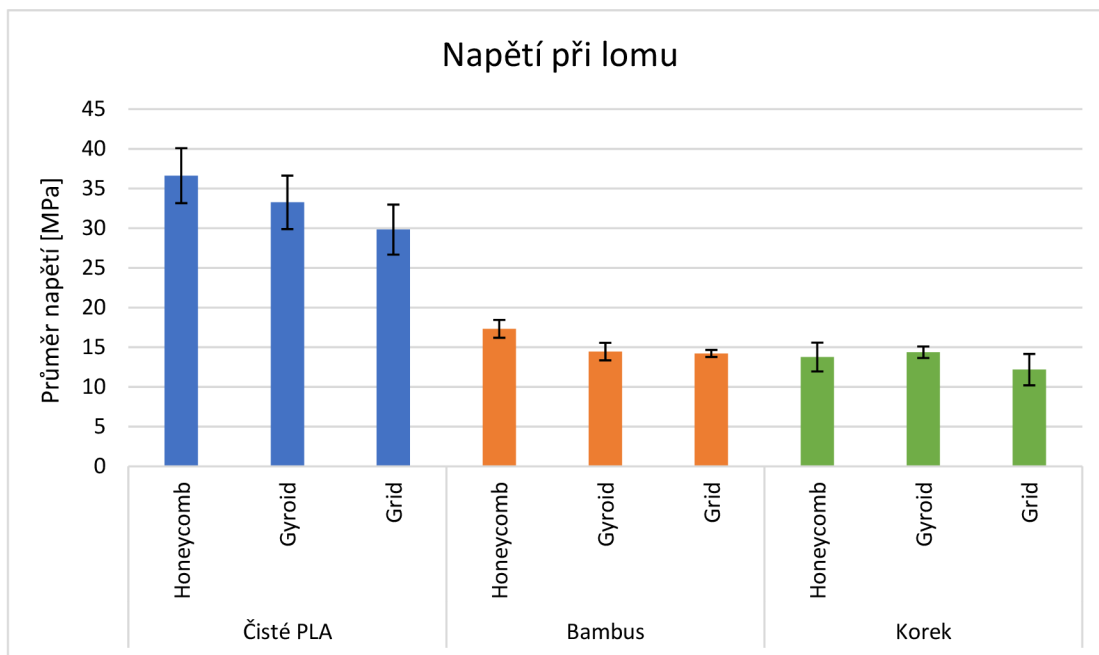
Tažnost [%]	Čisté PLA			Bambus			Korek		
	Honeycomb	Gyroid	Grid	Honeycomb	Gyroid	Grid	Honeycomb	Gyroid	Grid
Průměr	6,72	6,84	6,89	5,77	7,51	6,89	7,87	8,84	7,19
Medián	6,75	6,99	6,99	5,54	7,55	7,15	7,70	8,96	7,34
S. odchylka	0,17	0,87	0,31	0,46	0,31	0,57	0,50	1,21	0,27
Rozptyl	0,03	0,76	0,09	0,21	0,10	0,33	0,25	1,47	0,08
Variační koef.	2%	13%	4%	8%	4%	8%	6%	14%	4%
Min	6,43	4,86	6,30	5,37	7,05	6,33	7,27	6,73	6,79
Max	6,91	7,65	7,28	6,43	7,88	7,93	8,59	10,94	7,43
Kvartil Q1	6,60	6,64	6,68	4,50	7,26	6,52	7,47	8,16	6,82
Kvartil Q2	6,86	7,47	7,07	6,32	7,83	7,65	8,40	9,45	7,41

Tab. 7 Vyhodnocení tažnosti (vlastní tvorba)

6.3.3 Napětí při lomu

Během měření byly též zaznamenány hodnoty napětí při přetržení zkoušeného vzorku. Tyto hodnoty byly statisticky analyzovány a poděleny průřezem kolmého řezu S. Získané údaje byly zdokumentovány v tabulce 8 a graficky zobrazeny v grafu 9. Pro výpočet byl použit následující vzorec:

$$\sigma_p = \frac{F}{S} = \frac{F}{a * b} = \frac{F [N]}{40 [mm^2]}$$



Graf 9 Vyhodnocení pevnosti při přetržení (vlastní tvorba)

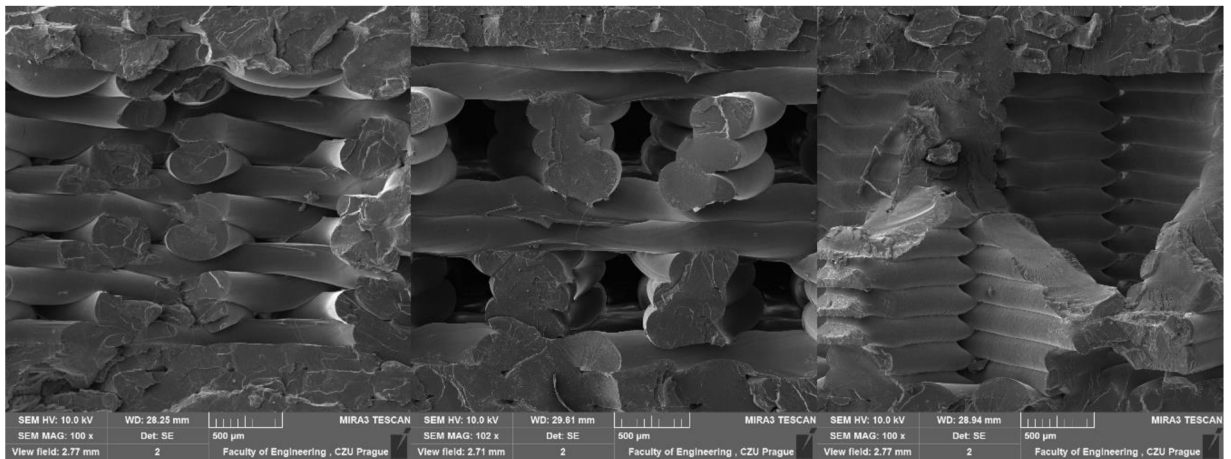
Z grafu je patrné, že vzorky vytvořené z čistého PLA vykazují výrazně vyšší hodnoty napětí při přetržení ve srovnání s ostatními materiály. Mezi vzorky s bambusovým a korkovým plnivem není pozorován tak markantní rozdíl ve srovnání s čistým PLA. U vzorků z čistého PLA a bambusovým plnivem vykazovaly vzorky s výplní typu honeycomb nejvyšší hodnoty napětí, následované vzorky s výplní typu gyroid, zatímco vzorky s výplní typu grid vykazovaly nejnižší hodnoty. Rozdíl mezi vzorky s výplní honeycomb a grid u čistého PLA činil 22,80 %. U vzorků s bambusovým plnivem byl rozdíl mezi výplní honeycomb a grid 21,87 %. Vzorky s korkovým plnivem projevovaly nejvyšší hodnoty napětí při použití výplně typu gyroid, které byly o 17,97 % vyšší než u výplně typu grid.

Napětí při lomu [MPa]	Čisté PLA			Bambus			Korek		
	Honeycomb	Gyroid	Grid	Honeycomb	Gyroid	Grid	Honeycomb	Gyroid	Grid
Průměr	36,62	33,26	29,82	17,33	14,47	14,22	13,77	14,38	12,19
Medián	35,41	34,58	30,72	17,15	13,85	14,50	14,33	14,34	13,33
S.odchylka	3,46	3,37	3,15	1,13	1,10	0,44	1,81	0,73	1,97
Rozptyl	480,10	453,68	396,77	50,87	48,48	116,25	131,28	24,09	155,90
Variační k.	9%	10%	11%	7%	8%	3%	13%	5%	16%
Min	33,30	26,39	23,32	15,90	13,34	10,53	10,36	13,34	9,19
Max	41,89	35,84	33,11	18,91	16,14	16,38	15,99	15,50	13,97
Kvartil Q1	33,91	30,86	27,91	16,38	13,55	13,69	14,78	13,60	10,64
Kvartil Q2	40,17	35,50	31,77	18,47	15,41	15,08	15,19	15,10	13,83

Tab. 8 Vyhodnocení pevnosti při přetržení (vlastní tvorba)

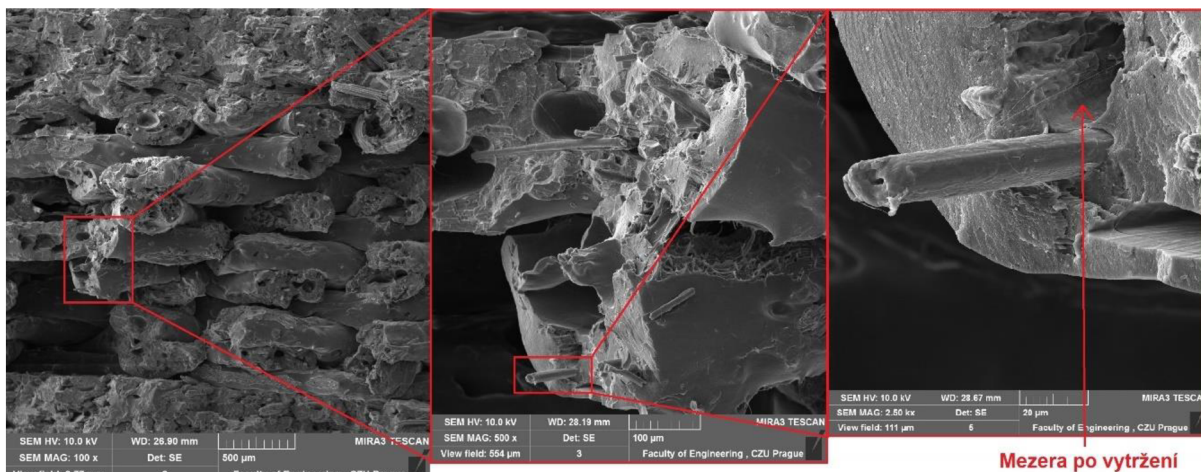
6.4 Vyhodnocení analýzy lomové plochy

Díky využití SEM bylo možné získat detailní pohled na lomovou plochu zkoušených vzorků, na mikrostrukturu materiálu a identifikovat jednotlivé částice plniv ve velkém zvětšení. Analyzované snímky umožnily porovnávat jednotlivé struktury vzorků obsahující různá plniva a výplně. V rámci studie bylo použito ke zkoumání na SEM 9 vzorků. Všechny tyto vzorky byly vytisknuty metodou FDM na 3D tiskárně za stejných parametrů. Při analýze byla vyhodnocována lomová plocha vzorků. Na obr. 33 jsou zobrazeny vzorky čistého PLA se zvětšením 100x. Zde je patrný rozdíl ve struktuře výplně mezi jednotlivými vzorky a také je pozorovatelná hladkost povrchu po lomu.



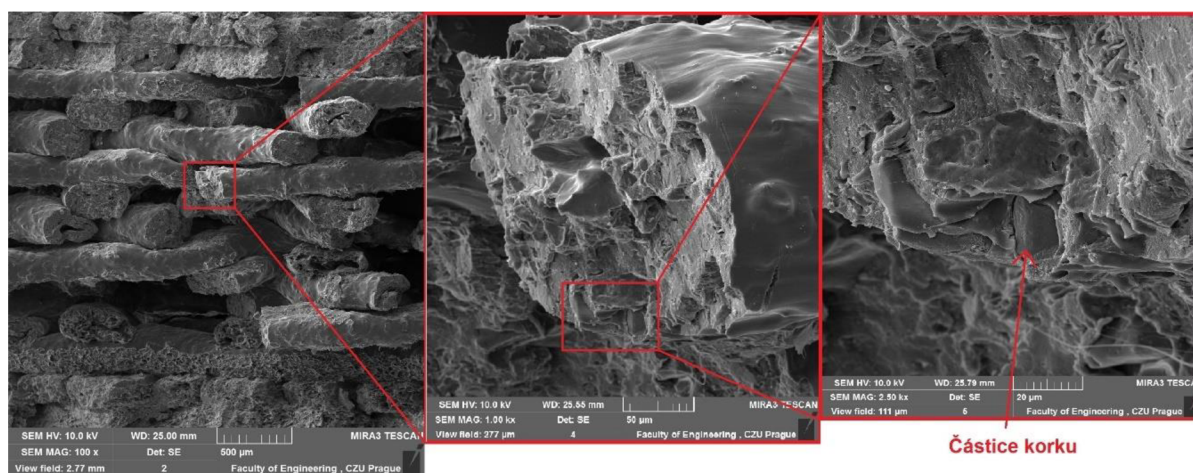
Obr. 33 Rozdílné výplně – vpravo honeycomb, uprostřed gyroid, vpravo grid (vlastní tvorba)

Na následujícím obrázku 34 je znázorněn vzorek při zvětšení 100x, kde je použita výplň honeycomb a bambusové plnivo. Zde je patrný vliv použitého plniva na porozitu struktury, v porovnání s čistým PLA. Jsou zde viditelné vzduchové bubliny a místa, kde došlo k vytržení vláken. V pravé části je zobrazen detail vlákna bambusu s přiblížením 2500x.



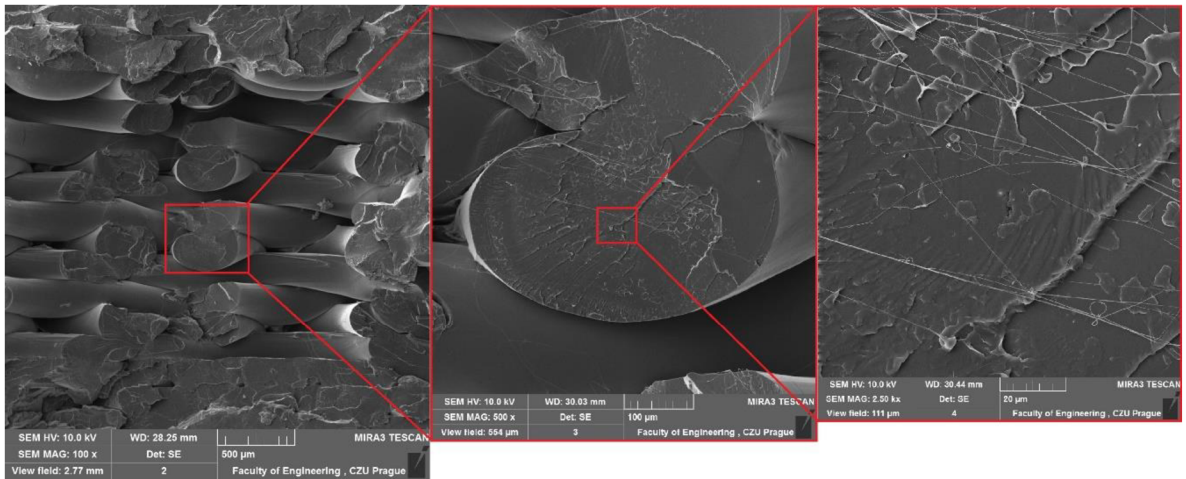
Obr. 34 Detail bambusové struktury (vlastní tvorba)

Při zvětšení 100x jsou na vzorcích s korkem (obr.35) viditelné drobné nerovnosti ve struktuře méně patrné než u vzorků s bambusem, kde jsou nerovnosti větší a výraznější. Při zvětšení 1000x jsou viditelná jednotlivá vlákna korku spojená s okolním materiálem. Při zvětšení na 2500x jsou viditelné částice korku, přes které proběhl lom materiálu během statické tahové zkoušky. Z těchto obrázků je patrné, že částice korku jsou drobnější než částice bambusu.



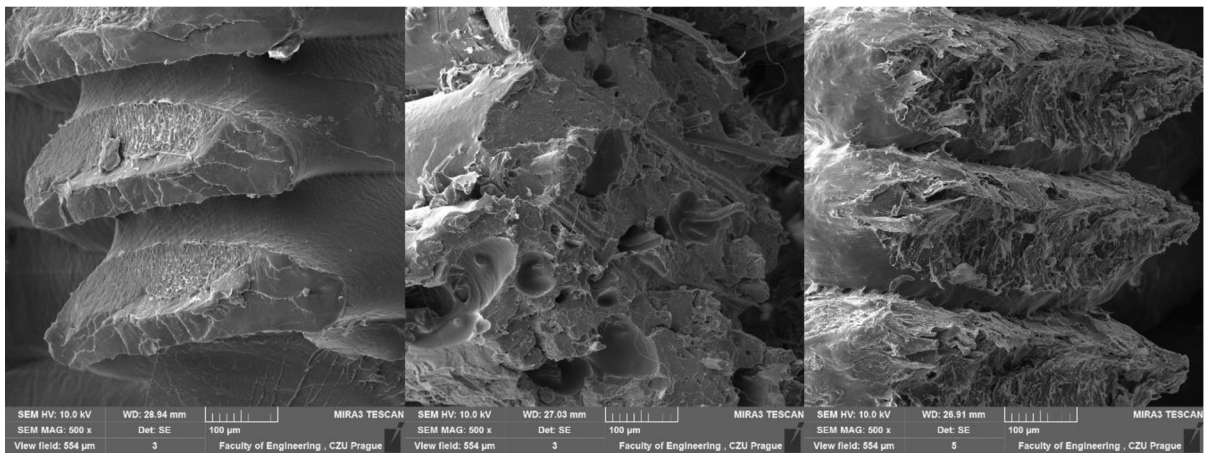
Obr. 35 Detail korkové struktury (vlastní tvorba)

U vzorku z čistého PLA na obr. 36 lze při zvětšení 500x pozorovat celkem hladkou strukturu bez viditelných vzduchových mezer. Hladká plocha naznačuje dobrou homogenitu materiálu a potenciálně vyšší pevnost. Při zvětšení na 2500x je pozorovatelná nepravidelná síť vytržených vláken PLA, která se oddělila během statické tahové zkoušky.



Obr. 36 Detail struktury čistého PLA (vlastní tvorba)

Při porovnávání struktury vzorků s gyroidní výplní při zvětšení 500 a odlišným plnivem je možné pozorovat určité rozdíly. Na levé části obrázku 37 je viditelná celkem hladká struktura vzorku čistého PLA. Ve středu je vzorek, kde jsou dobře pozorovatelná bambusová vlákna, mezery po vytržení a vzduchové bubliny. Napravo je možné vidět vzorek s korkovým plnivem, který má strukturu připomínající „trhanou“ povahu.



Obr. 37 Porovnání struktury u gyroidní výplně (vlastní tvorba)

7 Závěr

Diplomová práce se zaměřuje na výzkum mechanických vlastností vzorků vyrobených z PLA metodou FDM na 3D tiskárně. Cílem práce bylo analyzovat a porovnat dopad jednotlivých typů výplní a plniv na mechanické vlastnosti těchto vzorků. Vzorky byly vytvořeny za stejných tiskových parametrů, přičemž jako plniva byly použity čisté PLA, bambus a korek. Pro výplň byly vybrány vzorky honeycomb, gyroid a grid, které jsou často využívány při technologii 3D tisku. Celkem bylo testováno 72 vzorků. Pro měření mechanických vlastností vzorků byly použity metody zkoušky dle Brinella a statická tahová zkouška. Poté bylo provedeno také vážení vzorků a analýza lomové plochy pomocí SEM. Ze zkoušky tvrdosti vyplývá, že druh plniva má větší vliv na tvrdost než druh výplně, zejména při porovnávání vzorků z čistého PLA s ostatními druhy plniv. V případě srovnávání vzorků z bambusu a korku je pozorovatelnější vliv výplně na tvrdost. Naopak, co se týče pevnosti, je zjištěn větší vliv plniva než výplně. Z měření tažnosti lze pozorovat spojitost mezi pevností a tažností vzorků, kdy vzorky s vyšší pevností mají tendenci být méně tažné a naopak. Co se týče hmotnosti vzorků, je zjištěno, že druh plniva má větší vliv než druh výplně. Rozdíl mezi jednotlivými typy plniv činil necelým gram, zatímco u výplní to bylo přibližně 0,5 gramu.

Vzorky vyrobené z čistého PLA prokázaly při zkoušce tvrdosti nejvyšší hodnoty ve srovnání s ostatními použitými plnivy. Mezi zkoumanými typy výplní dosáhl nejvyšší tvrdosti typ honeycomb díky své struktuře, která poskytuje vzorkům větší odolnost vůči deformaci za cenu delšího času tisku. Vyšší tvrdosti také napomáhá vyšší homogenita materiálu ve srovnání s ostatními druhy plniv, jak je patrné ze snímků získaných ze SEM. Nejnižší tvrdost byla zaznamenána u výplně gyroid. V rámci statické tahové zkoušky bylo zjištěno, že porovnání s ostatními plnivy dosáhla nejvyšší pevnosti výplň honeycomb a zároveň u něj byla naměřena nejnižší tažnost. Zatímco rozdíl v pevnosti byl výraznější v porovnání s ostatními materiály, v tažnosti dosahovaly vzorky z čistého PLA nejnižších hodnot, avšak rozdíl mezi nimi není tak velký. Nejvyšší pevnost byla zaznamenána u výplně typu honeycomb s hodnotou 41,63 MPa, zatímco nejnižší byla u výplně typu grid. Největší tažnost byla dosažena u výplně typu grid a nejméně u výplně honeycomb. Při vážení byly vzorky vyrobené z čistého PLA nejtěžší. Mezi jednotlivými typy výplní dosáhla největší hmotnost výplně typu honeycomb a nejméně hmotná byla výplň typu grid.

Vzorky obsahující bambusové plnivo vykazovaly při zkoušce tvrdosti s výplní typu honeycomb snížení tvrdosti o 81,3% ve srovnání s čistým PLA. Tento pokles tvrdosti je pravděpodobně důsledkem menší homogenity struktury s větším množstvím vzduchových bublin, jak lze pozorovat na snímcích ze SEM. Nejvyšší tvrdost byla dosažena u výplně typu honeycomb, zatímco nejnižší hodnoty byly pozorovány u struktury typu gyroid. V případě tahových zkoušek vykazovala výplň typu honeycomb nejvyšší pevnost s hodnotou 19,68 MPa, což představuje snížení pevnosti o 52,7 % ve srovnání s čistým PLA. Naopak nejnižší hodnoty pevnosti byly zaznamenány u výplně typu grid. Nejvyšší hodnoty tažnosti byly dosaženy u struktury typu gyroid, zatímco nejnižší hodnoty u výplně typu honeycomb. Při srovnání vzorků s obsahem korku a výplní typu gyroid bylo zaznamenáno snížení tažnosti o 15%. Vzorky obsahující bambus vykazovaly nejnižší hmotnost ze všech zkoumaných materiálů, přičemž nejlehčí byla výplň typu gyroid a nejtěžší výplň honeycomb.

Vzorky obsahující korkové plnivo projevily nejnižší tvrdost ve srovnání s ostatními testovanými variantami. Při porovnání s čistým PLA a výplní typu honeycomb vykazovaly vzorky s korkem o 85,1% nižší tvrdost. Největší tvrdost byla dosažena u výplně typu grid, zatímco nejmenší u typu gyroid. V rámci statické tahové zkoušky dosahovaly vzorky s korkovým plnivem nejmenších hodnot. Při srovnání s výplní typu honeycomb s čistým PLA byla naměřena menší pevnost o 60,3%. Největší pevnost byla dosažena u výplně typu honeycomb, a nejméně typu grid. Vzorky obsahující korkové plnivo dosahovali největší tažnosti ze všech testovaných variant, přičemž nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u výplně typu gyroid s hodnotou 8,84%. Naopak, nejnižší tažnost byla zjištěna u výplně typu grid. Při vážení vzorků byly nejtěžší vzorky obsahující výplň typu honeycomb a nejlehčí vzorky byly s výplní gyroid.

Pokud je pro uživatele prioritou vysoká tvrdost, doporučuje se použít čistého PLA v kombinaci s výplní typu honeycomb, která poskytuje nejvyšší tvrdost. Naopak, pokud je důležitější flexibilita a tažnost materiálu, mohou být vhodnější alternativy obsahující bambusové nebo korkové plnivo. Při volbě výplně je nutné zvážit kompromis mezi pevností a tažností. Výplň typu honeycomb poskytuje nejvyšší pevnost, ale zároveň vykazuje nižší tažnost. Naopak, výplň typu grid může být vhodná pro aplikace, kde je důležitější tažnost materiálu. Důležité je také brát v úvahu hmotnost tisknutých vzorků. Kombinace plniva a

výplně ovlivňuje celkovou hmotnost tisknutého produktu, což může být důležité pro určité aplikace, jako je například lehká konstrukce nebo minimalizace materiálových nákladů. Pokud je pro uživatele důležitá rychlost tisku, měl by zvážit výplň typu grid, která nabízí nejkratší dobu ze zkoušených variant. To je zejména relevantní pro situace, kde je potřeba tisknout více objektů.

Vhodné by bylo podrobit tyto vzorky dalším mechanickým zkouškám, jako je např. zkouška cyklické únavy. Dále by bylo možné provést zkoušky na UV degradaci, ke zjištění vlivu slunečního záření na stabilitu materiálu a jeho odolnosti vůči degradaci v prostředí s UV zářením. Tyto zkoušky by přispěly k ještě podrobnějšímu shrnutí vlastností materiálu a jeho vhodnosti pro různé aplikace. Porovnání vlastností materiálů založených na různých plnivech, včetně ekologických variant jako je bambus a korek, může posílit snahy o udržitelnější výrobu a spotřebu materiálu.

8 Seznam použitých zdrojů

3D Printing Industry - The Free Beginner's Guide [online]. 2017 [cit. 24.01.2024]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>

Běhálek, Luboš, Pavel Brdlík, Martin Borůvka a Irena Lenfeldová. Úvod do technologií zpracování plastů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-460-4.

Běhálek, Luboš – Polymery. Verze knihy: 15. [online] 2015. ISBN 978-80-88058-66-3. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>

Bioplastics Europe – What are "Bio-plastics" [online]. 2020 [cit. 1.11.2023]. Dostupné z: <https://bioplasticseurope.eu/about>

Bioplastics Europe – What are bioplastics? [online]. 2022 [cit. 1.11.2023]. Dostupné z: https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf

Boretti Alberto – A techno-economic perspective on 3D printing for aerospace propulsion, Journal of Manufacturing Processes [online]. 2024, Vol. 109, [cit. 3.2.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.12.044> ISSN 1526-6125

ČSN EN ISO 527-2. Plasty – Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012

ČVUT – Historie 3D tisku - [online]. 2014 [cit. 24.01.2024]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/historie-3d-tisk/>

Ducháček, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.

Engineering [online]. 2024, Vol. 370, [cit. 29.01.2024] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.111973> ISSN 0260-8774

Evropská komise. Zelená dohoda pro Evropu. [online]. 2022 [cit.1.10.2023]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/cs/ip_22_7155

Evropská komise – Evropská strategie pro plasty v oběhovém hospodářství [online] 2018. [cit. 11.02.2024] Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028>

Flávio Craveiro, et.al. - Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0, Automation in Construction [online]. 2019, Vol. 103, [cit. 27.01.2024] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011> ISSN 0926-5805

France, Anna Kaziunas. Make: 3D printing, Sebastopol: Maker Media, 2013. ISBN 978-1-457-18293-8.

Gibson Ian, David Rosen, Brent Stucker – Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, Springer, New York, 2015 Vol. 2, ISBN 978-1-4939-2112-6

Heinrich-Böll-Stiftung – Atlas plastů: fakta a čísla o světě syntetických polymerů. Druhé vydání. Přeložil Sára Foitová. [Praha]: 2020. ISBN 978-80-88289-21-0.

Hluchý, Miroslav; Kolouch, Jan a Paňák, Rudolf – Strojírenská technologie 2. Praha: Scientia, 2001. Vol.2 ISBN 80-7183-244-8.

Chandankar Damini – The Pros and Cons of Different Plastic Manufacturing Techniques [online] 2023. [cit. 18.02.2024] Dostupné z: <https://www.deskera.com/blog/the-pros-and-cons-of-different-plastic-manufacturing-techniques/>

Jiaxuan Liu, et.al. - Current status and challenges in the application of microbial PHA particles, [online]. 2023, Vol. 87, [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.08.011> ISSN 1674-2001

Jingfu Pan, et.al - Design and development of dual-extruder food 3D printer based on selective compliance assembly robot arm and printing of various inks, Journal of Food

Kakabadze Giorgi – Anisotropic behaviour analysis of 3D printed structures [online]. 2020 [cit. 31.1.2024]. Dostupné z: 10.13140/RG.2.2.13651.40484

Kliem, Silvia, Marc Kreutzbruck a Christian Bonten - Review on the Biological Degradation of Polymers in Various Environments. Materials [online]. 2020, 13(20), 4586. [cit. 17.11.2023]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/20/4586>. ISSN 1996-1944.

Kloski Liza Wallach, Nick Kloski, - Getting Started with 3D Printing - San Francisco: Maker Media Vol.2, 2021 ISBN: 9781680456431

Lenfeld, Petr. Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů. Technologie II, tváření kovů & zpracování plastů. Technická univerzita Liberec. [online] 2005 [Citace: 10. 1. 2024.]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm

Marius Murariu, Philippe Dubois – PLA composites: From production to properties, Advanced Drug Delivery Reviews, [online]. 2016, Vol.107 [cit. 18.11.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.003> ISSN 0169-409X

Menken Ivanka – 3D printing: complete certification kit Brisbane: Art of service, 2012, ISBN 978-1-4864-5645-1.

Muhammad Waseem, Asad Ullah Tahir, Yaqoob Majeed - Printing the future of food: The physics perspective on 3D food printing, Food Physics, [online]. 2023, Vol, 1, [cit. 29.01.2024] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.foodp.2023.100003> ISSN 2950-0699

Niha Sultana, et.al. - 3D Printing in pharmaceutical manufacturing: Current status and future prospects, *Materials Today Communications* [online]. 2024, Vol. 38, [cit. 27.01.2024] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107987> ISSN 2352-4928

Nilsen-Nygaard, et al. - Current status of biobased and biodegradable food packaging materials: Impact on food quality and effect of innovative processing technologies [online]. 2021 [cit. 17.11.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12715>

No Greenwashing – Bioplasty – řešení plastové krize nebo další problém navíc? [online]. 2021. [cit. 30.10.2023]. Dostupné z: <https://www.nogreenwashing.cz/webinar/bioplasty-reseni-plastove-krize-nebo-dalsi-problem-navic/>

Noorani, Rafiq - 3D printing: technology, applications, and selection. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2018]. ISBN 9781315155494.

Ondřej Stříteský – Základy 3D tisku s Josefem Průšou - [online]. 2019, [cit. 24.01.2024]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/ped/jaro2021/TI9009/111101390/zaklady-3d-tisku.pdf>

Plastic Europe – Bio-based and biodegradable plastics [online]. 2023 [cit. 20.10.2023]. Dostupné z: <https://plasticseurope.org/sustainability/climate/circular-feedstocks/bio-based-and-biodegradable-plastics/>

Plastic Europe – Compostable and environmentally biodegradable plastics [online]. 2023 [cit. 6.11.2023]. Dostupné z: <https://plasticseurope.org/sustainability/climate/circular-feedstocks/compostable-and-environmentally-biodegradable-plastics/>

Plastic Europe – Thermoplastics [online]. 2023 [cit. 22.10.2023]. Dostupné z: <https://plasticseurope.org/plastics-explained/a-large-family/thermoplastics/>

Plastic Soup Foundation – Plastic additives & BPA - [online]. 2019 [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.plasticsoupfoundation.org/en/plastic-problem/what-is-plastic/plastic-additives-bpa/>

Radius – Is PLA Biodegradable and Compostable? [online]. 2022 [cit. 6.11.2023]. Dostupné z: https://madebyradius.com/blogs/good-to-know/is-pla-biodegradable-and-compostable?_pos=1&_sid=77697e244&_ss=r

Rahul M. Rasal, Amol V. Janorkar, Douglas E. Hirt, - Poly(lactic acid) modifications, [online]. 2010, Vol. 35, no. 3, [cit. 18.11.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003> ISSN 0079-6700

Replastuj – Efektivní recyklace dává smysl [online] 2023. [cit. 11.02.2024] Dostupné z: <https://www.replastuj.cz/blog/efektivni-recyklace-dava-smysl>

Rhoda Afriyie Mensah, et.al. - A review of sustainable and environment-friendly flame retardants used in plastics, [online]. 2022, Vol. 108 [cit. 22.1.2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107511> ISSN 0142-9418

Romani Alessia, Suriano Raffaella, Levi Marinella. Biomass waste materials through extrusion-based additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. [online]. 2023, vol.386, 135779 [cit.1.10.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135779> ISSN 0959-6526

Svaz moderní energetiky – Spojujeme chytrá řešení pro růst české ekonomiky [online]. 2018 [cit. 6.11.2023]. Dostupné z: https://www.modernienergetika.cz/wp-content/uploads/2019/03/Infomaterial_Plastova_strategie-1.pdf

Svět hardware – 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? [online]. Brno: OXyShop s.r.o. 2019 [cit. 31.1.2024]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>

Teixeira, Stefanie et.al. - Towards Controlled Degradation of Poly(lactic) Acid in Technical Applications. [online]. 2021, 7(2), 42. [cit. 17.11.2023]. ISSN 2311-5629. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/c7020042>

Torta Stephanie, Jonathan Torta – 3D printing An Introduction, Mercury Learning and Information, Dulles, 2019, ISBN-13: 978-1683922094

Williams Chris - The Plastic Forming & Manufacturing Process [online] 2018. [cit. 18.02.2024] Dostupné z: <https://www.starrapid.com/blog/the-top-7-ways-of-forming-plastics/>

Wimpenny Ian David, Pandey M. Pulak, Kumar L. Jyothish (ed.) - Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2017, ISBN 978-981-10-0811-5

Zeman, Lubomír. Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada, 2018. ISBN 978-80-247-2818-6. Dostupné také z: <https://www.bookport.cz/kniha/vstrikovani-plastu-4633/>

Žur-Pińska Joanna, et.al. Smart and sustainable: Exploring the future of PHAs biopolymers for 3D printing in tissue engineering, *Sustainable Materials and Technologies* [online]. 2023, Vol. 38 [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00750> ISSN 2214-9937

9 Seznam obrázků

Obr. 1 Biologická degradace různých polymerů v různých prostředích	8
Obr. 2 Druhy plastů	9
Obr. 3 Cyklus zpracování PHA ukazující udržitelnost přístupu.....	14
Obr. 4 Vytisknutý model v 3D tisku	17
Obr. 5 Vytisknutý dům za 48h Milán	19
Obr. 6 Využití 3D tisku v biomedicíně.....	20
Obr. 7 Hlavní metody 3D tisku potravin	22
Obr. 8 Spalovací komora	23
Obr. 9 Postup 3D tisku.....	24
Obr. 10 ukázka rozřezaného 3D modelu	25
Obr. 11 FDM tiskárna	28
Obr. 12 Schéma konstrukcí FDM tiskáren	30
Obr. 13 Extruder FDM tiskárny.....	30
Obr. 14 Přímý a Bowdenový krokový pohon	32
Obr. 15 druhy ozařování pryskyřice	34
Obr. 16 SLS tisk.....	34
Obr. 17 Náčrt zkušebního tělesa	36
Obr. 18 Druhy výplní: Honeycomb, Gyroid, Grid	36
Obr. 19 PrusaSlicer v.2.7.1	37
Obr. 20 Prusa i3 MK3S.....	37
Obr. 21 Průběh tisku	38
Obr. 22 Roztříděné vzorky.....	38
Obr. 23 Posuvné měřítko	39
Obr. 24 Uskladnění vzorků se silikagelem	39
Obr. 25 Váha KERN GAB 6K0.05 N.....	40
Obr. 26 Tvrdoměr DuraJet G5 a průběh zkoušek tvrdosti.....	40
Obr. 27 Zkušební stroj LabTest 5.50ST	41
Obr. 28 Uchycení zkušební vzorku.....	42
Obr. 29 Program Test&Motion.....	42
Obr. 30 Upravené vzorky.....	43
Obr. 31 Nanášecí přístroj Quorum Q150Res.....	43

Obr. 32 Mikroskop TESCAN MIRA3	44
Obr. 33 Rozdílné výplně – vpravo honeycomb, uprostřed gyroid, vpravo grid	55
Obr. 34 Detail bambusové struktury	56
Obr. 35 Detail korkové struktury	56
Obr. 36 Detail struktury čistého PLA	57
Obr. 37 Porovnání struktury u gyroidní výplně	57

10 Seznam tabulek

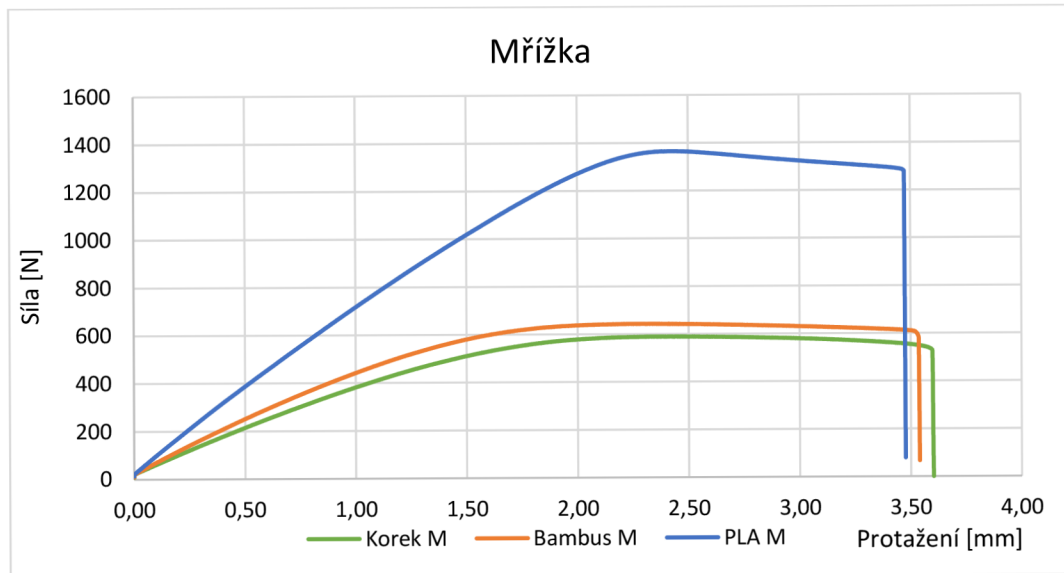
Tab. 1 Parametry nanášení	44
Tab. 2 Statistické vyhodnocení hmotnosti vzorků	46
Tab. 3 Statistické vyhodnocení – čisté PLA	47
Tab. 4 Statistické vyhodnocení – bambusové plnivo	48
Tab. 5 Statistické vyhodnocení – korkové plnivo	49
Tab. 6 Vyhodnocení pevnosti	52
Tab. 7 Vyhodnocení tažnosti	53
Tab. 8 Vyhodnocení pevnosti při přetržení	54

11 Seznam grafů

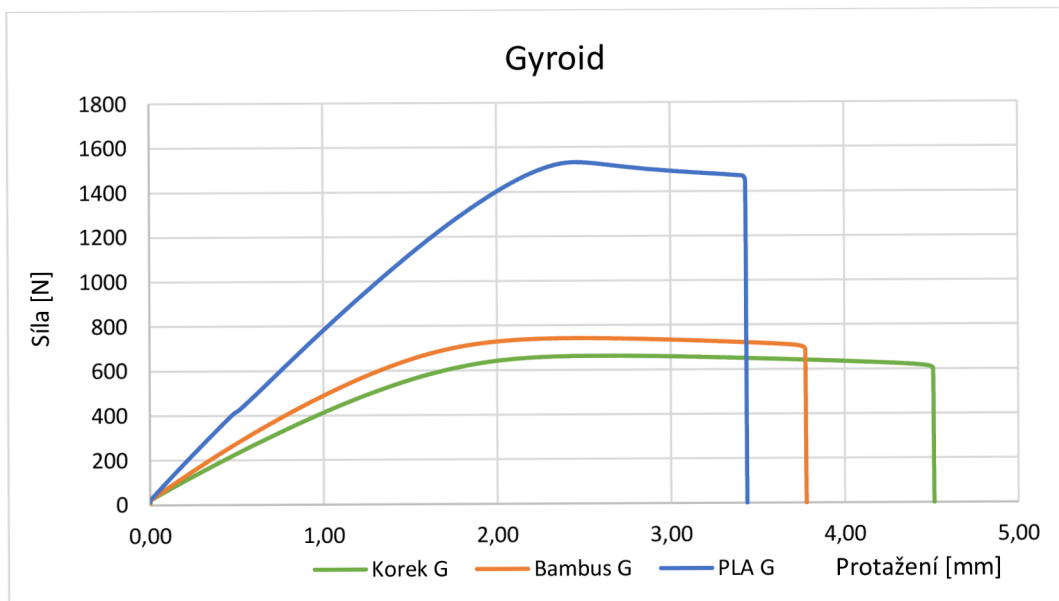
Graf 1 Porovnání hmotnosti vzorků	45
Graf 2 Porovnání výplní – čisté PLA	47
Graf 3 Porovnání výplní – bambusové plnivo	48
Graf 4 Porovnání výplní – korkové plnivo	49
Graf 5 Porovnání tvrdosti vzorků	50
Graf 6 Průběh tahové zkoušky honeycombu	50
Graf 7 Vyhodnocení meze pevnosti	51
Graf 8 Vyhodnocení tažnosti	52
Graf 9 Vyhodnocení pevnosti při přetržení	54

12 Přílohy

Příloha 1 Průběh tahové zkoušky gridu.....	67
Příloha 2 Průběh tahové zkoušky gyroиду.....	67



Příloha 1 Průběh tahové zkoušky gridu (vlastní tvorba)



Příloha 2 Průběh tahové zkoušky gyroиду (vlastní tvorba)