



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Technická
fakulta**

**Zjišťování tepelné vodivosti prvků s vnitřní strukturou
vyrobenou 3D tiskem z filamentů s příměsmi
organických materiálů**

Diplomová práce

Katedra mechaniky a strojnictví

Autor práce: Bc. Jan Čapek

Obor: Zemědělská technika

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

PRAHA 2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Čapek

Zemědělská technika

Název práce

Zjišťování tepelné vodivosti prvků s vnitřní strukturou vyrobenou 3D tiskem z filamentů s příměsí organických materiálů

Název anglicky

Determination of the thermal conductivity of elements with internal structure made by 3D printing from filaments with admixtures of organic materials

Cíle práce

Návrh vnitřní struktury prvků pro 3D tisk s cílem zvýšit jejich tepelné izolační vlastnosti. Určení tepelné vodivosti prvků vyrobených z filamentů obsahujících organické materiály. Návrh a ověření úprav pro zlepšení jejich tepelné izolačních vlastností.

Metodika

1. Struktura práce by se co nejvíce měla přiblížit schématu:

- A. Úvod
- B. Materiál a metody
- C. Výsledky
- D. Diskuse
- E. Závěr

V práci lze připustit sloučení bodů diskuse a závěr.

2. Rešeršní část by měla charakterizovat materiály používané pro technologii 3D tisku, jejich tepelnou vodivost a metody jejího stanovení. Kapitola materiál a metody by měla upřesnit vnitřní strukturu a tvar testovaných prvků a metody zvolené pro stanovení tepelné vodivosti. V diskusi by měly být naznačeny trendy v uplatňování prvků vyrobených 3D tiskem z filamentů plně rozložitelných a z filamentů s příměsí organických materiálů.

3. Práci je vhodné doplnit fotografiemi, schématy, grafy a tabulkami. Jednotlivé kapitoly a podkapitoly práce, rovnice, tabulky a obrázky je nutno číselně označovat a na toto značení se v textu odkazovat. Nedílnou součástí práce je i obsah, abstrakt, seznam použitých zkratk a symbolů, obrázků, tabulek a literatury. Další pokyny ke zpracování diplomové práce jsou zveřejňovány na webu Technické fakulty.

Práce může být doplněna přílohami.

4. Při vypracování diplomové práce je nutno dbát na respektování citačních pravidel dle ČSN ISO 690:2011.

5. Vedoucího práce je nutno čtvrtletně seznamovat s postupem zpracování zadaného tématu.



Doporučený rozsah práce

50 stran

Klíčová slova

filament s obsahem organických materiálů, izolační materiál, tepelná vodivost, tepelný odpor

Doporučené zdroje informací

Almuallim, B., Harun, W.S.W., Al Rikabi, I.J. et al. Thermally conductive polymer nanocomposites for filament-based additive manufacturing. *Journal of Material Science* 2022, 57, 3993–4019.

<https://doi.org/10.1007/s10853-021-06820-2>

Atakok, G.; Kam, M.; Koc, H. B. A Review of Mechanical and Thermal Properties of Products Printed with Cycled Filaments for use in 3D Printers. *Surface Review and Letters* 2022, 29 (2).

<https://doi.org/10.1142/S0218625X22300027>.

Dey, A.; Eagle, R. I. N.; Yodo, N. A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2021, 5 (3), DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp5030069>.

Laureto, J., Tomasi, J., King, J.A. et al. Thermal properties of 3-D printed polylactic acid-metal composites.

Progress in Additive Manufacturing 2017, 2, 57–71. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0019-x>

Weng, Z.; Wang, J.; Senthil, T.; Wu, L. Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials and Design* 2016, 102, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.045>

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra mechaniky a strojnictví

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2023

doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 26. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Zjišťování tepelné vodivosti prvků s vnitřní strukturou vyrobenou 3D tiskem z filamentů s příměsmi organických materiálů" 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 28. 3. 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Pavlu Neubergerovi Ph.D. za ochotu, trpělivost, obětovaný čas a odborné vedení při psaní diplomové práce. Poděkovat by chtěl také své rodině a Marušce za podporu při studiu a v životě.

Zjišťování tepelné vodivosti prvků s vnitřní strukturou vyrobenou 3D tiskem z filamentů s příměsmi organických materiálů

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na zkoumání tepelně izolačních a mechanických vlastností prvků vyrobených z filamentů obsahujících organické příměsi. Cílem práce bylo navrhnout a experimentálně ověřit postupy, které by mohly vést ke zlepšení tepelně izolačních vlastností vyrobených součástí. Měření probíhalo na vzorcích vyrobených 3D tiskem metodou FDM ze tří různých filamentů. Každý použitý filament obsahoval jiné organické příměsi. K měření tepelných vlastností byl použit přístroj ISOMET 2104 a mechanické vlastnosti byly zkoušeny na trhacích strojích Labortech MPTest 5.050 a Tempos ZDM 50. Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a zobrazeny pomocí grafů a tabulek. Z naměřených hodnot je patrné, že součinitel tepelné vodivosti je přímo úměrný hustotě vnitřní výplně. Tato závislost byla ověřena prostřednictvím korelační a regresní analýzy. Zkoušky tlakových vlastností odhalily, že s poklesem hustoty vnitřní výplně klesá i mez pevnosti v tlaku vyrobených součástí. Opačná závislost byla sledovaná při měření tahových vlastností. Možné vysvětlení těchto jevů spolu s porovnáním naměřených hodnot s odbornou literaturou bylo popsáno v diskuzi.

Klíčová slova: 3D tisk, filament s obsahem organických materiálů, izolační materiál, tepelná vodivost, tepelný odpor

Determination of the thermal conductivity of elements with internal structure made by 3D printing from filaments with admixtures of organic materials

Abstract

This thesis focuses on the investigation of thermal insulation and mechanical properties of components made from filaments containing organic admixtures. The aim of the thesis was to propose and experimentally verify procedures that could lead to an improvement of the thermal insulation properties of the manufactured components. The measurements were performed on samples made by 3D printing using the FDM method from three different filaments. Each used filament contained different organic admixtures. The ISOMET 2104 was used to measure the thermal properties and the mechanical properties were tested on Labortech MPTest 5.050 and Tempos ZDM 50 testing machines. The measured values were statistically processed and displayed using graphs and tables. The measured values show that the thermal conductivity coefficient is directly proportional to the density of the internal filling. This dependence was verified by correlation and regression analysis. The compressive properties tests revealed that the compressive strength of the manufactured components decreases as the density of the inner infill decreases. The opposite dependence was observed for the tensile properties. Possible explanations for these phenomena, together with a comparison of the measured values with the literature, have been discussed.

Keywords: 3D print, filament containing organic materials, thermal conductivity, thermal resistance, insulation material

Obsah

1. Úvod	11
2. 3D tisk	12
2.1. Historie a současnosti 3D tisku	12
2.1.1. Počátky technologií aditivní výroby	12
2.1.2. Další rozvoj aditivní výroby	14
2.2. Technologie 3D tisku.....	14
2.3. Metoda tisku FDM.....	14
2.3.1. Proces FDM tisku	15
2.3.2. Materiály užívané pro FDM tisk.....	16
2.3.2.1. PLA.....	17
2.3.2.2. PETG.....	18
2.3.2.3. ABS	19
2.3.2.4. ASA	20
2.3.2.5. PC	20
2.3.2.6. Flexibilní materiály.....	20
2.3.2.7. Kompozitní materiály s organickou složkou	21
2.4. Metoda tisku SLA.....	22
2.4.1. Proces SLA tisku	22
2.4.2. Materiály užívané pro SLA tisk.....	23
2.5. Metoda tisku SLS	24
2.5.1. Proces SLS tisku	24
2.5.2. Materiály užívané pro SLA tisk.....	24
2.6. Tepelná vodivost 3D tištěných objektů	25
2.6.1. Tepelná vodivost běžně používaných filamentů.....	25
2.6.2. Tepelná vodivost filamentů s organickými přísadami.....	26
3. Tepelná vodivost	28
3.1. Sdílení tepla	28
3.1.1. Sdílení tepla vedením	28
3.1.2. Sdílení tepla prouděním.....	28
3.1.3. Sdílení tepla zářením	29
3.2. Tepelná vodivost.....	29
4. Materiál a metody	31
4.1. Použité vzorky	31
4.1.1. Výběr materiálů	31
4.1.1.1. WoodJet.....	32

4.1.1.2. Biofil Wood	32
4.1.1.3. Timberfill.....	33
4.1.2. Rozměry a vlastnosti vzorků	33
4.1.2.1. Rozměry vzorků pro měření tepelné vodivosti a tlakových vlastností .	33
4.1.2.2. Rozměry vzorků pro měření tahových vlastností	34
4.1.3. Tisková nastavení vzorků	35
4.1.3.1. Nastavení vzorků pro měření tepelné vodivosti a tlakových vlastností	36
4.1.3.2. Nastavení vzorků pro měření tahových vlastností.....	38
4.2. Použité přístroje.....	39
4.2.1. Original Prusa MINI+.....	39
4.2.2. ISOMET 2104	40
4.2.3. ALMEMO 2890-9 a FHAD 46-41	41
4.2.4. Další použité přístroje.....	42
4.3. Postup měření	43
4.3.1. Měření teplotních vlastností	43
4.3.2. Měření tlakových vlastností.....	43
4.3.3. Měření tahových vlastností.....	44
4.4. Statistické vyhodnocení.....	45
4.4.1. Vyhodnocení tepelné vodivosti	45
4.4.2. Vyhodnocení tlakových vlastností.....	45
4.4.3. Vyhodnocení tahových vlastností.....	45
5. Výsledky.....	46
5.1. Výsledky měření tepelné vodivosti	46
5.1.1. Korelační a regresní analýza.....	46
5.1.1.1. Jednoduchá regrese.....	47
5.1.1.2. Vícenásobná regrese	47
5.2. Výsledky zkoušek tlakových vlastností.....	49
5.3. Výsledky zkoušek tahových vlastností.....	50
6. Diskuze	51
7. Závěr.....	55
Seznam použitých zdrojů	56
Seznam obrázků.....	62
Seznam tabulek.....	63
Seznam grafů	63
Přílohy	64

1. Úvod

Aditivní výroba, známá také jako 3D tisk, nabývá na stále větší popularitě jako alternativa oproti konvenčním, subtraktivním metodám výroby. Výrobní proces 3D tisku probíhá postupným nanášením materiálu po jednotlivých vrstvách na sebe. Tímto způsobem lze tvořit komplexní geometrie s minimálními ztrátami materiálu. Jako jedno z možných využití této technologie se nabízí přizpůsobitelná výroba prvků pro tepelnou izolaci.

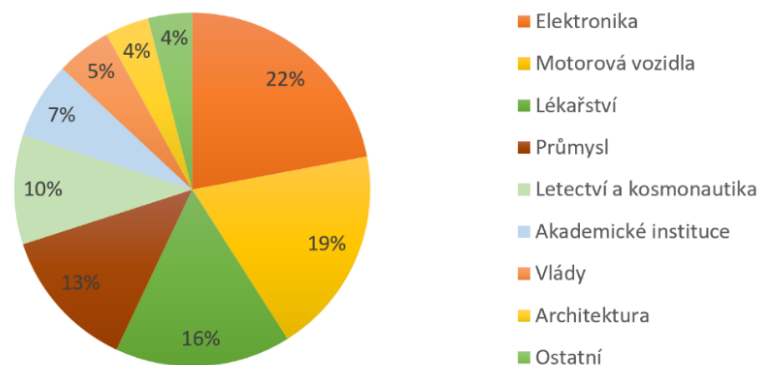
Mezi nejpoužívanější technologie aditivní výroby patří metoda FDM (Fused Deposition Modeling), při které je výrobek vytvářen pomocí roztaveného tiskového vlákna (filamentu). Touto metodou lze vyrábět prvky s přesně zvolenou vnitřní strukturou, která má přímý vliv na tepelnou vodivost vytištěné součásti (Aw et al., 2018; Lopes et al., 2023; Islam et al., 2023). Dalšího zlepšení tepelně izolačních vlastností by mohlo být dosaženo úpravou tiskového materiálu, například přidáním látek s lepšími izolačními vlastnostmi (Ricciardi, Buratti, 2018; Bahar et al., 2023). Přidáním organických, a tedy obnovitelných, materiálů by navíc bylo možné dále snížit ekologickou zátěž této výroby.

Tato práce se zabývá určením tepelné vodivosti prvků vyrobených z materiálů, které obsahují organické příměsi. Cílem práce je navrhnout úpravy vnitřní struktury tištěných prvků, které by vedly ke zvýšení jejich tepelně izolačních vlastností a pomocí experimentálního měření pak tyto úpravy ověřit.

2. 3D tisk

Neustálý rozvoj technologie 3D tisku přinesl revoluční inovace do mnoha různých odvětví zejména díky tomu, že umožňuje poměrně levnou výrobu složitých dílů přesně na míru. Pro tyto vlastnosti je 3D tisk čím dál více využíván v nejrůznějších oborech (graf 1), jako například v potravinářství, architektuře, dopravě, zdravotnictví, módě a při výrobě střelných zbraní či elektrických obvodů (Wong, Hernandez, 2012).

Technologie 3D tisku jsou založeny na principu postupného nanášení jednotlivých



Graf 1 Analýza trhu aplikací pro 3D tisk, přeloženo (Buj-Corral et al., 2020)

vrstev materiálu na sebe. Jedná se tedy o aditivní výrobu. Opakem aditivní výroby jsou subtraktivní výrobní procesy, při kterých výsledný výrobek vzniká postupným odebíráním materiálu, jako je tomu například při třískovém obrábění (Stříteský et al., 2020).

2.1. Historie a současnosti 3D tisku

2.1.1. Počátky technologií aditivní výroby

První zdokumentované zmínky o zařízeních a materiálech pro aditivní výrobu pochází z počátku 80. let 20. století. V roce 1980 přišel Hideo Kodama s technologií postupného nanášení materiálu po vrstvách využitím fotocitlivé pryskyřice, která je následně polymerizována UV světlem. Tento postup chtěl Kodama použít k rychlé výrobě prototypů. Slibný nápad nebyl z důvodu nedostatku finančních prostředků patentován. Kodamova technologie se stala předchůdcem dnešních stereolitografických tiskáren (SLA) (Lonjon, 2017).

Stereolitografii patentoval v roce 1986 Charles Hull. V patentu popsal Hull proces, při kterém jsou kapalné polymery vytvrzovány UV světlem k vytvoření reálného 3D modelu (Su, Al'Aref, 2018). Hull poté založil firmu 3D Systems, která v roce 1988 uvedla na trh první komerční SLA 3D tiskárnu na světě s označením SLA-1 (obr. 1). Společnost 3D Systems se také zasloužila o souborový formát STL, který je dodnes používán k popisu geometrie trojrozměrných objektů (Grimm, 2014).



Obrázek 1 SLA-1, první komerční stereolitografická 3D tiskárna (Kazilbash, 2021)

Mimo stereolitografie zažívaly v 80. letech 20. století rozmach i jiné technologie aditivní výroby. V roce 1988 patentoval Carl Deckard technologii SLS (Selective Laser Sintering – selektivní laserové spékání). Výroba metodou SLS používá materiál ve formě jemného prášku, který je spékán pomocí laserového paprsku. Deckard později založil společnost Desktop Manufacturing Corporation, která v roce 1993 uvedla na trh první SLS tiskárnu na světě – Sinterstation 2000 (Lu et al., 2024).

Poslední ze tří dnes nejběžněji užívaných technologií 3D tisku vynalezl a v roce 1989 patentoval Scott Crump. Svoji metodu nazval FDM (Fused Deposition Modeling – modelování depozicí taveniny). Jako tiskový materiál užívá tato metoda tiskovou strunu (filament). Tisková struna je tavena zahřátou tryskou a postupně po vrstvách nanášena na sebe. Společně se svou manželkou Lisou založili společnost Stratasys se zaměřením na vývoj termoplastů a systémů pro FDM 3D tisk (Su, Al'Aref, 2018).

2.1.2. Další rozvoj aditivní výroby

V polovině 90. let 20. století se průmysl zabývající se aditivní výrobou začínal postupně dělit na dvě oblasti zájmu. Jedna část trhu se zaměřovala na výzkum a výrobu špičkových tiskáren pro velmi složité výrobky s vysokými nároky na kvalitu například pro využití ve zdravotnictví. Druhým odvětvím se stal vývoj tiskáren pro výrobu funkčních prototypů s důrazem na rychlost a nízkou cenu (Su, Al'Aref, 2018).

V roce 2009 vypršely původní patenty společnosti Stratasys na metodu FDM, což otevřelo možnosti pro další firmy a vývojáře. Postupně vznikaly různé open source projekty zabývající se rozvojem FDM tisku – mimo jiné například RepRap Movement a Fab@ Home (Su, Al'Aref, 2018). Idea projektu RepRap (Replicating Rapid-prototyper) byla navrhnout 3D tiskárnu, kterou bude možné postavit ze součástek dostupných v běžném železářství a z vytisknutelných plastových dílů. Díky tomu, že projekt byl od začátku koncipován pod licencí open source, měl kdokoli přístup k instrukcím ke složení tiskárny, což zapříčinilo ještě rychlejší rozvoj FDM 3D tiskáren (Stříteský et al., 2020).

Po vypršení dalších patentů je na současném trhu přes 170 společností, které se věnují výrobě systémů pro 3D tisk, mimo jiné například: 3D Systems, Stratasys, Prusa Research, Voron, Elegoo a další. Díky tomu se stává 3D tisk dostupným pro širokou veřejnost (González, 2020).

2.2. Technologie 3D tisku

Všechny současné technologie 3D tisku fungují na základě stejného principu. Tím je postupné nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Jednotlivé metody se liší v použitém materiálu či způsobu jeho zpracování. V současné době neexistuje žádná metoda 3D tisku, která by byla univerzálně vyhovující pro všechna použití. Je tedy vhodné vždy zvážit, jakou technologii zvolit, a to na základě požadovaných vlastností, kterými by měl konečný výtisk disponovat. Tři běžně nejpoužívanější metody 3D tisku se označují jako: FDM, SLA a SLS. (Stříteský et al., 2020).

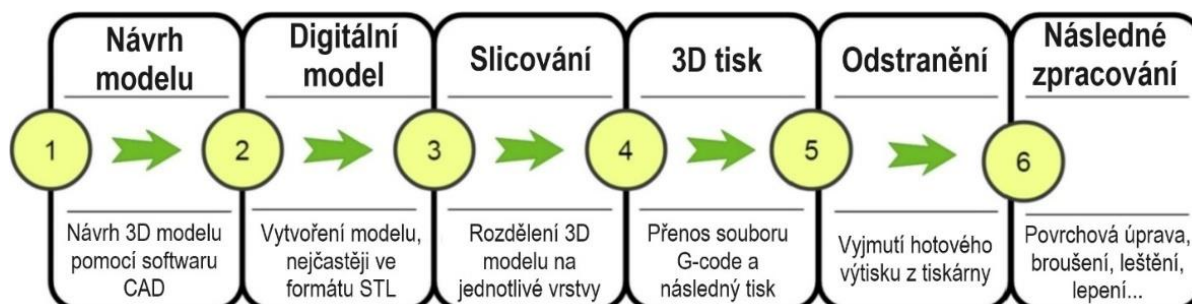
2.3. Metoda tisku FDM

Termínem FDM (Fused Deposition Modeling) se označují všechny 3D tiskárny, které pracují na bázi tavení surového materiálu (filamentu). Roztavený materiál je následně protlačen přes trysku na tiskovou plochu, na které vrstvu po vrstvě vytváří model

(Kristiawan et al., 2021). Často užívaným synonymem označujícím totožnou technologii je zkratka FFF (Fused Filament Fabrication). Technologii FDM lze v současné době považovat za nejoblíbenější metodu aditivní výroby. Populární je zejména pro svoji jednoduchost a přístupnost. Metoda nevyžaduje použití zdraví ohrožujících chemikálií, tiskárny bývají poměrně kompaktní a relativně levné (Mazzanti et al., 2019).

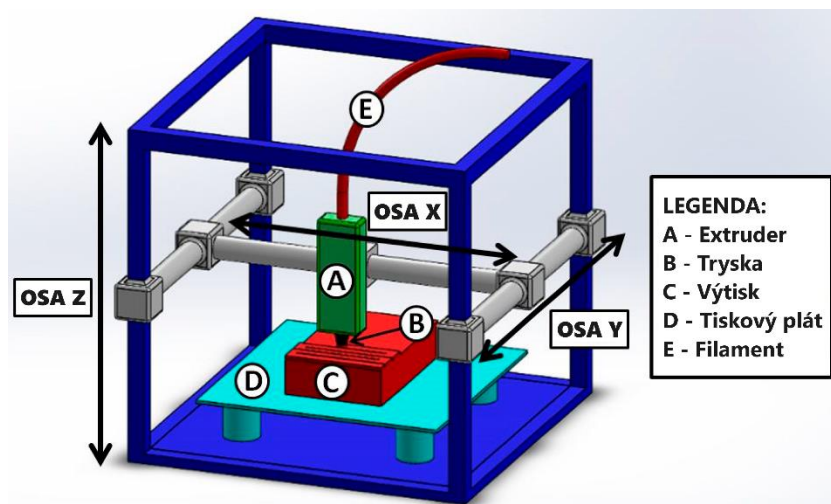
2.3.1. Proces FDM tisku

K vytištění výrobku je nejprve třeba vytvořit jeho digitální 3D model pomocí některého z modelovacích softwarů či použitím 3D skeneru, který umožňuje naskenovat reálný objekt. Se samotným digitálním modelem nedokáže tiskárna pracovat, proto je před tiskem nutné importovat model do programu typu slicer. Slicer je software, který umožňuje rozdělit digitální model na tenké vrstvy (slices) a vytvoří cesty pohybu tiskové hlavy (extruderu) v jednotlivých vrstvách. Rovněž umožňuje nastavit parametry tisku, jako jsou: teplota trysky a podložky, chlazení materiálu při tisku, rychlost pohybů tiskové hlavy, výška jednotlivých vrstev, vnitřní výplň výtisku, podpěry výtisku v převislech a mnoho dalších (Kristiawan et al., 2021). Vhodným nastavením tisku ve sliceru lze předejít většině problémům s kvalitou vytištěného modelu. Výstupem sliceru je soubor ve formátu G-code, který je možné nahrát do tiskárny a poté spustit samotný tisk. Pracovní postup 3D tisku je popsán na obrázku 2.



Obrázek 2 Pracovní postup 3D tisku, přeloženo (Ranjan et al., 2022)

Po spuštění tisku začne tiskárna vytlačovat filament přes tiskovou hlavu na předem zahřátou tiskovou podložku. Podložka se zahřívá z důvodu zvýšení přilnavosti mezi jejím povrchem a tištěným modelem. Krokové motory zajišťují pohyb tiskové hlavy a podložky ve třech dimenzích (obr.3), což umožňuje tiskárně postupně vrstvit materiál a tím vytvářet výtisk (Stříteský et al., 2020).



Obrázek 3 Schématické znázornění FDM 3D tiskárny, přeloženo (Mazzanti et al., 2019)

2.3.2. Materiály užívané pro FDM tisk

Modely vytisknuté na FDM 3D tiskárně vznikají z tenkého vlákna namotaného na cívce. Toto vlákno se označuje jako filament a bývá nejčastěji vyráběno o průměrech 1,75 a 2,85 mm (Kloski a Kloski, 2017).

Název	PLA	ABS	PETG	ASA	FLEX	PC
Pevnost v tahu * [MPa]	45	30	42	55	10	50
Max. teplota použitelnosti [°C]	50	90	70	90	60	120
Koeficient teplotní roztažnosti [$\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$]	68	90	60	98	157	69
Tuhost ** [od 1 do 10]	7	5	5	5	1	6
Odolnost *** [od 1 do 10]	4	8	8	9	9	10
Tisknutelnost **** [od 1 do 10]	9	7	8	7	6	2

Tabulka 1 Vlastnosti materiálu pro tisk technologií FDM, převzato (3D tisk online)

* vyšší číslo – pevnější materiál

** vyšší číslo – tužší materiál

*** vyšší číslo – odolnější materiál

**** 0 – netisknutelné; 10 – snadno tisknutelné

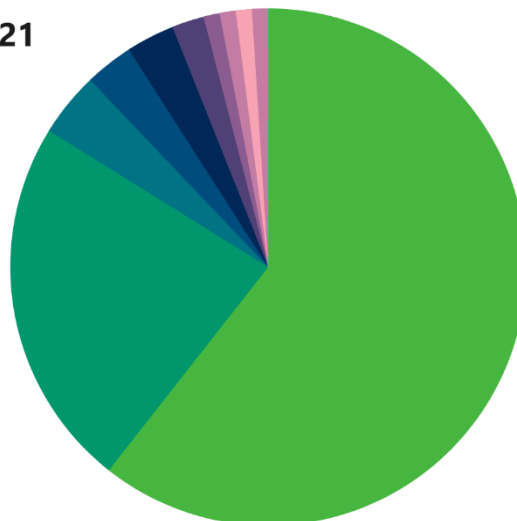
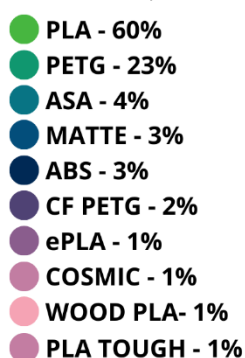
Jako filament se v FDM tiskárnách nejčastěji používají různé termoplastické polymery (graf 2). Při výběru filamentu je nutné brát v potaz skutečnost, že neexistuje univerzální materiál, který by byl vhodný pro všechny typy aplikací. Každý tisknutelný materiál má tedy své klady i zápory (tab. 1). Běžná nabídka filamentů sahá od polyesterů (PETG), přes biologicky odbouratelné materiály (PLA) a konstrukční plasty (ABS) až k flexibilním (TPU) a kompozitním materiálům (Mazzanti et al., 2019). Nabídka tisknutelných materiálů je rozsáhlá a neustále se rozšiřuje.

2.3.2.1. PLA

PLA (kyselina polyléčná) je polyester vyrobený z přírodních zdrojů. Jako výchozí surovina se pro jeho výrobu používá nejčastěji kukuřičný škrob, cukrová třtina či řepa. V rámci technologie FDM se jedná o nejuniverzálnější a nejpoužívanější materiál. Širšímu využití v oblasti výroby mechanicky namáhaných dílů brání jeho nižší odolnost, kterou lze částečně eliminovat použitím vhodných aditiv. Biologická rozložitelnost PLA materiálů bývá udávána v řádech měsíců až let. K rozkládání tohoto materiálu však dochází pouze v průmyslových kompostárnách (Dvořáková, Dvořák, 2023).

Objem výroby v roce 2021

Kg na materiál, jako podíl na celkové produkci



Graf 2 Objem výroby filamentů společnosti Filamentive v roce 2021 podle druhu, přeloženo (Tool, 2022)

Mezi největší výhody materiálu PLA patří jeho nízká cena a výborná tisknutelnost – dobře zvládá tisk i detailnějších objektů a v místech s velkými převisy si zachovává vzhledný povrch. Tvoří pevné výtisky a při jeho tisku nevzniká žádný znatelný zápach. Jeho tisk tedy není náročný na odvětrávání. Další výhodou materiálu je jeho zcela nepatrný

sklon ke kroucení, který je dán nízkou tepelnou roztažností. Je tedy vhodný i pro tisk větších modelů. Filamenty z PLA jsou oblíbené i pro široké barevné spektrum, ve kterém jsou nabízeny (Prusa Research a.s.).

PLA je materiál tvrdý, ale zároveň značně křehký. Při mechanickém namáhání tak spíše než k ohybu dochází k jeho lomu. Má také slabou soudržnost ve směru jednotlivých vrstev a špatně se obrábí. Další nevýhodou materiálu je jeho nízká tepelná odolnost. Výtisky z PLA degradují při vystavení UV zářením, nejsou tedy vhodné pro venkovní použití (Stříteský et al., 2020).

Materiál PLA se běžně využívá na rychlou výrobu prototypů, konceptů a dekorativních předmětů. Lze ho využít pro díly nenáročné na mechanickou a tepelnou odolnost. Jeho použití bylo Úřadem pro kontrolu potravin a léčiv (FDA) schváleno pro styk s potravinami, lze jej tedy užít i pro výrobu obalových materiálů potravin. Díky své biokompatibilitě bývá užíván i ve zdravotnictví například ve tkáňovém inženýrství, kde může být použit při tvorbě takzvaných scaffoldů (dočasných podpor pro implantované buňky) (Joseph et al., 2023).

2.3.2.2. PETG

Zkratkou PETG se označuje glykolem modifikovaný polyethyltereftalát (PET). PET je materiál běžně užívaný pro obaly nápojů, potravin, léčiv a oděvní vlákna (Šuta, 2008). Glykol modifikuje vlastnosti PET, který se poté stává méně křehkým a jednodušeji tisknutelným. FDM tiskárny umožňují i tisk z PET filamentů, které ovšem oproti PETG nepřinášejí takřka žádnou výhodu.

Výtisky vyrobené z PETG jsou tuhé, odolné, houževnaté a disponují dobrou otěruvzdorností. Výrobky z materiálu PETG mají dobrou adhezi mezi vrstvami, což přispívá jejich mechanické odolnosti. Díky nízké tepelné roztažnosti materiálu nehrozí při tisku smrštění. Pro svoje příznivé mechanické vlastnosti bývá PETG často srovnáván s materiálem ABS, oproti kterému však při tisku nevydává toxický zápach, a tedy nevyžaduje aktivní odvětrávání místnosti. Objekty vyrobené z PETG mají vyšší teplotní odolnost a zvládají vystavení UV zářením. Na konci jejich životnosti lze výrobky z PETG recyklovat (Průša, 2023).

Tisk malých a detailnějších modelů z materiálu PETG bývá obtížný. Při tisku z PETG dochází často k takzvanému „stringování“ (tvorba jemných vláken na výtisku).

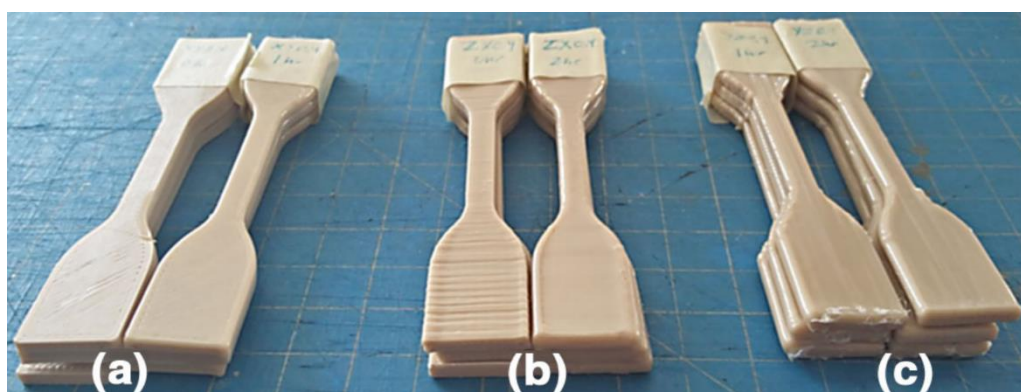
Dalšími nevýhodami jsou špatné přemostování mezi dvěma body a obtížné odstraňování podpěr. Velmi silná adheze materiálu k tiskové podložce zaručuje stabilitu při tisku, ovšem po jeho ukončení činí odejmutí výtisku obtížným (Průša, 2023).

Pro svoji příznivou odolnost bývá materiál PETG používán pro tisk mechanicky lehce namáhaných součástí. Dále nachází využití při výrobě obalů a držáků. Díky dobré adhezi mezi vrstvami lze z PETG vyrábět vodotěsné výtisky. Materiál lze vyztužit například uhlíkovými vlákny (za vzniku PETG-CF), čímž se stane ještě pevnějším a pružnějším. Tím lze rozšířit oblast jeho využití až k automobilovému či leteckému průmyslu (Valvez et al., 2022).

2.3.2.3. ABS

ABS (akrylonitril-butadien-styren) byl jedním z prvních materiálů využívaných při FDM 3D tisku. Jeho tisk patří k náročnějším, ovšem vyniká dobrými mechanickými vlastnostmi a vysokou tepelnou odolností. Výrobky z ABS se dokonale rozpouští v acetonu (Filament PM).

Právě dokonalá rozpustnost v acetonu patří mezi největší přednosti ABS. Díky této vlastnosti lze výtisky z ABS acetonem lepit či na nich vytvořit hladký a lesklý povrch (obr. 4). Skryjí se tak jednotlivé vrstvy typické pro výrobky z FDM 3D tiskáren. Na mechanické vlastnosti výtisků z ABS má aceton zanedbatelný vliv (Gao, 2017). Výrobky vytištěné z ABS mají vysokou mechanickou odolnost a houževnatost. V porovnání s ostatními termoplasty užívanými při FDM 3D tisku mají i vysokou tepelnou odolnost (Prusa Research a.s.)



Obrázek 4 Vzorčky s různou dobou ošetření acetonem (Gao, 2017)

a) 0 a 1 hodina; b) 0 a 2 hodiny; c) 1 a 2 hodiny

Výtisky z ABS mohou trpět nepřesnostmi způsobenými vysokou smrštitivostí materiálu. To lze částečně eliminovat zakrytváním tiskárny, což sníží teplotní rozdíly mezi výtiskem a okolním prostředím. Při tisku z materiálu ABS vznikají toxické výpary, je tedy nutné místnost odvětrávat. Výtisky z ABS degradují při vystavení UV záření, ačkoliv v menším měřítku než u materiálu PLA (Filament PM).

2.3.2.4. ASA

Materiál ASA (akrylonitril-styrén-akrylát) byl vytvořen jako alternativa k ABS. Oproti ABS má ASA zejména vyšší odolnost vůči UV záření. Také má menší smrštitivost a při jeho tisku nevzniká tolik škodlivých výparů. Kroucení při tisku v důsledku teplotní roztažnosti, které je jednou z největších nevýhod materiálu, lze částečně eliminovat zakrytváním tiskárny. Obdobně jako ABS je i ASA tuhý, pevný a houževnatý materiál. Nechybí mu ani schopnost dokonale se rozpouštět v acetonu (Sova, 2015).

Díky svým přednostem se v posledních letech stává ASA stále více oblíbeným materiálem, a to zejména na úkor materiálu ABS (Toor, 2022).

2.3.2.5. PC

Jedny z nejvíce odolných materiálů, které jsou běžně užívané k FDM 3D tisku, se označují jako PC (polykarbonáty). Výtisky z PC disponují vysokou rázovou odolností a odolností v tahu. Ostatní běžně tisknuté materiály převyšuje PC i odolností vůči vysokým teplotám. Využití nalézá také díky dobrým elektroizolačním vlastnostem. Klady materiálu jsou vykoupeny zejména jeho velmi náročným tiskem. Ten znesnadňuje také velmi vysoká hygroskopičnost a tepelná roztažnost čistých polykarbonátů. Z těchto důvodů bývají do materiálů PC přidávána aditiva, která zjednodušují jeho tisk (Prusa Research a.s.).

Pro své výborné mechanické vlastnosti nachází materiály PC své využití zejména pro tisk mechanicky namáhaných součástí a také dílů vyžadujících vysokou teplotní odolnost. Díky svým dielektrickým vlastnostem jsou využívány také v elektrotechnice.

2.3.2.6. Flexibilní materiály

Do skupiny flexibilních materiálů určených k FDM 3D tisku patří filamenty označované jako TPU (termoplastický polyuretan) a TPE (termoplastický elastomer). Tyto materiály se vyznačují skvělou ohebností a houževnatostí. Mají vysokou adhezi

mezi jednotlivými vrstvami a houževnaté zůstávají i při nižších teplotách. Užití nalézají také díky své odolnosti vůči chemickým rozpouštědlům (Prusa Research a.s.).

Tisk flexibilních materiálů patří k náročnějším. Při tisku se uživatelé potýkají s obtížným odstraňováním podpěr a velmi špatným přemostováním materiálu mezi dvěma body. Při skladování je nutné brát v potaz vysokou hygroskopičnost těchto materiálů. Případná pohlčená vlhkost zhoršuje tiskové vlastnosti materiálu. Další nevýhodou flexibilních materiálů je vyšší pořizovací cena filamentů (Průša, 2023).

2.3.2.7. Kompozitní materiály s organickou složkou

Složení kompozitních materiálů určených k FDM 3D tisku se skládá z kombinace dvou nebo více různých složek. Přidáním různých příměsí do materiálu lze změnit jeho vlastnosti požadovaným způsobem. Například přidáním uhlíkových vláken do materiálu PETG dojde ke zvýšení jeho odolnosti vůči tahovým a tlakovým silám (Valvez et al., 2022).

Kompozitní materiály s organickou složkou bývají tvořeny polymerním základem (nejčastěji PLA) a přírodní příměsí. Jako organickou složku lze při výrobě takových materiálů použít například dřevní moučku, cukrovarské řízky či izolovaná dřevní vlákna (Solidify 3D, s.r.o.). Setkat se lze také s materiály obohacenými o lněná či konopná vlákna (Travieso-Rodriguez et al., 2020).

Důvody, proč výrobci přidávají do svých filamentů organické příměsi, jsou různé. Současně se také liší vlastnosti takových materiálů. Z těchto důvodů je nelze popsat souhrnně. Častým důvodem pro přidání dřevní či jiné organické složky do materiálu je umožnit uživatelům vytvářet výtisky imitující vzhled dřeva. Jiným důvodem bývá snaha zvýšit vnitřní tření mezi vrstvami ve výtisku a tím zvýšit jeho odolnost. Filamenty s organickou složkou mohou být výhodnější z důvodu udržitelnosti, jelikož na výrobu takových filamentů lze užít například odpad z dřevěného nábytku, čímž se prodlužuje jeho životní cyklus. Obsah přírodních vláken může také napomáhat biologické rozložitelnosti materiálu (Travieso-Rodriguez et al., 2020).

Změna vlastností kompozitních materiálů na základě úpravy jejich složení přidáním příměsí je stále předmětem zkoumání. Zvýšení rázové houževnatost až o 7,8 % a pevnosti v tahu o 8,4 % materiálu PLA naměřili Guo et al. (2018) po přidání 10 % vláken topolového dřeva do filamentu. Depuydt et al. (2019) došli k závěru, že po přidání frakcí dřevního prachu do PLA lze zvýšit jeho modul pružnosti. Autoři zkoušeli i změnu vlastností

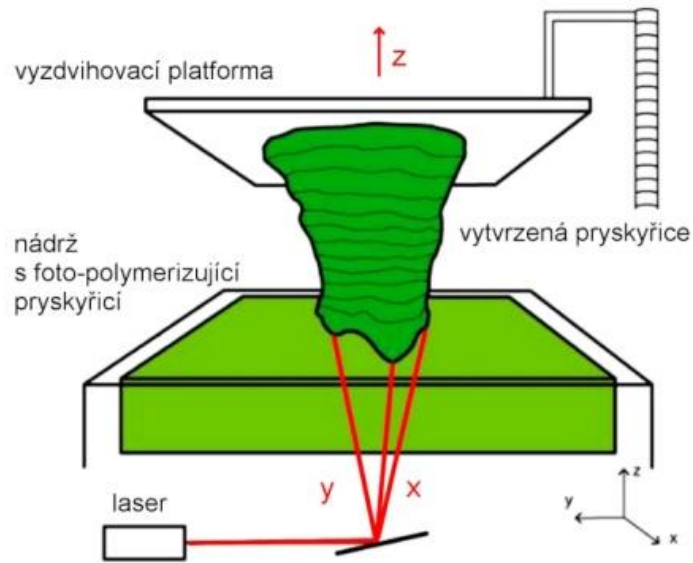
kompozitního materiálu po přidání krátkých bambusových vláken, po němž naměřili až dvojnásobné zvýšení modulu pružnosti. Daver et al. (2016) zjistili, že houževnatost materiálu PLA lze zvýšit přidáním korku. Na druhou stranu však poté dochází ke snížení mechanické odolnosti. Nejlépe vyvážených výsledků mezi houževnatostí a odolností dosáhl tým při přidání 5 % korku do polymerního základu. Naproti tomu Travieso-Rodriguez et al. (2020) uvádí, že přidání vláken smrku do PLA má nepříznivý vliv na mechanickou odolnost výtisku, a to zejména z důvodu snížení adheze mezi jednotlivými vrstvami. Rovněž zjistili, že přidání smrkových vláken zvyšuje množství mikroskopických dutin mezi vrstvami.

2.4. Metoda tisku SLA

Stereolitografie (zkráceně SLA) je nejstarší metoda 3D tisku, která většinu ostatních technologií aditivní výroby převyšuje zejména v přesnosti vyrobených výtisků. Rozlišení vyrobených dílů se pohybuje již od 10 μm . Na druhou stranu je výroba touto metodou poměrně pomalá a drahá. Při tisku metodou SLA se využívají zdraví nebezpečné chemikálie a výtisky vyžadují dodatečné čištění a úpravy (Ngo et al., 2018).

2.4.1. Proces SLA tisku

Princip tisku SLA tiskáren je založen na vytvrzování fotocitlivého polymeru pomocí UV záření. Tekutý polymer je nalit ve vaně, která slouží jako jeho zásobník. Vana má průhledné dno, kterým prochází UV záření z UV diody. Výtisk vzniká na tiskové platformě, která se po vytvrzení každé jednotlivé vrstvy posune o vzdálenost rovnající se tloušťce jedné vrstvy, po čemž dochází k vytvrzování vrstvy následující (obr. 5). Hotový výtisk bývá znečištěn nevytvrzeným polymerem, a proto není vhodný k okamžitému použití. Nevytvrzený polymer je třeba odstranit například ponořením do speciální lázně či čistícího roztoku. Po čištění je třeba celý výtisk vystavit dodatečnému UV záření, aby bylo zajištěno úplné vytvrzení materiálu (Dizon et al., 2018).



Obrázek 5 Schéma tvorby vrstev metodou SLA (Číhal, 2023)

2.4.2. Materiály užívané pro SLA tisk

Materiál používaný k tisku metodou SLA je označován jako fotopolymer, světlocitlivá pryskyřice či resin – všechny tyto výrazy jsou synonyma a označují jeden druh tiskového materiálu. Tisk ze světlocitlivé pryskyřice je v porovnání s tiskem z filamentu dražší. Výtisky bývají křehčí, ale na rozdíl od FDM nemají problém se špatnou adhezí po vrstvách, charakter lomu resinových výtisků se spíše blíží sklu (Stříteský et al., 2020).

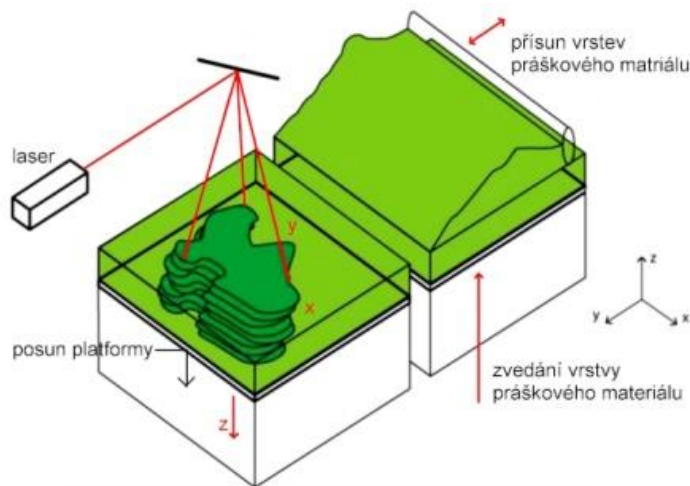
Fotopolymery užívané pro SLA tisk se třídí podle účelu použití. Nelze je třídít podle typu materiálu (jako je tomu u FDM tisku), jelikož se jedná vždy o stejný materiál, který je doplněn různým poměrem aditiv a barviv. Vedle standartního resinu, který má v porovnání s ostatními nejnižší cenu, ale je velmi křehký, existují i tvrdší a odolnější resiny. Dále se používají resiny s vyšší tepelnou odolností či upravené na tvorbu odlitků. Setkat se lze i s flexibilními či dentálními resiny, které jsou zdravotně nezávadné a lze je použít například k tvorbě zubních implantátů (Stříteský et al., 2020).

2.5. Metoda tisku SLS

Selektivní laserové spékání (Selective Laser Sintering) je další metodou aditivní výroby. Výrobek vzniká tavením částic polymerního prachu vysoce výkonným laserem. SLS výtisky vynikají nad výtisky vyrobenými metodami FDM a SLA svojí mechanickou, tepelnou a chemickou odolností. Při tisku, na rozdíl od ostatních metod aditivní výroby, není nutné využívat podpory pod převisy, jelikož výrobek při tisku podepírá zbytkový nespečený materiál. To činí z metody SLS vynikající volbu pro tisk komplexních geometrií. Největší slabinou této technologie je vysoká cena materiálu i samotných tiskáren, která několikanásobně převyšuje cenu tiskových systémů FDM a SLA (Mróz, 2023).

2.5.1. Proces SLS tisku

Před spuštěním tisku je nutné rozprostřít polymerní práškový materiál rovnoměrně po pracovní ploše. Následně začne laserový paprsek procházející řadou čoček, dle instrukcí definovaných tiskovým souborem spékat práškový materiál a tím vytvářet požadovaný tvar. Tisk probíhá po vrstvách, po dokončení jedné je na pracovní plochu nanесena další vrstva polymerního prachu a proces se opakuje (obr. 6). Zbytkový nespečený prach lze použít k dalšímu tisku, díky čemuž dochází k minimálním ztrátám tiskového materiálu. Nová vrstva se vždy nataví na předchozí, čímž se spojí v jediné těleso (Stříteský et al., 2020).

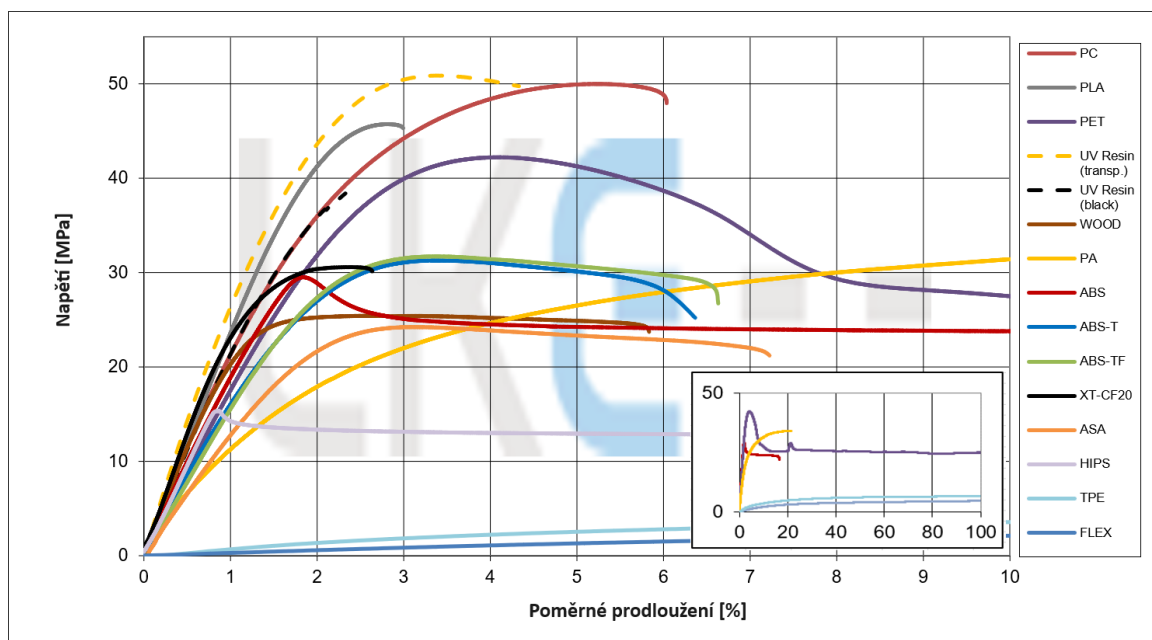


Obrázek 6 Schéma tvorby vrstev a uspořádání SLS tiskárny (Číhal, 2023)

2.5.2. Materiály užívané pro SLA tisk

Jako tiskový materiál se používají termoplasty ve formě jemně namletého prachu. Většina produkce SLS tiskáren vzniká z polyamidu nylonu PA-12. Výtisky z něj jsou lehké,

pevné a odolné vůči nárazu, chemikáliím, teplu a UV záření. Dále bývají používány pružné elastomery (TPE, TPU) či polystyren (PS 2500). Vlastnosti výtisků lze upravit přidáním různých přísad do polymerního prachu. Tak vznikají kompozitní materiály například s uhlíkovými či skleněnými vlákny (Mróz, 2023).



Graf 3 Tahové křivky polymerů užívaných k aditivní výrobě, přeloženo (L.K. Engineering, s.r.o.)

2.6. Tepelná vodivost 3D tištěných objektů

Z konstrukčního hlediska závisí tepelná vodivost vyrobených dílů na parametrech jako jsou: tloušťka, hustota, propustnost vzduchu, tvar a velikost pórů a další (Islam, Bhat, 2019). Výroba součástí se složitější vnitřní strukturou bývá při použití konvenčních postupů náročná. Poměrně snadné výroby takových dílů lze docílit použitím technologií aditivní výroby, která již ze své podstaty umožňuje na míru vyrobit prvky se složitou geometrií a porézni strukturou.

2.6.1. Tepelná vodivost běžně používaných filamentů

Dalším faktorem, který ovlivňuje tepelnou vodivost, je materiál, ze kterého je součást vyrobena. Metody aditivní výroby umožňují vyrábět součásti ze široké a neustále rostoucí nabídky různých materiálů (tab. 2).

Materiál	Metoda	λ [W/m*K]
PLA	FDM	0,13
PETG	FDM	0,29
ABS	FDM	0,23
ASA	FDM	0,18
PC	FDM	0,20
Resin - čirý	SLA	0,31
PU 12	SLS	0,22

*Tabulka 2 Součinitel tepelné vodivosti běžně tisknutých materiálů
(Kelava et al., 2022; Iron Boar Labs Ltd., 2021)*

Mezi často používané materiály patří například biologicky odbouratelný termoplast PLA, vyrobený z organických, a tedy obnovitelných surovin. Použití takových materiálů snižuje ekologickou zátěž a má mnohem menší dopad na životní prostředí než většina dnes užívaných izolačních materiálů vyráběných z ropy a jiných syntetických surovin.

Islam et al. (2023) zkoumali vlastnosti materiálu PLA tištěného metodou FDM. Došli k závěru, že součinitel tepelné vodivosti výtisků se mění při různých hodnotách vnitřní výplně – tedy při různé pórovitosti. Nejnižší dosažená hodnota součinitele tepelné vodivosti byla $0,037 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, což je hodnota, se kterou může výtisk konkurovat jiným běžně používaným izolantům, jako například skelné vatě ($0,032$ až $0,045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) nebo dřevovláknité desce ($0,04$ až $0,06 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) (Chybík, 2009). Nevýhodou zkoumaného materiálu je však jeho nízká teplota tání.

2.6.2. Tepelná vodivost filamentů s organickými příměsmi

Ricciardi a Buratti (2018) hodnotili tepelný komfort uvnitř budov. Zkoumali materiály vyrobené smíšením polyuretanového lepidla a odpadních zemědělských produktů, přičemž došli k závěru, že vzorky vyrobené z materiálů s příměsí korku, kávových vloček či rýžových slupek vykazují lepší tepelné vlastnosti při současném snížení jejich environmentálního dopadu. Podobně lze snížit výrobní náklady a ekologickou zátěž materiálu PLA, a to přidáním organických příměsí do vláken filamentu během jejich výroby či během samotného tisku. Možnou organickou příměsí jsou například dřevní vlákna, která jsou levnější a šetrnější k životnímu prostředí než čisté PLA. Mimo jiné tyto příměsi vykazují až dvakrát nižší hodnotu součinitele tepelné vodivosti než PLA (Bahar et al., 2023).

Liu et al. (2019) porovnávali vliv příměsí organického a neorganického původu v termoplastech tištěných metodou FDM. Ve srovnání s keramickými, měděnými či hliníkovými aditivami měly příměsi s obsahem dřevních vláken nejslabší zpevňující účinek. Jako jedna z příčin byla označena zvýšená pórovitost takových výtisků. Tato skutečnost omezuje možnosti využití PLA s dřevními vlákny pro konstrukční účely.

Stavební izolace však nepotřebuje tak silnou mechanickou odolnost jako konstrukční materiály a zvýšená pórovitost materiálu zde naopak hraje pozitivní roli. Bahar et al. (2023) se zabývali tepelnými a mechanickými vlastnostmi materiálu PLA s dřevní příměsí a možnostmi využití těchto materiálů pro izolaci budov. K měření užívali kompozitní materiál PLA s příměsí 30 % recyklovaných částic borového dřeva. Autoři potvrdili závislost mezi mírou vnitřní výplně a tepelnou vodivostí. Mezi teplotou tisku a tepelnou vodivostí byla zjištěna jen velmi malá až žádná závislost. Podle normy UNE-EN 12667:2002, popisující tepelné vlastnosti stavebních materiálů, splnily jejich vzorky s 10 % vnitřní výplní požadavky na způsobilost jako izolant. Součinitel tepelné vodivosti těchto vzorků se pohyboval kolem $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Autoři uvedli, že snížením vnitřní výplně by bylo možné dosáhnout ještě nižších hodnot součinitele tepelné vodivosti, avšak s rizikem snížení mechanické odolnosti vzorků.

Mechanické a tepelné vlastnosti materiálů s organickými příměsmi používanými pro aditivní výrobu metodou FDM z nich činí vhodné kandidáty pro další výzkum v oblasti jejich využití jako tepelných izolantů ve stavebnictví či jiných odvětvích.

3. Tepelná vodivost

3.1. Sdílení tepla

Sdílení tepla je proces, při kterém dochází k přenosu energie na základě teplotního rozdílu, a to z objektu o vyšší teplotě na objekt s teplotou nižší. Tento jev je přímým důsledkem druhého termodynamického zákona. Množství tepelné energie k dispozici je úměrné teplotě objektů. V mikroskopickém měřítku lze při růstu teploty objektu sledovat nárůst kinetické energie částic tvořící objekt (Macháčková, Kocich, 2012).

Z fyzikálního hlediska jsou rozlišovány tři základní mechanismy sdílení tepla (Kulhánek, 2011):

- sdílení tepla vedením (kondukcí)
- sdílení tepla prouděním (konvekci)
- sdílení tepla zářením (radiací)

3.1.1. Sdílení tepla vedením

Při přenosu tepla vedením dochází k předávání tepelné energie mezi molekulami, což má za následek změnu jejich mikroskopického pohybu. Částice objektu s vyšší teplotou, které se pohybují intenzivněji, narážejí do částic chladnějšího objektu. Během srážek dochází k přenosu kinetické energie mezi částicemi. Molekuly teplejšího tělesa předávají část své kinetické energie molekulám tělesa chladnějšího. Sdílení tepla kondukcí probíhá zejména mezi látkami pevnými. Vyskytuje se i v tekutinách, kde je však ve větší míře zastřen přenosem prouděním. Schopnost látky vést teplo a přenášet energii vedením se nazývá tepelná vodivost (Nožička, 2001).

3.1.2. Sdílení tepla prouděním

Přenos tepla prouděním je proces, během kterého dochází ke sdílení tepla prostřednictvím pohybu tekutin (kapalin a plynů). Hustota tekutin s rostoucí teplotou obvykle klesá, proto teplejší oblasti tekutého systému obvykle proudí vzhůru. Taková konvekce je označována jako přirozená či volná. Pokud je proudění látek vyvoláno vlivy vnějšími, jedná se o vynucené proudění. V technické praxi bývá takový pohyb vyvolán ventilátorem či čerpadlem (Kulhánek, 2011).

3.1.3. Sdílení tepla zářením

Každé těleso o teplotě vyšší než 0 K vyzařuje elektromagnetické vlny různé vlnové délky. Tyto vlny emituje těleso plochou svého povrchu. Přenos tepla zářením probíhá zejména prostřednictvím infračerveného záření. Proces sdílení tepla radiací není vázán na hmotné prostředí, jelikož elektromagnetické vlny mohou cestovat i v dokonalém vakuu. Záření, které dopadá na povrch tělesa, je tělesem částečně pohlceno, odraženo a propuštěno. Poměr, ve kterém dochází k těmto jevům, je mimo jiné ovlivněn barvou předmětů, na které záření dopadá. Bílé objekty mají vyšší odrazivost, naopak u černých je dominantní pohltivost záření (Nožička, 2001).

3.2. Tepelná vodivost

Schopnost látky vést teplo vedením vyjadřuje fyzikální veličina součinitel tepelné vodivosti λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Hodnotu λ lze stanovit pro kterýkoli materiál. Přes materiály s vyšší hodnotou λ se teplo šíří rychleji. Naopak materiály s nízkou hodnotou λ je obtížné ohřát či ochladit a jsou označovány za izolanty. Hodnota součinitele tepelné vodivosti je běžně užívána k porovnání kvality tepelných izolací (Nožička, 2001).

Součinitel tepelné vodivosti λ lze vyjádřit z Fourierova zákona (Chybík, 2009):

$$q = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (1)$$

Kde:

q – hustota tepelného toku ($W \cdot m^{-2}$) = ($kg \cdot s^{-3}$)

λ – součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

ΔT – teplotní rozdíl (K)

ΔX – jednotková vzdálenost (m)

Podílem teplotního rozdílu ΔT a jednotkové vzdálenosti ΔX lze získat veličinu teplotní gradient ∇T ($K \cdot m^{-1}$). Teplotní gradient (též teplotní spád) je veličina určující změnu teploty připadající na jednotkovou vzdálenost.

Nejvýznamnějšími faktory ovlivňující tepelnou vodivost materiálů jsou teplota, vlhkost a objemová hmotnost materiálu. S rostoucí teplotou obvykle tepelná vodivost roste lineárně. Opačný trend lze sledovat při nárůstu objemové hmotnosti. Na naměřenou hodnotu součinitele tepelné vodivosti může mít vliv tloušťka měřeného tělesa. Důležité jsou i vlastnosti prostředí, ve kterém je měření prováděno. Měření ovlivňuje tlak a teplota vzduchu či rychlost jeho proudění (Hung Anh, Pásztory, 2021).

4. Materiál a metody

4.1. Použité vzorky

Pro účely zkušebního měření tepelné vodivosti a mechanických vlastností byly vyrobeny vzorky aditivní technologií metodou FDM. K výrobě byly použity tři různé filameny. Každý použitý filament obsahoval jiné příměsi, které jsou popsány v následujících kapitolách.

4.1.1. Výběr materiálů

Základní podmínkou při výběru filamentů byl obsah libovolné organické příměsi. Pro přípravu zkušebních vzorků byly vybrány tyto filameny: Filament PM – WoodJet, Print With Smile – Biofil Wood a Fillamentum – Timberfill. Všechny tři vybrané filameny jsou vyráběny českými firmami na území České republiky a vzájemně se liší obsaženou organickou složkou. Materiál WoodJet obsahuje cukrovarské řízky, což je druhotný produkt získávaný při zpracování cukrové řepy. Filament Biofil Wood je tvořen směsí ligninu, škrobu, celulózy a dalších přírodních látek. V materiálu Timberfill tvoří organickou příměs izolovaná dřevní vlákna.

Všechny tři použité materiály jsou biologicky rozložitelné, ovšem pouze v průmyslových kompostárnách. Liší se také svými teplotními a mechanickými vlastnostmi (tab. 3). Filameny WoodJet a Timberfill se svými vlastnostmi blíží termoplastu PLA. Sdílejí s ním nepatrnou smrštivost a dobrou tisknutelnost, avšak také nízkou tepelnou odolnost. Filament Biofil Wood lze na základě jeho vlastností přirovnat k materiálu ABS. Tisk zejména větších objektů může být při použití filamentu Biofil Wood obtížnější, ale jasně převyšuje ostatní použité materiály svou tepelnou odolností. Po stránce mechanických vlastností se žádný z vybraných filamentů nijak výrazně neliší od běžně používaných termoplastů PLA (Filament PM; Print With Smile; Fillamentum).

Materiál	Označení zkušebních vzorků	Teplota měknutí [°C]	Rázová houževnatost [kJ/m ²]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v ohybu [MPa]	Hustota [g/cm ³]
WoodJet	A, B	55	64,5	<i>údaj neudán</i>	3000	1,25
Biofil Wood	C, D	114	<i>údaj neudán</i>	26	3100	1,31
Timberfill	E, F	48	22	39	3200	1,26

Tabulka 3 Teplotní, mechanické a fyzikální vlastnosti použitých filamentů

(Filament PM; Print With Smile; Fillamentum)

4.1.1.1. WoodJet (Filament PM)

WoodJet je obchodní označení filamentu vyráběného českou společností Filament PM (dříve Plasty Mladeč). Filament je tvořen směsí termoplastu PLA a cukrovarských řízků, jedná se tedy o kompozitní materiál s organickou příměsí.

Filament WoodJet vznikl díky spolupráci společnosti Filament PM a Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace Technické univerzity v Liberci. Společně se snažili využít některé vedlejší produkty zemědělské výroby pro výrobu tiskových strun. Jako příměs k termoplastu PLA zkoušeli využít například slámu, rajčatovou nať či kokosový substrát. Nejlepších výsledků dosáhl tým při použití cukrovarských řízků.

Jako výhody filamentu WoodJet uvádí výrobce vyšší rázovou houževnatost, dobrou přilnavost jednotlivých vrstev a pevnost v tříbodovém ohybu. Díky nízké tiskové teplotě, která činí 195 °C, zvládá materiál dobře tisk převisů, a to i při nedostatečném chlazení tiskárny či tisku v teplejším prostředí. Smrštivost materiálu je nízká, což umožňuje tisk velkých modelů, které díky příměsí cukrovarských řízků dostávají dřevěný vzhled. Obsažená příměs umožňuje broušení výtisků a celkově zjednodušuje jeho následné opracování.

4.1.1.2. Biofil Wood (Print With Smile)

Filament Biofil Wood se svými vlastnostmi blíží materiálu ABS. Filament je vyrobený ze směsi polyesteru, ligninu, škrobu, celulózy a přírodních pryskyřic, vosků, olejů a vláken. Jednotlivé složky, ze kterých je filament vyráběn, jsou schváleny pro styk s potravinami. Výrobce je česká společnost Fuel Invest SE, která filament vyrábí pod svou značkou Print With Smile.

Největší výhodou filamentu Biofil Wood oproti ostatním použitým filamentům je vysoká teplotní odolnost. Jeho teplota měknutí dle Vicata byla stanovena na 114 °C, čímž velmi významně převyšuje značnou část běžně používaných materiálů k 3D tisku metodou FDM a lze ho v tomto ohledu považovat za vhodnou náhradu za materiál ABS. Výtisky z materiálu Biofil Wood mají vzhled blízký se textuře dřeva, lze je opracovat broušením a dobře absorbují barvy.

S materiálem ABS sdílí Biofil Wood vedle výborné teplotní odolnosti i některé své nevýhody. Mezi ně patří vyšší smrštivost materiálu, která může při tisku větších objektů zapříčinit náhlé a nekontrolované oddělení nedokončeného výtisku z tiskového plátu.

V porovnání s ostatními použitými filamenti je při tisku náchylnější na průvan a vyžaduje stabilní teplotu okolí.

4.1.1.3. Timberfill (Fillamentum)

Timberfill je kompozitní materiál, který se skládá ze směsi bioplastů a přírodních částic získaných ze dřeva, zejména z izolovaných vláken smrku. Svými vlastnostmi se materiál blíží termoplastu PLA. Výtisky vyrobené z filamentu Timberfill se vzhledem podobají dřevu. Výrobcem materiálu Timberfill je česká firma Fillamentum zabývající se výrobou filamentů do FDM 3D tiskáren.

Díky obsahu smrkových vláken v materiálu lze výtisky z materiálu Timberfill mořit a brousit podobně jako dřevo. Timberfill má špatnou tepelnou odolnost a houževnatost, avšak také nízkou smrštitivost a dobrou adhezi jednotlivých vrstev. Materiál je vysoce hygroskopický a vyžaduje skladování v suchém prostředí a vysoušení před tiskem.

4.1.2. Rozměry a vlastnosti vzorků

4.1.2.1. Rozměry vzorků pro měření tepelné vodivosti a tlakových vlastností

Rozměry vzorků použitých k měření tepelných a tlakových vlastností byly vybrány podle nároků přístroje ISOMET 2104, který byl použit k měření tepelné vodivosti. Pro účely měření tepelné vodivosti plošnou sondou je vyžadována měřicí plocha o průměru alespoň 60 mm. Měřicí plocha by měla být co nejvíce plochá – tento parametr má přímý vliv na přesnost měření. Minimální tloušťka měřeného vzorku se pohybuje v rozsahu 10 až 15 mm v závislosti na tepelné vodivosti použitého materiálu (Applied Precision, 2007).

Pro účely zkušebního měření byl zvolen kvádr o rozměrech 65×65×35 mm (obr. 7). Takový vzorek bezpečně splňuje požadavky na minimální rozměry dané přístrojem ISOMET 2104. Rovinnost měřicí plochy byla zaručena tiskem na hladký tiskový plát.

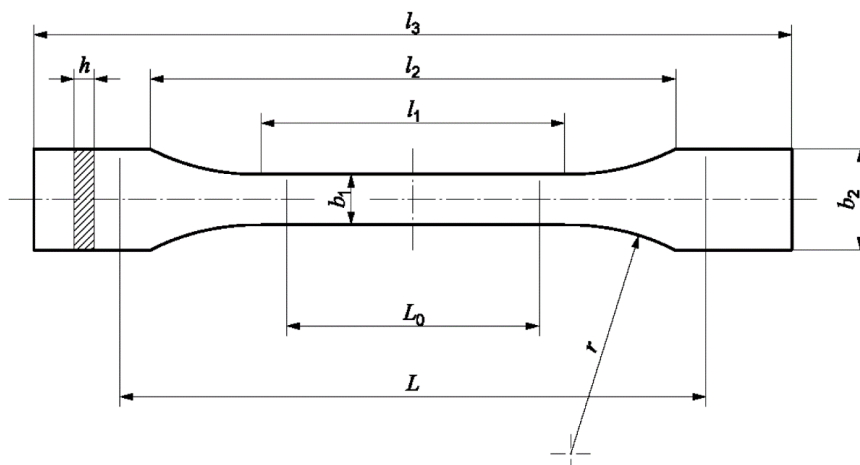
Pro stanovení tlakových vlastností materiálů byly využity stejné vzorky, jako pro měření tepelné vodivosti.



Obrázek 7 Vytištěný vzorek pro měření tepelné vodivosti a tlakových vlastností

4.1.2.2. Rozměry vzorků pro měření tahových vlastností

Návrh rozměrů vzorků použitých pro ověření tahových vlastností vycházel z normy ČSN EN ISO 527-2 (obr. 8). Jediným pozměněným rozměrem oproti normě byla tloušťka vzorku, která byla zvýšena na 12 mm (tab. 4).

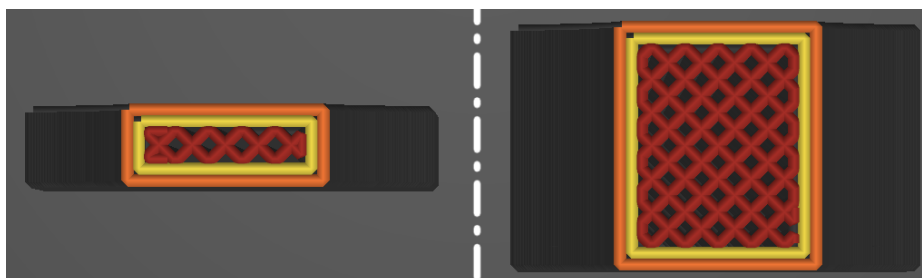


Obrázek 8 Schéma zkušebního vzorku (ČSN EN ISO 527-2)

Index	Parametr	Rozměr
l_3	Celková délka	170 mm
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80 mm
r	Poloměr	24 mm
l_2	Vzdálenost mezi rozšířeními částmi s rovnoběžnými hranami	109 mm
b_2	Šířka konců	20 mm
b_1	Šířka zúžené části	10 mm
h	Tloušťka	12 mm
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115 mm

Tabulka 4 Rozměry vzorků pro stanovení tahových vlastností

Zkoumán byl vliv míry hustoty vnitřní výplně na tahové vlastnosti vzorků. Vliv výplně roste společně s plochou, kterou v průřezu vzorku zabírá. Při použití rozměrů standardního vzorku dle normy ČSN EN ISO 527-2 zabírají po jeho vytištění podstatnou část průřezu perimetru (vnější stěny, na obrázku 9 znázorněné žlutou a oranžovou barvou) a vliv vnitřní výplně (na obrázku 9 znázorněn červenou barvou) není tak značný. Proto bylo přikročeno k navýšení tloušťky zkušebních vzorků.



Obrázek 9 Průřez vzorky s různou tloušťkou

Vlevo – vzorek s rozměry dle ČSN EN ISO 527-2

Vpravo – stejný vzorek s tloušťkou 12 mm

4.1.3. Tisková nastavení vzorků

K vytištění vzorků byly použity 3 různé filamenty, z nichž každý vyžaduje specifické nastavení 3D tiskárny. Mezi hlavní měněné parametry patří průměr a teplota tiskové trysky a teplota podložky. Tabulka 5 zobrazuje nastavené hodnoty v závislosti na materiálu.

Tiskový parametr	WoodJet		Biofil		Timberfill	
	Doporučení výrobce	Použito	Doporučení výrobce	Použito	Doporučení výrobce	Použito
Teplota trysky [°C]	200 - 215	210 - 215	170 - 200	175 - 180	170 - 185	170 - 175
Průměr trysky [mm]	údaj neuveden	0,6	≥ 0,4	0,6	údaj neuveden	0,6
Teplota podložky [°C]	20 - 60	60	50 - 70	70	50 - 60	50 - 55

Tabulka 5 Nastavení tiskových parametrů dle materiálu

(Filament PM; Print With Smile; Fillamentum)

Výška jednotlivých vrstev, ze kterých se výtisky skládají, byla nastavena na 0,3 mm. Počet perimetrů (vnější stěn) byl nastaven na 2 (obr. 9). Spodní a vrchní stěny tvořily 4 plné vrstvy o celkové tloušťce 1,2 a 1,2 mm.

Organické příměsi ve filamentech působí abrazivně na stěny tiskové trysky, čímž urychlují její opotřebení. Použité filamenty také častěji způsobují ucpání trysky, což mívá za následek nezdařený tisk (Solidify 3D, s.r.o.). Z těchto důvodů byla původní mosazná

tryska o průměru 0,4 mm na použité tiskárně vyměněna za kalenou trysku o průměru 0,6 mm (obr. 10).



Obrázek 10 Tiskové trysky s různým průměrem

Vlevo – původní mosazná tryska o průměru 0,4 mm

Vpravo – kalená tryska o průměru 0,6 mm

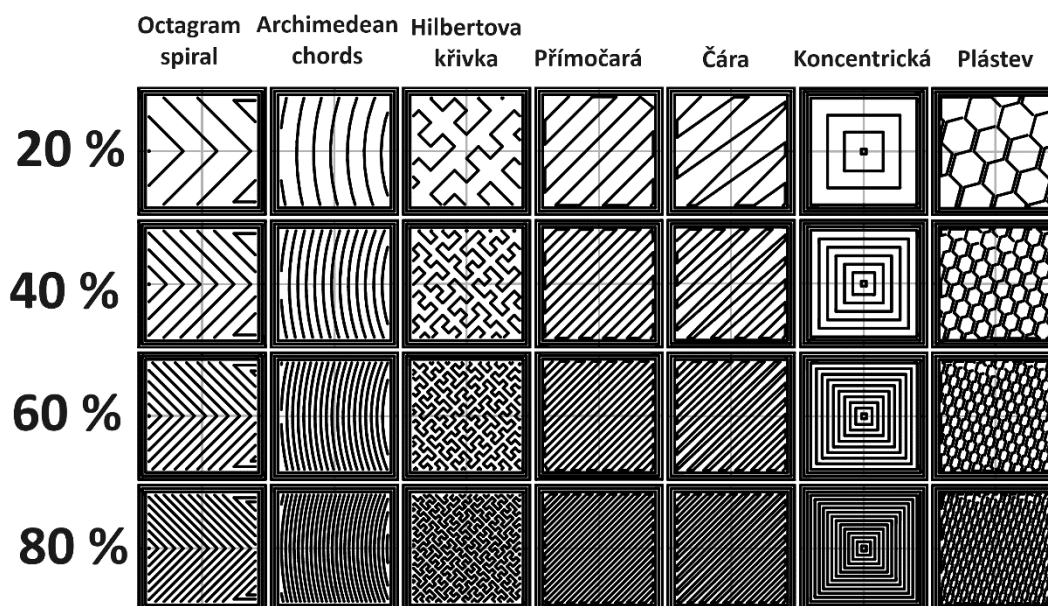
Další vlastností použitých filamentů je jejich hygroskopičnost, která je v porovnání s běžně užívanými filamenti bez organických příměsí vyšší. Absorbovaná vlhkost ve filamentu má negativní vliv na kvalitu tisku (Průša, 2023). Z tohoto důvodu byl před každým tiskem filament vysoušen v sušičce filamentů.

4.1.3.1. Nastavení vzorků pro měření tepelné vodivosti a tlakových vlastností

Správné nastavení parametrů uvedených v tabulce 5 je klíčové pro kvalitu tisku. Jejich vliv na tepelnou vodivost hotového výtisku je však zanedbatelný (Bahar et al., 2023), proto nebyly pro účely výzkumu nijak měněny. Dle studií citovaných v kapitole 1.6. (Tepelná vodivost 3D tištěných dílů) má na míru tepelné vodivosti výtisků značný vliv hustota jejich vnitřní výplně (infillu).

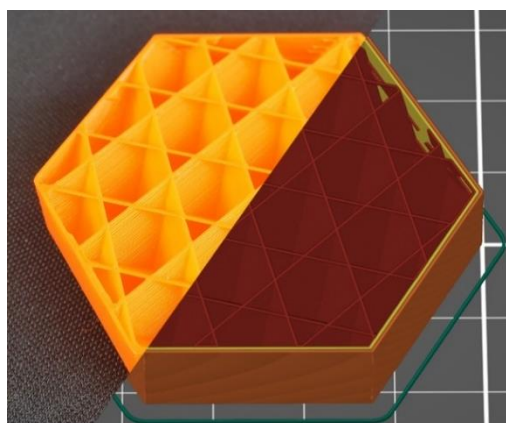
Úkolem výplně je vyplňovat vnitřní prostor tištěného objektu. Její hustota se nastavuje procentuální hodnotou (obr.11), přičemž 0 % značí dutý výtisk a 100 % „plný“ výtisk. Vnitřní výplň ovlivňuje v technologiích aditivní výroby zejména spotřebu materiálu, dobu tisku a mechanické vlastnosti hotového výrobku. Pro výtisky, u kterých není předpokládáno mechanické namáhání, bývá hustota výplně nastavována obvykle v rozmezí 10 až 20 %. Při rostoucích nárocích na strukturální pevnost výtisků je ovšem nutné

procentuální hustotu jejich výplně zvýšit. Parametry vnitřní výplně (hustota a vzor) lze nastavit před tiskem objektu v programech typu slicer (Průša, 2023).



Obrázek 11 Vzory výplně v závislosti na jejich hustotě (Průša, 2023)

K výrobě vzorků byl vybrán kubický (cubic) vzor výplně, a to zejména proto, že uvnitř tištěného objektu při tisku vytváří malé vzduchové kapsy tvaru krychle (obr. 12). Tyto kapsy poté mohou sloužit jako tepelný izolant.



Obrázek 12 Kubický vzor výplně (Prusa Research a.s.)

Levá část – skutečný vzhled výtisku

Pravá část – náhled výtisku v programu typu slicer

Z každého ze tří vybraných filamentů byly vytištěny vzorky se čtyřmi různými hustotami vnitřní výplně. Na základě poznatků ze studií probíraných v kapitole 1.6. (Tepelná vodivost 3D tištěných dílů) je zřejmé, že nejlepších izolačních výsledků dosahují vzorky s menší hustotou vnitřní výplně. Z tohoto důvodu byly vybrány hodnoty výplně: 15, 20, 25 a 30 %. Pro snížení rizika chyby měření byl každý vzorek vytištěn ve dvou identických kopiích, které se lišily jen písmenem v označení vzorku. Celkově tedy vzniklo 24 vzorků.



Obrázek 13 Zkušební vzorky pro měření tepelné vodivosti

Zleva: WoodJet, Biofil Wood, Timberfill

Každý vzorek byl označen čtyřmístným kódem. První znak kódu označuje vzor použité výplně (písmeno „C“ označuje kubický vzor). Další dva znaky označují hustotu vnitřní výplně v procentech a poslední znak označuje použitý materiál (A,B pro WoodJet, C,D pro Biofil Wood a E,F pro Timberfill). Například označení C15B patří vzorku s kubickým vzorem výplně, hustotou výplně 15 %, který byl vyroben z materiálu WoodJet (první zleva na obrázku 13).

4.1.3.2. Nastavení vzorků pro měření tahových vlastností

Zkoumán byl vliv různé hustoty vnitřní výplně na tahové vlastnosti vzorků. Pro výrobu vzorků byl vybrán materiál WoodJet. Tiskové nastavení bylo stejné jako pro tisk vzorků na měření teplotních vlastností.

Hustota vnitřní výplně ovlivňuje tahové vlastnosti výtisků. Nastavením vhodné hustoty výplně lze docílit ideálního poměru mezi hmotností a odolností výtisku a tím

optimalizovat spotřebu materiálu a dobu výroby. Vliv vzoru výplně je zanedbatelný (Dobos et al., 2022). Na základě těchto znalostí byly zhotoveny a následně zkoušeny vzorky s hustotou výplně 15, 20, 25, 30 a 100 % v počtu dvou kusů od každé hustoty.



Obrázek 14 Vytištěný vzorek pro měření tahových vlastností

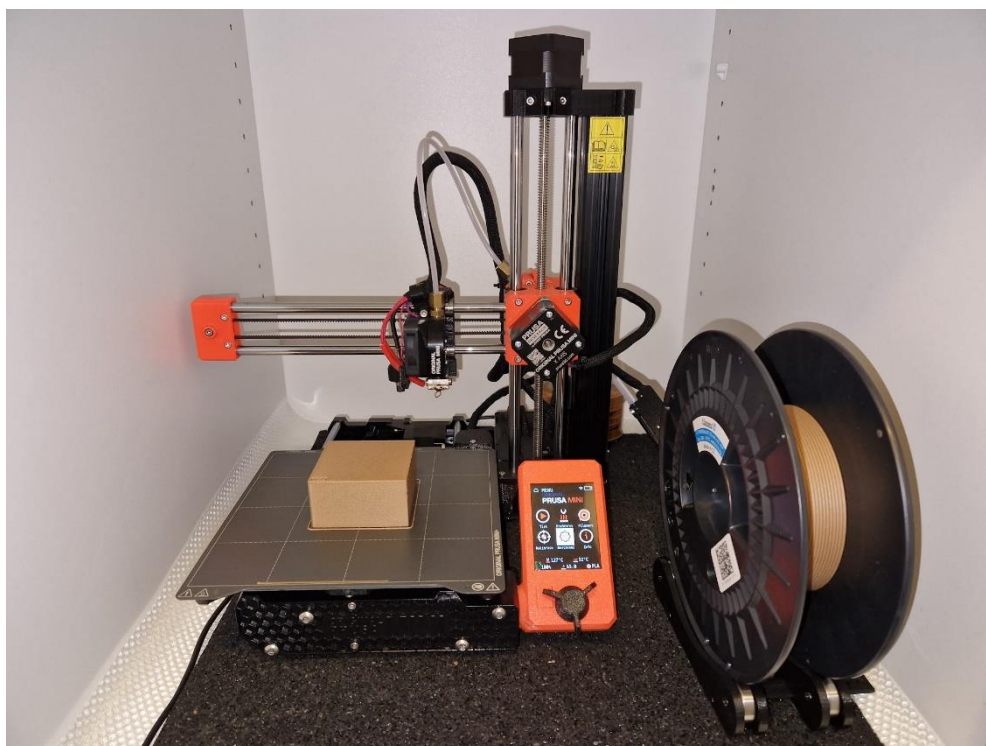
4.2. Použité přístroje

4.2.1. Original Prusa MINI+

Zkušební vzorky byly vytištěny na FDM 3D tiskárně Original Prusa MINI+ (obr. 15). Jejím výrobcem je česká společnost Prusa Research a.s. Tato tiskárna umožňuje tisk objektů o maximálních rozměrech 180×180×180 mm. Tisknout dokáže takřka všechny materiály, které se k tisku metodou FDM používají (PLA, PETG, ABS, ASA, PC, Flex a další), a to prostřednictvím filamentu o průměru 1,75 mm. Základní tryska tiskárny má průměr 0,4 mm a tiskárna ji dokáže zahřát maximálně na teplotu 280 °C. Tiskový povrch tvoří vyhřívané odnímatelné magnetické ocelové pláty, které tiskárna zvládne zahřát až na teplotu 100 °C (Prusa Research a.s.).

Tiskárna Original Prusa MINI+ je vybavena bowdenovým extruderem. Ten se od běžněji užívaného direct drive extruderu liší umístěním motoru, který dopravuje filament. Podávací motor extruderu typu direct drive je umístěn přímo nad tryskou, což umožňuje lepší kontrolu nad podáváním filamentu. Oproti tomu tiskárny s bowdenovým extruderem mají podávací motor umístěn dále od trysky (v případě použité tiskárny na hlazených tyčích osy Z). Použitím této konstrukce dochází ke snížení hmotnosti tiskové hlavy, což ji dovoluje rychlejší pohyby a tím i tisk. Při tisku křehčích materiálů však může docházet k lámání

filamentu z důvodu příliš velkého úhlu ohnutí vlákna trubičky vedoucí z bowdenového extruderu (Print With Smile).



Obrázek 15 Tiskárna Original Prusa MINI+ se zkušebním vzorkem na tiskové ploše

4.2.2. ISOMET 2104

ISOMET 2104 je přístroj vyrobený slovenskou společností Applied Precision s.r.o. Přístroj lze využít k měření termofyzikálních vlastností materiálů využívaných ve stavebnictví, v chemickém, gumárenském a dřevařském průmyslu a v geologii (obr. 16). Měření probíhá prostřednictvím výměnných sond. Přístroj umožňuje měření součinitele tepelné vodivosti, měrné objemové tepelné kapacity a teploty. K měření aplikuje dynamickou metodu, díky které se doba měření jednoho vzorku pohybuje okolo 15 minut.

Přístroj umožňuje měření pomocí dvou typů sond – jehlových a plošných. Jehlové sondy jsou vhodné k měření měkkých materiálů, do kterých lze jehlu sondy zapíchnout. Případně lze do zkušebního vzorku vyvrtat otvor, do kterého může být jehla vložena. Oproti tomu plošné sondy jsou používány k měření pevných a tvrdých materiálů s rovnou a hladkou měřicí plochou.

Pro účely měření byla vybrána sonda API 210411. Jedná se o plošnou sondu pro měření termofyzikálních vlastností, která je schopna měřit součinitel tepelné vodivosti

materiálů v rozsahu $0,04$ až $0,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ s maximální chybou 5% z naměřené hodnoty + $0,001 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.



Obrázek 16 Měření tepelné vodivosti přístrojem ISOMET 2104

Přístroj měří na principu analýzy teplotní odezvy měřeného materiálu na impulzy teplotního toku. Teplotní impulzy jsou vytvářeny pomocí odporového ohříváče umístěného uvnitř sondy a následně přenášeny povrchem sondy do měřeného materiálu. Hodnota součinitele tepelné vodivosti materiálu je získána vyhodnocením záznamů teploty jako funkce času.

Na přesnost naměřených hodnot má při použití plošné sondy vliv rovinnost a hladkost povrchu měřeného vzorku, jelikož tyto parametry ovlivňují kvalitu tepelného kontaktu mezi sondou a měřeným materiálem. Mezi další vlastnosti měřeného vzorku, které mají vliv na přesnost měření, patří jeho rozměry, vlhkost a případná nehomogenost (Applied Precision, 2007).

4.2.3. ALMEMO 2890-9 a FHAD 46-41

Univerzální měřicí přístroj ALMEMO 2890-9 od německé společnosti Ahlborn GmbH umožňuje připojení různých čidel pro měření fyzikálních, elektrických a chemických veličin. K přístroji lze připojit sondu FHAD 46-41 od stejné společnosti, která umožňuje snímat teplotu vzduchu, relativní vlhkost, rosný bod a atmosférický tlak (obr. 17).

Relativní vlhkost dokáže sonda měřit v rozsahu 5 až 98 % a teplotu vzduchu v rozsahu -20 až +80 °C (Ahlborn, 2011).



Obrázek 17 Měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu přístrojem ALMEMO 2890-9 se sondou FHAD 46-41

4.2.4. Další použité přístroje

K sušení filamentů před tiskem byl použit sušící box Sunlu FilaDryer S2. Digitální modely byly vytvořeny v softwaru Autodesk Fusion 360 a pro tisk připraveny v softwaru PrusaSlicer 2.6.1. Vyrobené vzorky byly váženy na laboratorní váze Kern KB 2000-N s přesností na 0,01g. K mechanickým zkouškám byly použity trhací stroje Labortech MPTest 5.050 a Tempos ZDM 50, které byly ovládány softwarem Labortech Test & Motion.

4.3. Postup měření

4.3.1. Měření teplotních vlastností

Teplotní vlastnosti vytištěných vzorků byly měřeny ve vytápěné místnosti Technické fakulty na České zemědělské univerzitě v Praze. Relativní vlhkost vzduchu během měření byla $36 \pm 4 \%$ a teplota vzduchu se pohybovala v rozsahu $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Zjišťované teplotní vlastnosti byly: součinitel tepelné vodivosti λ , měrná objemová tepelná kapacita c a součinitel teplotní vodivosti α .

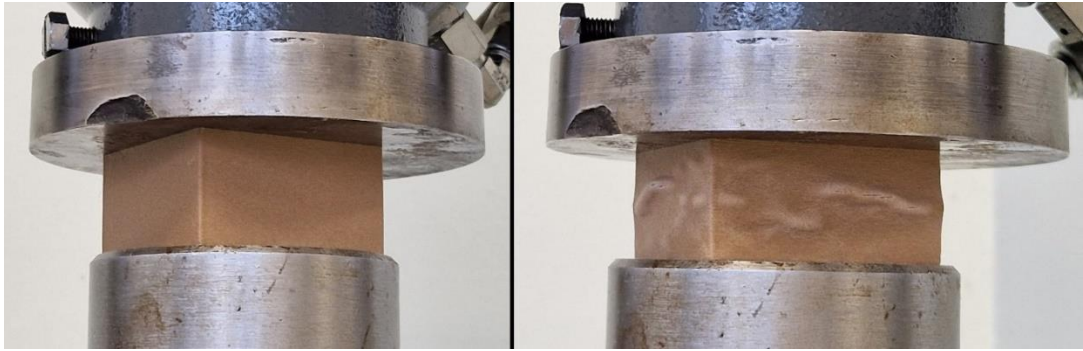


Obrázek 18 Všechny vzorky použité k měření teplotních a tlakových vlastností

Každý vzorek (obr. 18) byl měřen třikrát, čímž pro každou hodnotu hustoty vnitřní výplně a konkrétní materiál vzniklo šest sad dat (každý vzorek byl vytištěn ve dvou kopiích). K měření byl použit přístroj ISOMET 2104.

4.3.2. Měření tlakových vlastností

Vzorky určené pro měření tlakových vlastností byly stlačovány pomocí přístroje Tempos ZDM 50 (obr. 19). Zkušební rychlost byla nastavena na $5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Zjišťována byla mez pevnosti v tlaku σ_M , což je nejvyšší napětí, kterému zkušební těleso během zkoušky odolá (ČSN EN ISO 604).



Obrázek 19 Vzorek během tlakové zkoušky

4.3.3. Měření tahových vlastností

Odolnost vzorků v tahu byla zjišťována pomocí trhacího stroje Labortech MPTest 5.050 (obr. 20). Zkušební rychlost byla $2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Parametrem pro zastavení zkoušky byl pokles síly o 50 % - tedy porušení zkušebního tělesa. Naměřená data byla použita k sestrojení smluvních tahových diagramů.



Obrázek 20 Měření tahových vlastností

4.4. Statistické vyhodnocení

4.4.1. Vyhodnocení tepelné vodivosti

Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti byly průběžně zapisovány do tabulkového procesoru Microsoft Excel. Zpracování naměřených dat proběhlo za použití doplňku Analytické nástroje Microsoft Excel. Vizualizace naměřených hodnot byla provedena použitím bodového grafu.

Byla zjišťována závislost součinitele tepelné vodivosti na množství vnitřní výplně. Ke zjištění vlastností statistické závislosti byla využita korelační a regresní analýza. Korelační analýza byla použita pro zjištění výskytu statistické závislosti a následně také pro určení její síly. Pomocí regresní analýzy byl vymodelován vztah mezi vysvětlovanou proměnou (součinitel tepelné vodivosti) a vysvětlující proměnou (množství vnitřní výplně) (Hindls et al., 2018).

Nejprve byla za použití Pearsonova korelačního koeficientu ověřena síla závislosti sledovaných proměnných. Tato závislost byla následně kvantifikována pomocí jednoduché lineární regrese. Následně byla využita vícenásobná lineární regrese pro sledování závislosti součinitele tepelné vodivosti nejen na hodnotě vnitřní výplně, ale i na použitém materiálu (Hindls et al., 2018).

4.4.2. Vyhodnocení tlakových vlastností

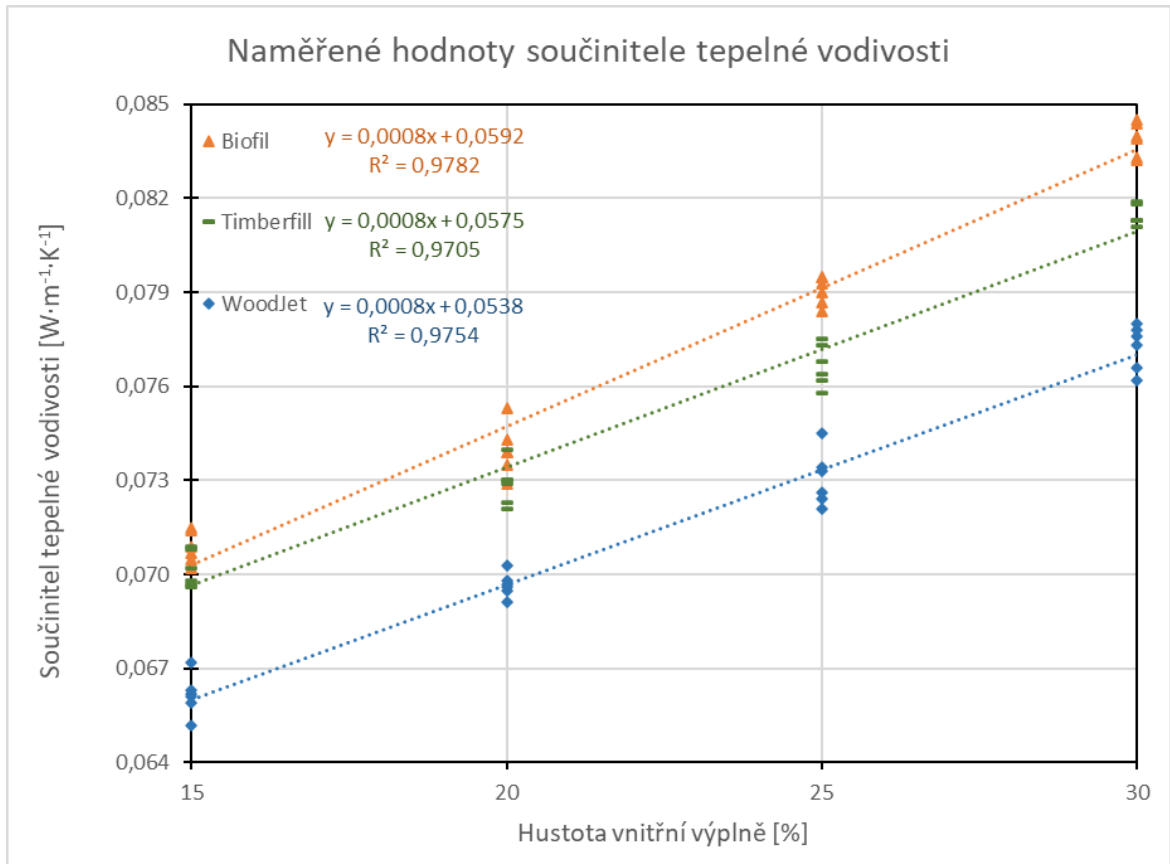
Během každé tlakové zkoušky byly zaznamenávány údaje o dráze stlačení vzorku a působící síle. Tyto údaje byly poté využity k výpočtu poměrného stlačení a napětí (plocha průřezu byla vypočtena zvláště pro každou hodnotu hustoty vnitřní výplně). Vypočtené hodnoty byly následně graficky zobrazeny v bodovém grafu.

4.4.3. Vyhodnocení tahových vlastností

Obdobně jako při tlakových zkouškách byly i při zkouškách tahových vlastností zaznamenávány údaje potřebné k vypočtení poměrného prodloužení a napětí. Z vypočtených hodnot byly následně sestrojeny smluvní tahové diagramy zkoušených vzorků.

5. Výsledky

5.1. Výsledky měření tepelné vodivosti



Graf 4 Závislost součinitele tepelné vodivosti na hustotě vnitřní výplně

5.1.1. Korelační a regresní analýza

Regresní statistika	
Korelační koeficient R	0,878
Koeficient determinace R^2	0,771

Tabulka 6 Pearsonův korelační koeficient a index determinace jednoduché regrese

Pearsonův korelační koeficient R může nabývat hodnot -1 až 1, přičemž -1 značí nepřímou lineární závislost a 1 přímou lineární závislost. Dle tabulky 6 má hodnotu 0,878, což značí silnou závislost sledovaných proměnných.

Index determinace R^2 může nabývat hodnot mezi 0 až 1. Při hodnotách R^2 blízkých 1 lze konstatovat, že regresní model vysvětluje značnou část variability závislé

proměnné (v tomto případě součinitele tepelné vodivosti). Z tabulky 6 vyplývá, že hodnota indexu determinace je přibližně 77 %, což znamená, že změna výplně předpovídá 77 % variability tepelné vodivosti.

5.1.1.1. Jednoduchá regrese

	Koeficient	Chyba stř. hodnoty	t Stat	P hodnota
β_0	5,682E-02	1,191E-03	47,694	4,070E-55
β_1	7,898E-04	5,139E-05	15,370	3,976E-24

Tabulka 7 Hodnoty získané jednoduchou regresí

Z tabulky 7 je patrné, že závislost součinitele tepelné vodivosti a výplně lze zapsat pomocí rovnice:

$$\lambda = 0,05682 + 0,0007898 \cdot \text{infill} \quad (2)$$

Kde:

λ – součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

infill – množství vnitřní výplně (%)

Tabulka 7 dále uvádí, že P hodnoty obou koeficientů (β_0 a β_1) jsou nižší než 1 %, jsou tedy statisticky významné. Koeficient β_0 (0,05682) udává odhad střední hodnoty vysvětlované proměnné (součinitele tepelné vodivosti) za předpokladu, že je vysvětlující proměnná (množství vnitřní výplně) rovna nule. Koeficient β_1 (0,0007898) udává, že vzroste-li výplň o 1 %, zvýší se tepelná vodivost o zhruba $0,0007898 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

5.1.1.2. Vícenásobná regrese

V rámci vícenásobné regresní analýzy byl do statistického modelu přidán typ materiálu jako další vysvětlující proměnná ve formě binárních proměnných (A/B pro WoodJet, C/D pro Biofil Wood a E/F pro Timberfill).

	Koeficient	Chyba stř. hodnoty	t Stat	P hodnota
A/B	5,376E-02	4,248E-04	126,557	1,872E-82
C/D	5,918E-02	4,248E-04	139,308	2,806E-85
E/F	5,752E-02	4,248E-04	135,414	1,916E-84
Infill	7,898E-04	1,734E-05	45,542	1,116E-52

Tabulka 8 Hodnoty získané vícenásobnou regresí

Tabulka 8 udává, že závislost součinitele tepelné vodivosti na množství vnitřní výplně a typu materiálu lze popsat rovnicí:

$$\lambda = 0,05376 \cdot A/B + 0,05918 \cdot C/D + 0,05752 \cdot E/F + 0,0007898 \cdot \text{infill} \quad (3)$$

Kde:

proměnné A/B , C/D a E/F jsou binární proměnné a nabývají hodnot 0 nebo 1

Proměnná A/B nabývá hodnoty 1, pokud jde o vzorek vyrobený z materiálu WoodJet a hodnoty 0 pokud je vzorek vyrobený z jiného materiálu. Koeficient A/B říká, že odhad střední hodnoty tepelné vodivosti pro vzorek vyrobený z materiálu WoodJet je zhruba $0,05376 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (za předpokladu nulové vnitřní výplně). Výpočet střední hodnoty tepelné vodivosti pro vzorek z materiálu WoodJet v závislosti na výplni je poté:

$$\lambda_{A/B} = 0,05376 + 0,0007898 \cdot \text{infill} \quad (4)$$

Pro materiál Biofil Wood platí:

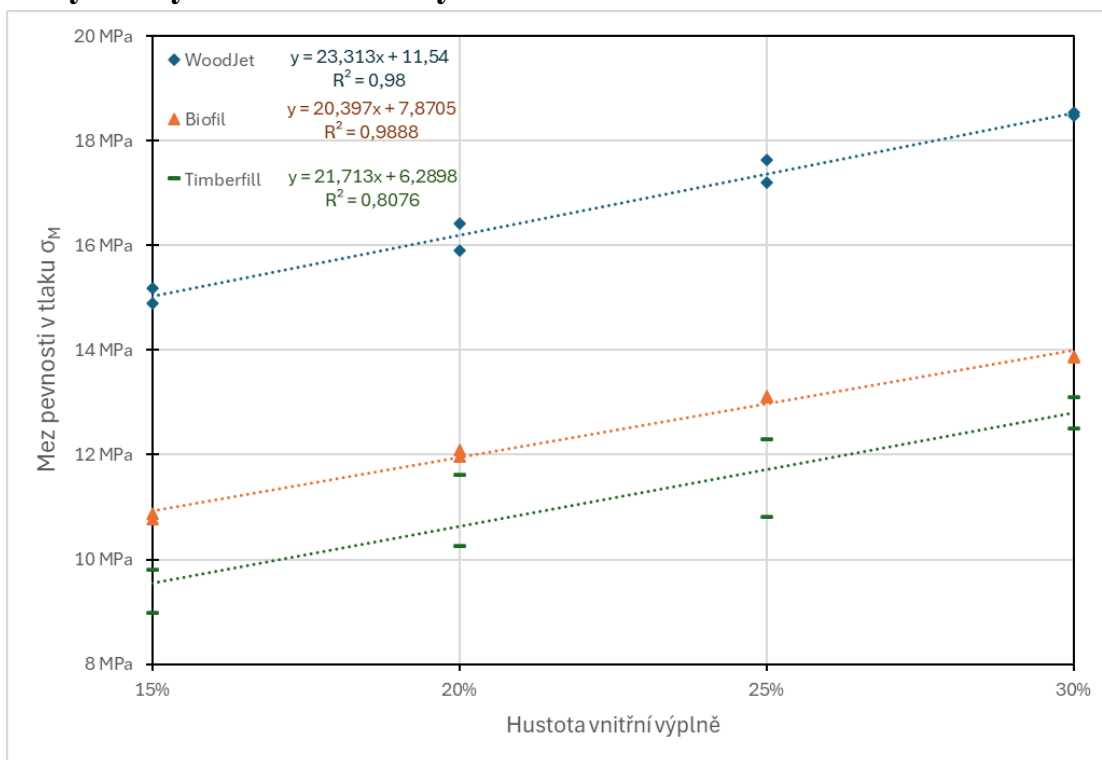
$$\lambda_{C/D} = 0,05918 + 0,0007898 \cdot \text{infill} \quad (5)$$

Pro materiál Timberfill platí:

$$\lambda_{E/F} = 0,05752 + 0,0007898 \cdot \text{infill} \quad (6)$$

P-hodnota pro koeficienty všech proměnných je menší, než 1 %, jsou tedy také statisticky významné na všech rozumných hladinách významnosti. Hodnota indexu determinace takto odhadovaného modelu vychází 0,9998, tento model tedy vysvětluje téměř 100 % variability.

5.2. Výsledky zkoušek tlakových vlastností

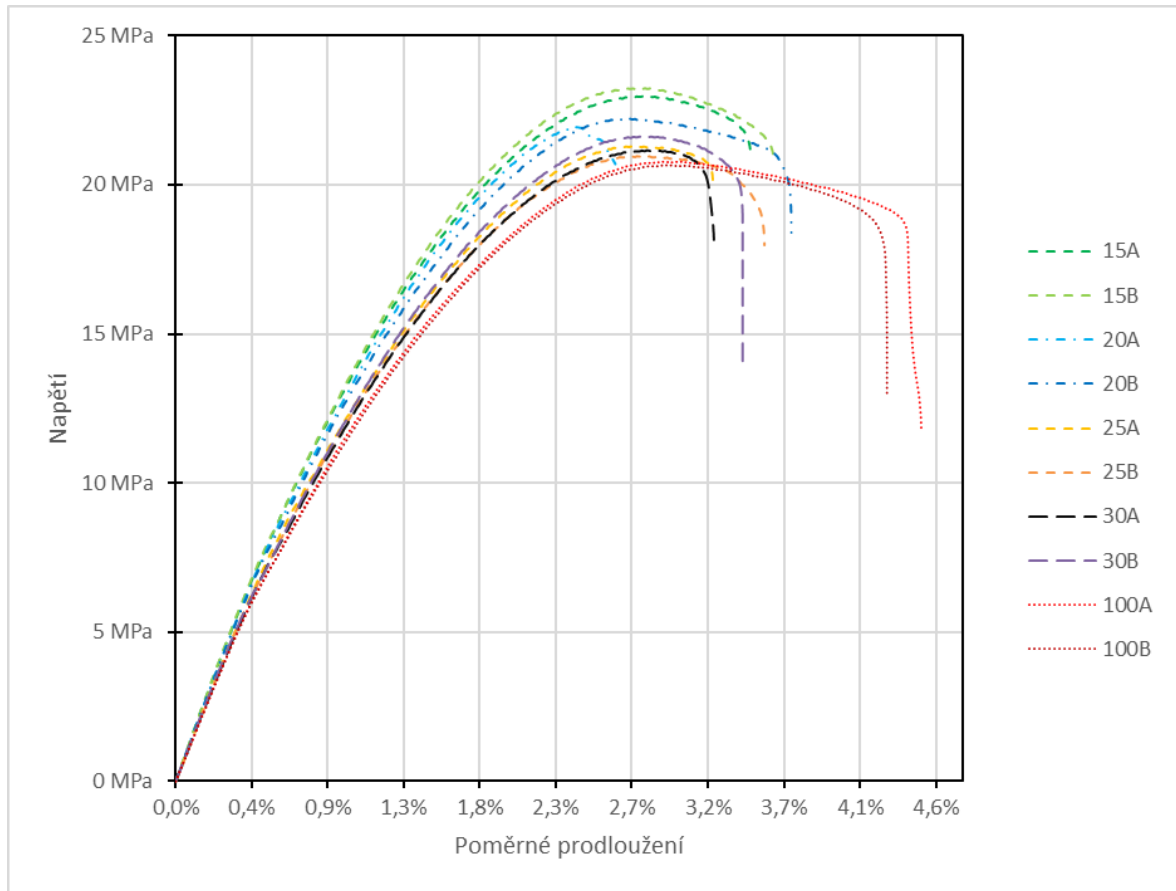


Graf 5 Závislost meze pevnosti v tlaku na hustotě vnitřní výplně

Vzorek	Výplň	Materiál	Mez pevnosti v tlaku	Při stlačení
C15A	15%	WoodJet	15,18 MPa	6,53%
C15B	15%	WoodJet	14,90 MPa	6,38%
C20A	20%	WoodJet	16,42 MPa	7,13%
C20B	20%	WoodJet	15,91 MPa	7,15%
C25A	25%	WoodJet	17,64 MPa	8,63%
C25B	25%	WoodJet	17,21 MPa	9,47%
C30A	30%	WoodJet	18,49 MPa	11,34%
C30B	30%	WoodJet	18,53 MPa	12,14%
C15C	15%	Biofil Wood	10,88 MPa	6,40%
C15D	15%	Biofil Wood	10,77 MPa	6,05%
C20C	20%	Biofil Wood	12,09 MPa	7,56%
C20D	20%	Biofil Wood	11,97 MPa	7,26%
C25C	25%	Biofil Wood	13,13 MPa	9,12%
C25D	25%	Biofil Wood	13,10 MPa	8,54%
C30C	30%	Biofil Wood	13,88 MPa	10,75%
C30D	30%	Biofil Wood	13,85 MPa	10,32%
E15E	15%	Timberfill	9,81 MPa	5,66%
E15F	15%	Timberfill	8,99 MPa	5,12%
E20E	20%	Timberfill	11,61 MPa	5,65%
E20F	20%	Timberfill	10,25 MPa	6,43%
E25E	25%	Timberfill	10,82 MPa	6,00%
E25F	25%	Timberfill	12,30 MPa	8,19%
E30E	30%	Timberfill	12,51 MPa	8,60%
E30F	30%	Timberfill	13,11 MPa	10,25%

Tabulka 9 Naměřené hodnoty tlakových vlastností

5.3. Výsledky zkoušek tahových vlastností



Graf 6 Smluvní tahový diagram zkoušených vzorků

Vzorek	Výplň	Materiál	Mez pevnosti v tahu	Při pom. prodloužení
15A	15%	WoodJet	22,98 MPa	2,86%
15B	15%	WoodJet	23,24 MPa	2,87%
20A	20%	WoodJet	21,93 MPa	2,46%
20B	20%	WoodJet	22,22 MPa	2,78%
25A	25%	WoodJet	21,29 MPa	2,79%
25B	25%	WoodJet	20,96 MPa	2,87%
30A	30%	WoodJet	21,16 MPa	2,89%
30B	30%	WoodJet	21,62 MPa	2,88%
100A	100%	WoodJet	20,79 MPa	3,02%
100B	100%	WoodJet	20,66 MPa	3,01%

Tabulka 10 Naměřené hodnoty tahových vlastností

6. Diskuze

Z grafu 4, zobrazující vztah mezi součinitelem tepelné vodivosti a hustotou vnitřní výplně, je patrné, že mezi těmito veličinami existuje závislost. Míra této závislosti je poté popsána korelační a regresní analýzou v kapitole 5.1.1. Vícenásobná regrese v kapitole 5.1.1.2., která bere v úvahu i konkrétní použitý materiál, naznačuje, že pravděpodobnost, se kterou by se sledovaná závislost vyskytla pouze náhodou, je velmi nízká. Lze tedy konstatovat, že existuje přímá úměra mezi sledovanými veličinami. Snížení hustoty vnitřní výplně vytištěného objektu má za následek snížení součinitele tepelné vodivosti, čímž je možné vyrábět výtisky s lepšími izolačními vlastnostmi.

Odchytky mezi naměřenými hodnotami v rámci jednoho vzorku mohly vzniknout změnami teploty a relativní vlhkosti prostředí, ve kterém měření probíhalo. Dalším zdrojem odchylek může být například nehomogenost filamentů, které byly k výrobě vzorků použity, jelikož složení a průměr tiskové struny může kolísat. Odchytku přináší také samotná metoda použitá k měření tepelné vodivosti, která je citlivá na kvalitu tepelného kontaktu mezi měřeným materiálem a použitou plošnou sondou.

Nejnižších hodnot součinitele tepelné vodivosti bylo naměřeno na vzorcích s hustotou vnitřní výplně 15 % a objemovou hmotností $0,302 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, vyrobených z filamentu WoodJet. Naměřený součinitel tepelné vodivosti těchto vzorků byl $0,066 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Součinitel tepelné vodivosti materiálu PLA, který tvoří hlavní podíl ve složení filamentu WoodJet, se pohybuje okolo $0,13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Iron Boar Labs Ltd., 2021). Zlepšení termoizolačních vlastností oproti tabulkové hodnotě lze přičíst zejména pórovitosti měřených vzorků.

K podobným závěrům došli i Bahar et al. (2023) ve své studii, která se zabývala možnostmi využití aditivní výroby z termoplastů s dřevními příměsmi pro stavební izolace. K výrobě vzorků použili filament ze směsi PLA a částic z borového dřeva. Autoři potvrdili kladnou korelaci mezi součinitelem tepelné vodivosti a hustotou vnitřní výplně. Tuto skutečnost vysvětlují tím, že výtisky s vyšší hustotou výplně obsahují více vzduchu, který má lepší izolační vlastnosti než použitý filament. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti naměřené autory se takřka shodují s těmi, které byly v této diplomové práci naměřeny na vzorcích z materiálu WoodJet. Na vzorcích z materiálů Timberfill a Biofil Wood byl naměřený součinitel tepelné vodivosti průměrně o přibližně 9 % a 11% vyšší. Tyto odchylky lze vysvětlit odlišným složením použitých filamentů či různými nastaveními

tisku. Bahar et al. (2023) použili odlišnou výšku vrstvy, průměr trysky, vzor výplně a tiskovou teplotu.

Pozitivní korelaci mezi součinitelem tepelné vodivosti a hustotou vnitřní výplně potvrdili i Aw et al. (2018). Ti měřili vzorky vyrobené rovněž technologií FDM, avšak ze směsi materiálu ABS a ZnO (oxid zinečnatý). Jimi měřené vzorky měly hustotu vnitřní výplně v rozmezí 50 až 100 %, proto nelze porovnávat konkrétní naměřené hodnoty.

Skutečnost, že přímá úměra mezi tepelnou vodivostí a hustotou materiálu existuje i při využití jiné metody aditivní výroby než FDM, dokázali Grabowska a Kasperski (2020). Autoři měřili tepelnou vodivost vzorků vyrobených metodou SLS z materiálu PA-12. Nejlepších izolačních vlastností dosáhli na vzorcích o objemové hmotnosti $0,18 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, na kterých naměřili součinitel tepelné vodivosti $0,0591 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Lopes et al. (2023) zkoumali vliv různých vzorů výplně na tepelnou vodivost. K měření použili vzorky tištěné metodou FDM z filamentu PETG a porovnávali mezi sebou 12 různých vzorů výplně. Nejlepší tepelně izolační vlastnosti naměřili na vzorkách vytištěných s koncentrickým (concentric) vzorem výplně. Konkrétní nejnižší naměřená hodnota součinitele tepelné vodivosti byla $0,057 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ při objemové hmotnosti $0,307 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Srovnatelnou objemovou hmotnost mají v této diplomové práci vzorky s hustotou vnitřní výplně 15 %. Autoři práce však zmiňují skutečnost, že jimi použitý koncentrický vzor výplně neposkytuje výtiskům dostatečnou mechanickou oporu. Také upozorňují, že nízkou hodnotu součinitele tepelné vodivosti vzorku s tímto vzorem výplně, lze přičíst faktu, že vnitřní výplň se v žádném bodě nedotýkala strany vzorku, na které měření probíhalo. Autoři tiskli své vzorky z materiálu PETG, který má přibližně dvojnásobnou tabulkovou hodnotu součinitele tepelné vodivosti oproti materiálu PLA, na jehož bázi je vyrobena většina vzorků použitých v této diplomové práci. Objektivnímu porovnání naměřených hodnot brání i dvojnásobný průměr trysky a výšky vrstvy, které autoři k tisku svých vzorků použili. Autoři zmiňují, že dalšího zlepšení tepelně izolačních vlastností by bylo možné dosáhnout vyplněním vnitřního volného prostoru vzorků některým z izolačních materiálů.

Graf 5 zobrazuje naměřené hodnoty meze pevnosti v tlaku v závislosti na hustotě vnitřní výplně. Rovnice a koeficienty determinace uvedené v grafu lze interpretovat analogicky ke kapitole 5.1.1. Z grafu je patrné, že při rostoucí hustotě vnitřní výplně roste i nejvyšší napětí, kterému je schopný vytištěný objekt odolat. V tabulce 9 jsou poté

zaznamenány konkrétní hodnoty meze pevnosti v tlaku jednotlivých vzorků a hodnoty poměrného stlačení, při kterých bylo nejvyšší napětí naměřeno.

Přímou úměru mezi nárůstem pevnosti v tlaku a hustotu výplně potvrdili i Liu et al. (2023), kteří měřili tlakové vlastnosti vzorků vyrobených metodou FDM z kompozitního filamentu ze směsi nylonu a mikrouhlíkových vláken.

Pernet et al. (2022) posuzovali tlakové vlastnosti objektů s různými vzory výplně vyrobených aditivní technologií. Měřené vzorky vyrobili z filamentu PLA metodou FDM podle normy ASTM D695. Autoři použili odlišný způsob interpretace dat, kdy posuzovali závislost maximální síly, které je vzorek schopný odolat na hmotnosti vzorku. V rámci výzkumu této závislosti autoři potvrdili pozitivní korelaci a zmínili, že na tlakové vlastnosti výtisků má vedle objemové hmotnosti vliv i zvolený vzor výplně. Kubický vzor výplně, který byl použit na výrobu výtisků v této diplomové práci, se umístil až na 11. místě ze 14 testovaných vzorů. Hodnotícím kritériem byl poměr maximálního zatížení ku hmotnosti vzorku. Autoři práce však upozorňují, že měřené vzorky byly zatěžovány pouze v jednom ze tří směrů, což mohlo některé jiné vzory výplně zvýhodnit.

Smluvní tahové diagramy měřených vzorků jsou zobrazeny v grafu 6. Konkrétní naměřené údaje lze vyčíst z tabulky 10. Z vizualizací je patrné, že nejvyšší mez pevnosti byla naměřena při nejnižší hodnotě hustoty vnitřní výplně (15 %) a naopak nejnižšímu napětí dokázaly odolat vzorky s nejhustší vnitřní výplní (100 %). Jedním ze zdrojů této skutečnosti může být vliv perimetrů (vnějších stěn) výtisků na tahové vlastnosti (detailněji popsáno v kapitole 4.1.2.2.). Je také potřeba upozornit, že měření neprobíhalo na standardních vzorcích dle normy ČSN EN ISO 527-2, ale na vzorcích se zvýšenou tloušťkou, a to právě z důvodu snahy zvýšit vliv vnitřní výplně oproti perimetrům. Je možné připustit, že výběr vzorků k provedení zkušebního měření nebyl optimální a že pro provedení zkoušek tahových vlastností by mohlo být vhodnější použití jiného typu vzorků či metody.

Gunasekaran et al. (2021) zkoumali tahové vlastnosti vzorků vyrobených z filamentu PLA metodou FDM. Během tahových zkoušek naměřili slabý nárůst pevnosti v tahu při rostoucí hustotě vnitřní výplně. Jimi zkoumané vzorky však byly vyrobeny podle normy ASTM D638 a hustotami vnitřních výplní 25, 50, 75 a 100 %. Rozdíly ve výsledných hodnotách oproti této diplomové práci mohou být způsobeny také odlišnými nastaveními tisku. Autoři použili třikrát nižší výšku vrstvy (0,1 mm) a vyšší tiskové teploty.

Vlivem hustoty vnitřní výplně na mechanické vlastnosti se zabývali také Dobos et al. (2022). Své vzorky vyrobili metodou FDM z materiálu PLA dle normy ISO 527-2 s hustotami vnitřních výplní o hodnotách: 40, 60, 80 a 100 %. Autoři práce došli k závěru, že existuje pozitivní korelace mezi mezí pevnosti v tahu a hustotou vnitřní výplně výtisků. Ke stejnému závěru došli i Srinivasan et al. (2020), kteří měřili vzorky vyrobené z filamentu PETG dle normy ASTM D638.

Rozdíly ve výsledcích tahových zkoušek mezi touto diplomovou prací a odbornou literaturou mohly vzniknout také z důvodu rozdílné metody výpočtu plochy průřezu vzorků. Plocha průřezu přímo ovlivňuje vypočtené hodnoty napětí v tahu.

Z výše uvedeného je patrné, že hustota vnitřní výplně má vliv na tepelné i mechanické vlastnosti výtisků. Další výzkum v oblasti tepelně izolačních vlastností by se mohl týkat porovnání filamentů obsahujících organické příměsi s ostatními filamenti používanými pro tisk metodou FDM. Před doporučením zkoušených filamentů pro konkrétní aplikace by bylo vhodné hlouběji prozkoumat jejich tepelnou odolnost a životnost z dlouhodobějšího hlediska. Vhodné by bylo také důkladněji zanalyzovat vliv organických příměsí ve filamentech na jejich biologickou rozložitelnost. To by potenciálně mohlo zvýšit opodstatnitelnost jejich využití pro různorodé aplikace.

7. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá zjišťováním tepelně izolačních a mechanických vlastností objektů vyrobených metodou FDM z filamentů s organickými příměsmi. Posouzení těchto vlastností je klíčové pro možnosti využití filamentů s obsahem organických látek například v oblasti stavebních izolací.

V literární rešerši byla nejprve stručně popsána historie a současnost aditivní výroby. Následně byly detailněji rozebrány nejpoužívanější metody 3D tisku. Zvláštní pozornost byla věnována tepelným vlastnostem materiálů používaných k aditivní výrobě. Popsány byly také mechanismy sdílení tepla a faktory ovlivňující tepelnou vodivost materiálů.

V praktické části je odůvodněn výběr konkrétních filamentů a popsán postup použitý při volbě rozměrů zkušebních vzorků. Také je zde rozebrána volba tiskových nastavení a popsány způsoby, kterými jednotlivá nastavení mění vlastnosti hotového výrobku. Kapitola se zabývá i popisem přístrojů použitých pro zkušební měření.

Pro účely experimentálních měření byly vyrobeny dvě sady vzorků. Vzorky o rozměrech 65×65×35 mm byly použity pro zjišťování tepelné vodivosti a tlakových vlastností filamentů. Odlišná sada vzorků byla použita pro ověření tahových vlastností. Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a vyneseny do grafů a tabulek.

Z měření tepelných vlastností vyplývá, že součinitel tepelné vodivosti roste úměrně hustotou vnitřní výplně. Tato závislost byla ověřena korelační a regresní analýzou. Nejlepších izolačních vlastností dosahoval filament WoodJet, poté Timberfill a Biofil Wood. Nejnižší naměřená hodnota součinitele tepelné vodivosti byla rovna $0,066 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro dosažení nejlepších tepelně izolačních vlastností je tedy vhodné použít co nejnižší hustotu vnitřní výplně. S klesající hustotou vnitřní výplně však klesá i mez pevnosti v tlaku. To bylo zjištěno měřením tlakových vlastností výtisků. Nejvyšší mez pevnosti v tlaku vykazovaly vzorky vyrobené z filamentu WoodJet. Tahové zkoušky byly provedeny na odlišné sadě vzorků a jejich vyhodnocení vykazovalo opačný trend. Vzorky s nižší hustotou výplně dokázaly odolat vyšším napětím. Možné zdůvodnění tohoto jevu je popsáno v diskuzi spolu s podrobným porovnáním všech naměřených hodnot s odbornou literaturou.

Pro budoucí výzkum by bylo vhodné porovnat tepelně izolační vlastnosti filamentů s organickými příměsmi s ostatními, běžně dostupnými filamenty. Je také nutné provést hlubší analýzu tepelné odolnosti a životnosti těchto filamentů. Tyto znalosti by umožnily provést konkrétní doporučení pro aplikaci výše zkoumaných materiálů.

Seznam použitých zdrojů

AW, Yah; YEOH, Cheow; IDRIS, Muhammad; TEH, Pei; HAMZAH, Khairul et al., 2018. Effect of Printing Parameters on Tensile, Dynamic Mechanical, and Thermoelectric Properties of FDM 3D Printed CABS/ZnO Composites. Online. *Materials*. Roč. 11, č. 4. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma11040466>. [cit. 2024-03-10].

BAHAR, Anis; HAMAMI, Ameer El Amine; BENMAHIDDINE, Ferhat; BELHABIB, Sofiane; BELARBI, Rafik et al., 2023. The Thermal and Mechanical Behaviour of Wood-PLA Composites Processed by Additive Manufacturing for Building Insulation. Online. *Polymers*. Roč. 15, č. 14. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15143056>. [cit. 2024-02-07].

BUJ-CORRAL, Irene; TEJO-OTERO, Aitor a FENOLLOSA-ARTÉS, Felip, 2020. Development of AM Technologies for Metals in the Sector of Medical Implants. Online. *Metals*. Roč. 10, č. 5. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met10050686>. [cit. 2024-01-16].

DAVER, Fugen; LEE, Kok Peng Marcian; BRANDT, Milan a SHANKS, Robert, 2018. Cork-PLA composite filaments for fused deposition modelling. Online. *Composites Science and Technology*. Roč. 168, s. 230-237. ISSN 02663538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.10.008>. [cit. 2024-02-03].

DEPUYDT, Delphine; BALTHAZAR, Michiel; HENDRICKX, Kevin; SIX, Wim; FERRARIS, Eleonora et al., 2019. Production and characterization of bamboo and flax fiber reinforced polylactic acid filaments for fused deposition modeling (FDM). Online. *Polymer Composites*. Roč. 40, č. 5, s. 1951-1963. ISSN 0272-8397. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pc.24971>. [cit. 2024-02-03].

DIZON, John Ryan C.; ESPERA, Alejandro H.; CHEN, Qiyi a ADVINCULA, Rigoberto C., 2018. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. Online. *Additive Manufacturing*. Roč. 20, s. 44-67. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>. [cit. 2024-02-03].

DOBOS, József; HANON, Muammel M. a OLDAL, István, 2022. Effect of infill density and pattern on the specific load capacity of FDM 3D-printed PLA multi-layer sandwich. Online. *Journal of Polymer Engineering*. 2022-02-23, roč. 42, č. 2, s. 118-128. ISSN 0334-6447. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/polyeng-2021-0223>. [cit. 2024-03-05].

GAO, Harry; KAWEEESA, Dorcas V.; MOORE, Jacob a MEISEL, Nicholas A., 2017. Investigating the Impact of Acetone Vapor Smoothing on the Strength and Elongation of Printed ABS Parts. Online. *JOM*. Roč. 69, č. 3, s. 580-585. ISSN 1047-4838. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2214-5>. [cit. 2024-01-20].

GONZÁLEZ, Carlos M., 2020. *Infographic: The History of 3D Printing*. Online. The American Society of Mechanical Engineers. Dostupné z: <https://www.asme.org/topics-resources/content/infographic-the-history-of-3d-printing>. [cit. 2024-01-15].

GRABOWSKA, Beata a KASPERSKI, Jacek, 2020. The Thermal Conductivity of 3D Printed Plastic Insulation Materials—The Effect of Optimizing the Regular Structure of Closures. Online. *Materials*. Roč. 13, č. 19. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13194400>. [cit. 2024-03-10].

GRIMM, Todd, 2004. *User's guide to rapid prototyping*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers. ISBN 08-726-3697-6.

GUNASEKARAN, K.N.; ARAVINTH, Vishaal; MUTHU KUMARAN, C.B.; MADHANKUMAR, K. a PRADEEP KUMAR, S., 2021. Investigation of mechanical properties of PLA printed materials under varying infill density. Online. *Materials Today: Proceedings*. Roč. 45, s. 1849-1856. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.041>. [cit. 2024-03-11].

GUO, Rui; REN, Zechun; BI, Hongjie; SONG, Yongming a XU, Min, 2018. Effect of toughening agents on the properties of poplar wood flour/poly (lactic acid) composites fabricated with Fused Deposition Modeling. Online. *European Polymer Journal*. Roč. 107, s. 34-45. ISSN 00143057. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.07.035>. [cit. 2024-02-03].

HINDLS, Richard; ARLTOVÁ, Markéta; HRONOVÁ, Stanislava; MALÁ, Ivana; MAREK, Luboš et al., 2018. *Statistika v ekonomii*. [Průhonice]: Professional Publishing. ISBN 978-80-88260-09-7.

HUNG ANH, Le Duong a PÁSZTORY, Zoltán, 2021. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. Online. *Journal of Building Engineering*. Roč. 44. ISSN 23527102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102604>. [cit. 2024-02-11].

CHYBÍK, Josef, 2009. *Přírodní stavební materiály*. Stavitel. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-2532-1.

ISLAM, Shafiqul a BHAT, Gajanan, 2019. Environmentally-friendly thermal and acoustic insulation materials from recycled textiles. Online. *Journal of Environmental Management*. Roč. 251. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109536>. [cit. 2024-02-07].

ISLAM, Shafiqul; BHAT, Gajanan a SIKDAR, Partha, 2023. Thermal and acoustic performance evaluation of 3D-Printable PLA materials. Online. *Journal of Building Engineering*. Roč. 67. ISSN 23527102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105979>. [cit. 2024-02-07].

JOSEPH, Tomy Muringayil; KALLINGAL, Anoop; SURESH, Akshay Maniyeri; MAHAPATRA, Debarshi Kar; HASANIN, Mohamed S. et al., 2023. 3D printing of polylactic acid: recent advances and opportunities. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Roč. 125, č. 3-4, s. 1015-1035. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10795-y>. [cit. 2024-01-19].

KELAVA, Leonardo; IVIĆ, Ivan; PAKAI, Eszter; FEKETE, Kata; MAROTI, Peter et al., 2022. Stereolithography 3D Printing of a Heat Exchanger for Advanced Temperature Control in Wire Myography. Online. *Polymers*. Roč. 14, č. 3. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14030471>. [cit. 2024-02-07].

KLOSKI, Liza Wallach a KLOSKI, Nick, 2017. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press. ISBN 978-80-251-4876-1.

KRISTIAWAN, Ruben Bayu; IMADUDDIN, Fitrian; ARIAWAN, Dody; UBAIDILLAH a ARIFIN, Zainal, 2021. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. Online. *Open Engineering*. 2021-09-20, roč. 11, č. 1, s. 639-649. ISSN 2391-5439. Dostupné z: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>. [cit. 2024-01-16].

KULHÁNEK, František, 2011. *Stavební fyzika II: stavební tepelná technika*. 5., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-800-1049-570.

LIU, Jingjing; NAEEM, Muhammad Awais; AL KOUZBARY, Mouaz; AL KOUZBARY, Hamza; SHASMIN, Hanie Nadia et al., 2023. Effect of Infill Parameters on the Compressive Strength of 3D-Printed Nylon-Based Material. Online. *Polymers*. Roč. 15, č. 2. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15020255>. [cit. 2024-03-11].

LIU, Zhaobing; LEI, Qian a XING, Shuaiqi, 2019. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. Online. *Journal of Materials Research and Technology*. Roč. 8, č. 5, s. 3741-3751. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>. [cit. 2024-02-07].

LONJON, Capucine, 2017. *The history of 3d printer: from rapid prototyping to additive fabrication*. Online. Sculpteo. Dostupné z: <https://www.asme.org/topics-resources/content/infographic-the-history-of-3d-printing>. [cit. 2024-01-15].

LOPES, Lucas; REIS, Daniel; PAULA JUNIOR, Adilson a ALMEIDA, Manuela, 2023. Influence of 3D Microstructure Pattern and Infill Density on the Mechanical and Thermal Properties of PET-G Filaments. Online. *Polymers*. Roč. 15, č. 10. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15102268>. [cit. 2024-03-10].

LU, Anqi; WILLIAMS, Robert O. a MANIRUZZAMAN, Mohammed, 2024. 3D printing of biologics—what has been accomplished to date? Online. *Drug Discovery Today*. Roč. 29, č. 1. ISSN 13596446. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2023.103823>. [cit. 2024-01-15].

MACHÁČKOVÁ, Adéla a KOCICH, Radim, 2012. *Sdílení tepla a proudění: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. ISBN 978-80-248-2576-2.

MAZZANTI, Valentina; MALAGUTTI, Lorenzo a MOLLICA, Francesco, 2019. FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. Online. *Polymers*. Roč. 11, č. 7. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym11071094>. [cit. 2024-01-16].

NGO, Tuan D.; KASHANI, Alireza; IMBALZANO, Gabriele; NGUYEN, Kate T.Q. a HUI, David, 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Online. *Composites Part B: Engineering*. Roč. 143, s. 172-196. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>. [cit. 2024-02-03].

NOŽIČKA, Jiří, 2001. *Základy termomechaniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-2409-1.

PERNET, Benoît; NAGEL, Jacquelyn Kay a ZHANG, Hao, 2022. Compressive Strength Assessment of 3D Printing Infill Patterns. Online. *Procedia CIRP*. Roč. 105, s. 682-687. ISSN 22128271. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.114>. [cit. 2024-03-11].

RANJAN, Rajeev; KUMAR, Deepak; KUNDU, Manoj a CHANDRA MOI, Subhash, 2022. A critical review on Classification of materials used in 3D printing process. Online. *Materials Today: Proceedings*. Roč. 61, s. 43-49. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.308>. [cit. 2024-01-19].

RICCIARDI, Paola a BURATTI, Cinzia, 2018. Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions. Online. *Building and Environment*. Roč. 127, s. 23-36. ISSN 03601323. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>. [cit. 2024-02-07].

SOVA, Miloš, 2015. *Terpolymer akrylonitril-styrén-akrylát (ASA)*. Online. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/terpolymer-akrylonitril-styren-akrylat-asa-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxXWbttxhZl9w/>. [cit. 2024-01-21].

SRINIVASAN, R.; RUBAN, W.; DEEPANRAJ, A.; BHUVANESH, R. a BHUVANESH, T., 2020. Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. Online. *Materials Today: Proceedings*. Roč. 27, s. 1838-1842. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.797>. [cit. 2024-03-11].

STRÁTESKÝ, Ondřej; PRŮŠA, Josef a BACH, Martin, 2020. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa research. ISBN 978-80-907798-0-8.

SU, Amanda a AL'AREF, Subhi J., 2018. History of 3D Printing. Online. *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine*. S. 1-10. ISBN 9780128039175. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8>. [cit. 2024-01-15].

ŠUTA, Miroslav, 2008. *Chemické látky v životním prostředí a zdraví*. Brno: ZO ČSOP Veronica. ISBN 978-80-87308-00-4.

TRAVIESO-RODRIGUEZ, J. Antonio; ZANDI, Mohammad D.; JEREZ-MESA, Ramón a LLUMA-FUENTES, Jordi, 2020. Fatigue behavior of PLA-wood composite manufactured by fused filament fabrication. Online. *Journal of Materials Research and Technology*. Roč. 9, č. 4, s. 8507-8516. ISSN 22387854. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.003>. [cit. 2024-01-24].

VALVEZ, Sara; SILVA, Abilio P. a REIS, Paulo N. B., 2022. Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts. Online. *Polymers*. Roč. 14, č. 13. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym14132564>. [cit. 2024-01-20].

WONG, Kaufui V. a HERNANDEZ, Aldo, 2012. A Review of Additive Manufacturing. Online. *ISRN Mechanical Engineering*. 2012-08-16, roč. 2012, s. 1-10. ISSN 2090-5130. Dostupné z: <https://doi.org/10.5402/2012/208760>. [cit. 2024-01-15].

Použité normy:

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

ČSN EN ISO 604, *Plasty - Stanovení tlakových vlastností*, 2003. Praha: Český normalizační institut.

Internetové zdroje:

AHLBORN, 2011. *Příručka Ahlborn ALMEMO 2011*. Online. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/servis/ke-stazeni/prirucka-ahlborn-almemo-2011-aj-nj-pro-starsi-typy-pristroju.html>. [cit. 2024-02-22].

APPLIED PRECISION, 2007. *ISOMET 2104 User's Guide*. Applied Precision. Online. Dostupné z: https://www.appliedp.com/download/manual/isomet2114 Ug_en.pdf

ČÍHAL, Bohumír, 2023. *Technologie 3D tisku*. Online. Dostupné z: <https://www.stavebniklub.cz/33/3d-tisk-staveb-02-metody-3d-tisku-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EvIcoRunmztNQaTJQL2--Oew9PBWuC7BmQ/>. [cit. 2024-02-03].

DVOŘÁKOVÁ, Jana a DVOŘÁK, Karel, 2023. Možnosti průmyslového využití biodegradabilního materiálu na bázi cukru (PLA). Online. *Listy cukrovarnické a řepářské*. Č. 7-8. Dostupné z: http://www.cukr-listy.cz/on_line/2023/PDF/264-267.pdf. [cit. 2024-01-19].

FILAMENT PM. *Technický list WoodJet*. Online. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/pla-woodjet-natur-1-75-mm-0-5-kg/p269>. [cit. 2024-02-19].

FILLAMENTUM. *Timberfill Technical Datasheet*. Online. Dostupné z: https://fillamentum.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_Timberfill_03012019.pdf. [cit. 2024-02-19].

- KAZILBASH, Sana, 2021. *ASTM Acquisition: In Conversation with Terry Wohlers*. Online. In: Engineering.com. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/astm-acquisition-in-conversation-with-terry-wohlers>. [cit. 2024-01-15].
- MRÓZ, Mateusz, 2023. *Materiály používané při tisku SLS*. Online. Dostupné z: <https://botland.cz/blog/technologie-sls/>. [cit. 2024-02-04].
- PRINT WITH SMILE. *Biofil - Technical Datasheet*. Online. Dostupné z: <https://printwithsmile.cz/cs/biofil/348-biofil-175-mm-wood-500-g-8594196455192.html>. [cit. 2024-02-19].
- PRŮŠA, Josef, 2023. *Průručka 3D tiskáře*. Online. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/cs/downloads/mini/handbook>. [cit. 2024-03-12].
- TOOR, Ravi, 2022. *2022 3D Printing Filament Trend Report*. Online. Dostupné z: <https://www.filamentive.com/2022-3d-printing-filament-trend-report/>. [cit. 2024-01-21].
- FILAMENT PM. *ABS*. Online. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/abs-1-75>. [cit. 2024-01-20].
- SOLIDIFY 3D, S.R.O. *Materiálový slovník*. Online. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>. [cit. 2024-01-24].
- 3D TISK ONLINE. *Materiály pro tisk technologií FDM*. Online. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-prehled-materialu-pro-3d/>. [cit. 2024-01-25].
- IRON BOAR LABS LTD., 2021. *Thermoplastics*. Online. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-group/Thermoplastic>. [cit. 2024-02-07].
- L.K. ENGINEERING, S.R.O. *Mechanical properties of 3D print materials*. Online. Dostupné z: <https://www.lke.cz/en/mechanical-properties-of-3d-print-materials/>. [cit. 2024-02-11].
- PRUSA RESEARCH A.S. *Průvodce materiály*. Online. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/category/pruvodce-materialy_220. [cit. 2024-01-19].

Seznam obrázků

Obrázek 1 SLA-1, první komerční stereolitografická 3D tiskárna.....	13
Obrázek 2 Pracovní postup 3D tisku	15
Obrázek 3 Schématické znázornění FDM 3D tiskárny	16
Obrázek 4 Vzorky s různou dobou ošetření acetonem	19
Obrázek 5 Schéma tvorby vrstev metodou SLA	23
Obrázek 6 Schéma tvorby vrstev a uspořádání SLS tiskárny.....	24
Obrázek 7 Vytištěný vzorek pro měření tepelné vodivosti a tlakových vlastností.....	34
Obrázek 8 Schéma zkušební vzorku.....	34
Obrázek 9 Průřez vzorky s různou tloušťkou.....	35
Obrázek 10 Tiskové trysky s různým průměrem.....	36
Obrázek 11 Vzory výplně v závislosti na jejich hustotě	37
Obrázek 12 Kubický vzor výplně.....	37
Obrázek 13 Zkušební vzorky pro měření tepelné vodivosti.....	38
Obrázek 14 Vytištěný vzorek pro měření tahových vlastností.....	39
Obrázek 15 Tiskárna Original Prusa MINI+ se zkušebním vzorkem na tiskové ploše.....	40
Obrázek 16 Měření tepelné vodivosti přístrojem ISOMET 2104	41
Obrázek 17 Měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu přístrojem ALMEMO 2890-9	42
Obrázek 18 Všechny vzorky použité k měření teplotních a tlakových vlastností.....	43
Obrázek 19 Vzorek během tlakové zkoušky	44
Obrázek 20 Měření tahových vlastností	44

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti materiálu pro tisk technologií FDM	16
Tabulka 2 Součinitel tepelné vodivosti běžně tisknutých materiálů	26
Tabulka 3 Teplotní, mechanické a fyzikální vlastnosti použitých filamentů	31
Tabulka 4 Rozměry vzorků pro stanovení tahových vlastností.....	34
Tabulka 5 Nastavení tiskových parametrů dle materiálu	35
Tabulka 6 Pearsonův korelační koeficient a index determinace jednoduché regrese	46
Tabulka 7 Hodnoty získané jednoduchou regresí.....	47
Tabulka 8 Hodnoty získané vícenásobnou regresí	47
Tabulka 9 Naměřené hodnoty tlakových vlastností	49
Tabulka 10 Naměřené hodnoty tahových vlastností.....	50
Tabulka 11 Naměřené tepelné vlastnosti vzorků.....	64

Seznam grafů

Graf 1 Analýza trhu aplikací pro 3D tisk	12
Graf 2 Objem výroby filamentů společnosti Filamentive v roce 2021 podle druhu	17
Graf 3 Tahové křivky polymerů užívaných k aditivní výrobě, přeloženo.....	25
Graf 4 Závislost součinitele tepelné vodivosti na hustotě vnitřní výplně.....	46
Graf 5 Závislost meze pevnosti v tlaku na hustotě vnitřní výplně	49
Graf 6 Smluvní tahový diagram zkoušených vzorků	50

Přílohy

Vzorek	Výplň [%]	ρ [g/cm ³]	1. měření				2. měření				3. měření						
			λ [W/m ³ *K]	c [J/m ³ *K]	a [m ² /s]	t_p [°C]	RH [%]	λ [W/m ³ *K]	c [J/m ³ *K]	a [m ² /s]	t_p [°C]	RH [%]	λ [W/m ³ *K]	c [J/m ³ *K]	a [m ² /s]	t_p [°C]	RH [%]
C15A	15	0,302	0,0661	8,56E+05	7,70E-08	21,24	37,3	0,0659	8,50E+05	7,70E-08	21,66	38,1	0,0652	8,41E+05	7,80E-08	22,10	33,2
C20A	20	0,348	0,0691	8,84E+05	7,80E-08	21,45	37,2	0,0698	8,86E+05	7,90E-08	21,74	38,1	0,0696	8,79E+05	7,90E-08	21,84	32,6
C25A	25	0,394	0,0726	8,78E+05	8,30E-08	21,40	37,2	0,0724	8,73E+05	8,30E-08	21,89	38,3	0,0721	8,65E+05	8,30E-08	21,57	32,1
C30A	30	0,442	0,0762	9,04E+05	8,40E-08	21,57	36,9	0,0773	9,04E+05	8,50E-08	21,93	38,4	0,0778	9,03E+05	8,60E-08	22,95	32,0
C15B	15	0,301	0,0663	8,88E+05	7,50E-08	22,64	31,5	0,0662	8,79E+05	7,50E-08	22,62	33,4	0,0672	8,90E+05	7,50E-08	23,40	32,5
C20B	20	0,349	0,0695	9,02E+05	7,70E-08	22,68	31,4	0,0697	8,97E+05	7,80E-08	22,67	33,7	0,0703	9,07E+05	7,80E-08	23,53	32,4
C25B	25	0,392	0,0734	9,32E+05	7,90E-08	22,73	31,7	0,0733	9,33E+05	7,90E-08	22,71	33,7	0,0745	9,47E+05	7,90E-08	23,62	33,0
C30B	30	0,440	0,0766	9,40E+05	8,30E-08	22,71	33,3	0,0776	9,42E+05	8,20E-08	22,76	33,7	0,0780	9,54E+05	8,20E-08	23,66	33,1
C15C	15	0,309	0,0705	9,88E+05	7,10E-08	22,46	39,2	0,0709	9,96E+05	7,10E-08	22,64	31,9	0,0707	1,00E+06	7,10E-08	22,79	32,7
C20C	20	0,360	0,0739	9,69E+05	7,60E-08	22,53	39,2	0,0735	9,56E+05	7,70E-08	22,57	32,2	0,0729	9,59E+05	7,60E-08	22,28	31,8
C25C	25	0,408	0,0793	1,05E+06	7,60E-08	22,62	38,9	0,0787	1,04E+06	7,60E-08	22,54	32,5	0,0784	1,04E+06	7,50E-08	23,16	31,3
C30C	30	0,455	0,0839	1,06E+06	7,90E-08	22,70	40,3	0,0832	1,05E+06	7,90E-08	22,53	32,7	0,0845	1,06E+06	7,90E-08	23,69	31,3
C15D	15	0,311	0,0714	1,01E+06	7,10E-08	22,73	40,1	0,0702	9,88E+05	7,10E-08	22,53	32,8	0,0715	1,00E+06	7,10E-08	23,74	31,6
C20D	20	0,360	0,0743	1,04E+06	7,20E-08	22,64	40,3	0,0739	1,02E+06	7,20E-08	22,47	33,1	0,0753	1,04E+06	7,30E-08	23,92	32,2
C25D	25	0,408	0,0795	1,06E+06	7,50E-08	22,49	40,4	0,0790	1,04E+06	7,60E-08	22,48	33,0	0,0795	1,05E+06	7,60E-08	23,94	32,3
C30D	30	0,455	0,0844	1,07E+06	7,90E-08	22,63	40,0	0,0833	1,05E+06	7,90E-08	22,50	33,3	0,0840	1,06E+06	7,90E-08	24,02	32,5
C15E	15	0,300	0,0709	9,43E+05	7,50E-08	23,71	33,2	0,0698	9,38E+05	7,40E-08	23,78	34,0	0,0696	9,34E+05	7,40E-08	24,09	32,9
C20E	20	0,345	0,0740	9,76E+05	7,60E-08	23,54	33,7	0,0730	9,72E+05	7,50E-08	23,67	34,0	0,0730	9,59E+05	7,60E-08	24,47	32,7
C25E	25	0,388	0,0775	9,85E+05	7,90E-08	23,67	33,8	0,0768	9,79E+05	7,80E-08	23,81	34,1	0,0773	9,81E+05	7,90E-08	24,22	32,9
C30E	30	0,434	0,0818	1,01E+06	8,10E-08	23,64	33,6	0,0819	1,01E+06	8,10E-08	23,65	33,9	0,0813	9,98E+05	8,10E-08	24,25	33,4
C15F	15	0,293	0,0708	9,43E+05	7,50E-08	23,10	33,4	0,0702	9,34E+05	7,40E-08	23,61	33,7	0,0697	9,35E+05	7,40E-08	24,22	33,5
C20F	20	0,340	0,0729	9,54E+05	7,50E-08	23,63	33,0	0,0721	9,36E+05	7,60E-08	23,49	33,7	0,0723	9,37E+05	7,60E-08	23,82	33,2
C25F	25	0,391	0,0764	9,94E+05	7,60E-08	23,66	33,3	0,0758	1,00E+06	7,70E-08	23,42	33,7	0,0762	9,40E+05	8,10E-08	23,95	33,5
C30F	30	0,438	0,0813	1,02E+06	8,00E-08	23,70	33,5	0,0813	1,02E+06	8,00E-08	23,03	33,6	0,0811	1,01E+06	8,00E-08	24,10	34,3

Tabulka 11 Naměřené tepelné vlastnosti vzorků