

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
Katedra fyzikální chemie

**Vliv parametrů výplně FDM tištěných dílů
na mechanické vlastnosti 3D tisku**

Bakalářská práce

Autor práce: Jan Urbánek

Vedoucí práce: doc. RNDr. Karel Berka, Ph.D.

Studijní program: B0531A130033 – Nanomateriálová chemie

Studijní obor: Nanomateriálová chemie

Forma studia: Prezenční

Olomouc 2024

PALACKÝ UNIVERSITY IN OLOMOUC
FACULTY OF SCIENCE
Department of Physical Chemistry

**Influence of Infill Parameters of FDM Printed Parts
on Mechanical Properties of 3D Prints**

Bachelor thesis

Author: Jan Urbánek

Supervisor: doc. RNDr. Karel Berka, Ph.D.

Study programme: B0531A130033 – Nanomaterial chemistry

Study branch: Nanomaterial chemistry

Study form: Daily

Olomouc 2024

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou v seznamu použité literatury,

Souhlasím s tím, že práce je prezenčně zpřístupněna v knihovně Katedry fyzikální chemie, Přírodovědecké Fakulty, Univerzity Palackého v Olomouci.

V Olomouci dne:

Jan Urbánek

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce, doc. RNDr. Karlu Berkovi, Ph.D., za jeho vedení, pomoc a přístup při konzultaci výsledků experimentů, děkuji Mgr. Jakubovi Vlčkovi, Ph.D., za pomoc při provádění tahových zkoušek. Chtěl bych také poděkovat své přítelkyni, rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

Bibliografická identifikace:

Jméno a příjmení autora:	Jan Urbánek
Název práce:	Vliv parametrů výplně FDM tištěných dílů na mechanické vlastnosti 3D tisku
Typ práce:	Bakalářská
Pracoviště:	Katedra fyzikální chemie, UP v Olomouci
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Karel Berka, Ph.D.
Rok obhajoby práce:	2024

Abstrakt:

Tato práce se zabývala vzory výplně a hustotou zaplnění jednotlivých vzorů u 3D tištěných dílů pomocí FDM tiskárny MK3S+ od firmy Prusa Research na Filamentu PM od firmy Plasty Mladeč. Testovány byly všechny vzory nabízené programem PrusaSlicer, a byly testovány hustoty zaplnění od 0 % po 95 %, resp. 100 %. Vzory výplně a rostoucí hustota zaplnění měly výrazný vliv na pevnost jednotlivých dílů v tahu. Cílem práce bylo změřit a porovnat rozdíly v mechanických vlastnostech 3D tištěných dílů s různými parametry výplně.

Klíčová slova: PLA, 3D tisk, Prusa, FDM, vzor výplně, hustota zaplnění, polymery, mechanické vlastnosti polymerů

Počet stran: 52
Jazyk: Český

Bibliographic identification:

Author: Jan Urbánek
Title: Influence of infill parameters of FDM printed parts on mechanical properties of 3D printing
Type of Thesis: Bachelor
Department: Department of Physical Chemistry, UP Olomouc
Supervisor: doc. RNDr. Karel Berka, Ph.D.
The Year of Presentation: 2024

Abstract:

This thesis studied infill patterns and infill density of these patterns of 3D printed parts using FDM printer MK3S+ made by Prusa Research on Filament PM from Plasty Mladeč company. All patterns offered by the software PrusaSlicer were tested, with infill densities from 0 % to 95% or 100 %. It was found that infill patterns and growing infill densities did affect the strength of the printed parts when tested in tension. The goal of the thesis was to measure and compare differences in mechanical properties of 3D printed parts with different infill parameters.

Keywords: PLA, 3D print, Prusa, FDM, infill pattern, infill density, polymers, mechanical properties of polymers

Number of Pages: 52
Language: Czech

Obsah

1. ÚVOD.....	1
2. TEORETICKÁ ČÁST	2
2.1. Historie 3D tisku.....	2
2.2. Technologie 3D tisku.....	3
2.2.1. SLS.....	3
2.2.2. SLA.....	3
2.2.3. FDM (FFF).....	4
2.3. Dosavadní výzkum vlivu parametrů na 3D tisk.....	12
2.4. Testování 3D tištěných dílů	13
2.4.1. Používané normy a modely.....	13
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	14
3.1. Použitý filament.....	14
3.2. Použitý testovací model	14
3.3. Parametry výplní modelu.....	14
3.3.1. Vzory.....	15
3.4. Hustota zaplnění.....	16
3.5. Metodologie testování.....	16
3.5.1. Množství vzorků	16
3.5.2. Hmotnost vzorků.....	17
3.5.3. Testování v tahu.....	18
4. VÝSLEDKY	19
4.1. Výsledky jednotlivých vzorů	19
4.1.1. Nulová hustota zaplnění.....	19
4.1.2. 3D Honeycomb	20
4.1.3. Adaptive Cubic	21
4.1.4. Aligned Rectilinear	22

4.1.5. Archimedian Chords	23
4.1.6. Concentric	24
4.1.7. Cubic	25
4.1.8. Grid	26
4.1.9. Gyroid	27
4.1.10. Hilbert Curve	28
4.1.11. Honeycomb	29
4.1.12. Lightning.....	30
4.1.13. Line	31
4.1.14. Octagram Spiral	32
4.1.15. Rectilinear	33
4.1.16. Stars.....	34
4.1.17. Triangles	35
4.2. Porovnání jednotlivých vzorů	36
4.2.1. Maximální napětí	36
4.2.2. Youngův modul	38
4.2.3. Prodloužení	39
5. Diskuze	40
5.1.1. Nejslabší a nejsilnější vzory.....	40
5.1.2. Zohlednění spotřeby materiálu	41
5.2. Vysvětlení pozorovaných trendů pevnosti vzorů.....	44
6. ZÁVĚR	46
7. SUMMARY	47
8. ZDROJE LITERATURY	48
9. PŘÍLOHY	52

1. ÚVOD

V posledních 25 letech došlo k prudkému rozvoji a rozšíření technologie 3D tisku, která je dnes běžně dostupná nejen pro průmyslové aplikace, ale i pro domácnosti jako hobby. Rozvoj 3D tisku umožnil levnou a rychlou tvorbu prototypů, levnou tvorbu náhradních dílů, a také realizaci dílů, které s tradičními subtraktivními technologiemi, jako obrábění, vrtání, broušení apod., nebylo možné realizovat, anebo byla jejich realizace materiálově, případně ekonomicky náročná.

Krom průmyslových aplikací 3D tisku, od tištěných podrážek bot, až po tištěné domy a vesmírné rakety, se 3D tisk s rozvojem technologií a snižováním pořizovacích i provozních nákladů stal populárním i pro amatérské aplikace. Právě z důvodu masového rozšíření 3D tisku vznikla poptávka po testování jednotlivých parametrů, které lze 3D tisku ovlivňovat a ladit, a nalézt tak ideální parametry pro danou aplikaci, tedy optimalizovat časovou, materiálovou a ekonomickou náročnost 3D tisku.

V posledních letech proběhlo mnoho výzkumu v oblasti 3D tisku, od testování filamentů a jejich parametrů, např. barva, aditiva, výrobce a typ polymeru, přes jednotlivé modely tiskáren od různých výrobců, až po samotné tiskové parametry, jako teplota extruderu a podložky, teplota a výkyvy v teplotě okolního prostoru, orientace dílu v tiskovém prostoru, množství, rychlost a překryv vytlačovaného materiálu, tloušťka stěn dílu, počet spodních a horních vrstev a v neposlední řadě právě i parametry výplně.

Mnohdy se ovšem autoři nezaměřili na jednu proměnnou, a tak je obtížné kvantifikovat, jak zásadní roli jednotlivé parametry hrají. V jiných případech se sice autoři zaměřili jen na jednu, případně dvě proměnné, které spolu souvisí, ale vybrali si pouze úzký výsek hodnot, a tak mohou být jejich závěry zkreslené, nebo naprosto nesprávné. Proto jsem se rozhodl důkladně otestovat všechny vzory výplně, které nabízí software PrusaSlicer pro tiskárny od firmy Prusa Research, a zároveň všechny vzory otestovat v rozmezí hustoty zaplnění od 5 % po 95 %, respektive 100 % (pouze některé vzory umožňují zaplnění 100 %). Zároveň byly otestovány i díly s 0% zaplněním, tedy bez jakékoli výplně.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Historie 3D tisku

Myšlenka 3D tisku sahá až do roku 1945, kdy autor sci-fi Murray Leinster ve své povídce „Things Pass By“ popisuje stroj, který by byl schopen replikovat nákresy pomocí robotické ruky, která by dle nákresu umísťovala roztavený plast.¹

Od prvotní myšlenky uběhlo 26 let, než si v roce 1971 Johannes F Gottwald patentoval „Liquid metal recorder“ tedy v překladu „záznamník tekutého kovu“, první technologii připomínající dnešní 3D tisk a rapidní prototypování. Dle patentu měl záznamník pod tlakem vytlačovat vodivý inkoust (tekutý kov, nebo inkoust s kovovými příměsemi, který při dopadu na podložku ztuhl) proti pohybuující se podložce, přičemž podložka a tryska byly součástí elektrického obvodu. Při dopadu inkoustu na podložku došlo ke spojení tohoto obvodu, díky čemuž mohlo být s proudem inkoustu manipulováno za pomoci magnetického pole.²

V 80. letech byly položeny základy technologiím 3D tisku, které známe dnes. Již v roce 1981 přišel v Japonsku Hideo Kodama se dvěma metodami aditivní výroby na bázi vytvrzování polymerů pomocí UV záření.³ V roce 1982 si americká firma Raytheon Technologies Corp. patentovala technologii vytvrzování vrstev kovových prášků pomocí energického paprsku.⁴ Jen o dva roky později si Charles W. Hull patentoval technologii stereolithografie⁵ a později přišel i s první komerční 3D tiskárnou, SLA-1 a také vyvinul systém „slicování“ (exportu modelu do formátu pro 3D tiskárnu) a formát souborů „.stl“, které jsou dodnes zásadní pro 3D tisk.¹ Téhož roku si americký podnikatel William E. Masters patentoval „Computer automated manufacturing process and system“,⁶ který se stal předchůdcem 3D tiskáren, které známe dnes. Technologie FDM se dočkala svého patentu v roce 1989, kdy si S. Scott Crump nechal patentovat „Apparatus and method for creating three-dimensional objects“^{7, 8} a stal se spoluzakladatelem firmy Stratasys. V roce 1993 se poprvé setkáváme s označením „3D tisk“ (resp. „3D printing“), které použil profesor Emanuel Sachs z amerického MIT (Massachusetts Institute of Technology), a brzy bylo tímto termínem nahrazeno doposud užívané „rapidní prototypování“.¹

Po roce 2000 byl 3D tisk stále využíván spíše v průmyslu a ve výzkumu, jelikož tato technologie byla stále nová a drahá.⁹ V roce 2008 však Adrian Bowyer v rámci projektu RepRap (z angl. Reproducing Rapid-prototyper), jehož cílem bylo vytvořit 3D tiskárny, které by byly schopny vytisknout většinu svých dílů, poprvé vytiskli reprodukovanou RepRap tiskárnu.¹⁰ Později se objevily další podobné projekty, a v kombinaci s dostupností „open-

source“ softwaru pro tiskárny došlo k rychlému rozšiřování a vývoji 3D tisku, což dalo za vznik mnoha firmám, které začaly vyvíjet FDM 3D tiskárny, které by byly dostupné pro širokou veřejnost. Jedním příkladem je i Josef Prusa, zakladatel Prusa Research. Rozvoji 3D tisku v této době napomohlo i vypršení původních patentů z 80. a počátku 90. let minulého století.¹

Od roku 2012 a 2013 se 3D tisk stal „mainstream“, částečně i díky kontroverzím ohledně první 3D tištěné zbraně, ale i díky prvním 3D tištěným protetickým končetinám, a výzkumu 3D tisku v oblasti potravin a medicíny. Později přišly i 3D tištěné domy, 3D tisk na mezinárodní vesmírné stanici (ISS) atd.¹

Aktuálně technologie 3D tisku snadno dostupná a velice rozšířená, a díky rostoucí komunitě neustále dochází k inovacím a posouvání této technologie dopředu.

2.2. Technologie 3D tisku

V oblasti aditivní výroby existuje několik různých technologií. Dle základních principů jednotlivých technologií je rozdělit do tří hlavních kategorií – SLS, SLA a FDM (FFF). Mezi hlavní rozdíly patří materiály, se kterými dané technologie pracují, pořizovací a provozní náklady, a také náročnost dodatečného opracování dílů, jako vypékání, vytvrzování a odstraňování podpěr. V dalších odstavcích popíši jednotlivé technologie podrobněji.

2.2.1. SLS

SLS (z angl. Selective Laser Sintering) patří mezi spíše průmyslově rozšířené technologie 3D tisku. Je založená na selektivním laserovém svařování, při kterém se využívá stačeného kovového prášku, ve kterém se pomocí laseru svařují jednotlivé vrstvy. Na každou vrstvu je nanесena a stlačena další vrstva prášku a proces se opakuje pro celý tištěný díl.

Nevýhodou mohou být opět podpěry a nutné dodatečné opracování výsledných dílů, kdy vytištěné díly je nutné umístit do pece a vypéct, přičemž případné podpěry jsou odstraňovány až po vypečení dílu, což může být mechanicky náročné. Dále může být značnou limitací maximální rozměry výsledných dílů a velmi vysoké pořizovací i provozní náklady této technologie.

2.2.2. SLA

Další rozšířenou technologií je SLA (z angl. StereoLithogrAphy), a z ní odvozené technologie, např.: DLP, MSLA, ..., při kterých je světlem ozařována nádoba s tekutým materiálem, tzv. resinem. Resin je opět vyrobený z polymerů a případných aditiv, přičemž je potřeba, aby tyto polymery byly citlivé na světlo, a tedy mohly jím být vytvrzovány. Každým

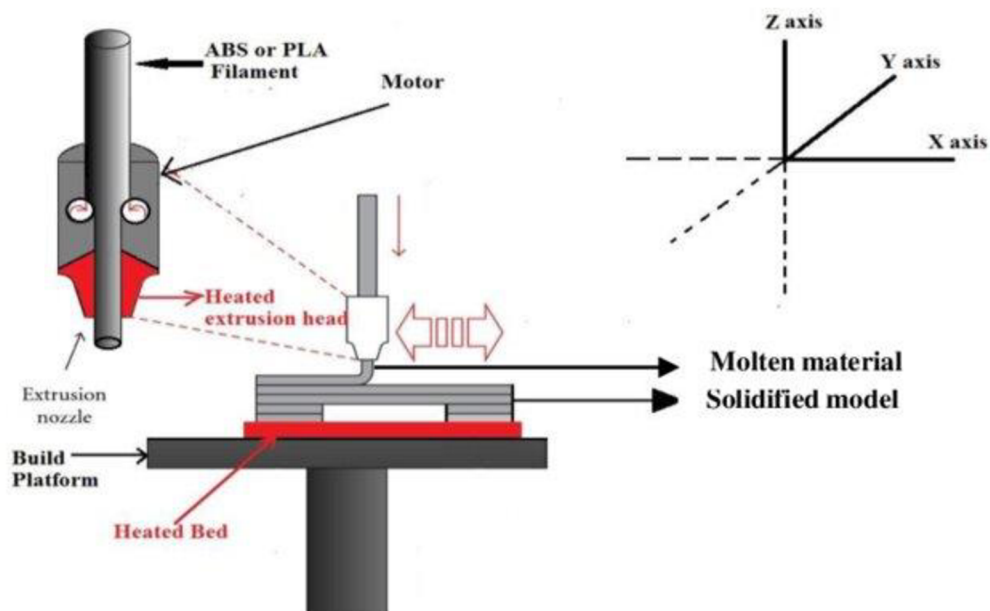
ozářením vzniká celá jedna vrstva, přičemž podložka, na které je díl uchycen se horizontálně posune o tloušťku jedné vrstvy, aby mohla být vytvrzena další. Proces se opakuje až do vzniku výsledného dílu.

Výhodou této metody jsou možné daleko větší detaily výsledných dílů daných daleko menšími rozměry vlnových délek použitého světla, než jakých průměrů může dosáhnout tryska u FDM (viz níže). Výhodou je také fakt, že většinou není potřeba tolik podpěr jako u FDM, ale u některých modelů se jim nelze vyhnout.

Hlavní nevýhodou této metody je zdravotní závadnost resinů. Většina z nich je toxických, nelze je tedy tisknout v otevřeném prostoru, a navíc je potřeba filtrace pro výpary vzniklé během tisku. Další nevýhodou je potřeba dodatečného zpracování dílů, kdy při samotném tisku nedochází ke kompletnímu vytvrzení, a tak je potřeba díly následně nechat vytvrdit ve speciálních vytvrzovacích stanicích.

2.2.3. FDM (FFF)

Poslední, nejvíce rozšířenou technologií 3D tisku je FDM (z angl. Fused Deposition Modeling) nebo též FFF (z angl. Fused Filament Fabrication). Základním principem je natavování plastové struny nahřátou tryskou a nanášení nataveného materiálu na jednotlivá místa (viz Obr. 1) až do nanesení celé vrstvy, a následného nanášení dalších vrstev až do vzniku celého dílu.



Obr. 1 Schéma FDM technologie 3D tisku¹¹

Velkou výhodou oproti SLA je výrazně nižší toxicita, kdy u některých filamentů nedochází k uvolňování tak velkého množství toxických látek.¹² I přes nižší množství uvolňovaných toxických látek a malých částic je doporučováno mít tiskárnu zakrytou a tisknout v odvětrávané místnosti.¹³

Výhodou některých FDM tiskáren (tzv. multimateriálových tiskáren) je možnost tisknout z více filamentů zároveň. Například firma Prusa nabízí modely s možností tisku až z 5 filamentů^{14,15} a firma BambuLab nabízí modely s možností tisku až z 16 filamentů.¹⁶ U takových tiskáren lze využít pro tisk podpěr speciálních filamentů (BVOH, PVOH/PVA), které lze po dokončení tisku rozpustit ve vodě a odpadá tedy čištění a povrchová úprava dílu. Nevýhodou většiny multimateriálových tiskáren je absence více trysek, díky čemuž je potřeba danou trysku vyčistit při každé změně filamentu v průběhu tisku, což má za následek vysokou spotřebu materiálu. U některých modelů lze nastavit "čištění do dílu", kdy tiskárna při změně barvy pokračuje tiskem výplně, a až poté tiskne vnější vrstvy. Toto ovšem nelze použít u všech dílů, a tak se člověk někdy zvýšené spotřebě nevyhne. Jednou z výjimek je například tiskárna Prusa XL, u které lze zakoupit v provedení až s 5 tryskami, a tedy při změně barvy dochází k nižší spotřebě materiálu než u jiných tiskáren (stejně dochází k vytlačení malého množství filamentu pro stabilizaci tlaku v trysce).¹⁵

Poslední výhodou oproti technologiím SLA a SLS je cena a dostupnost. FDM tiskárny a filamenty jsou výrazně cenově dostupnější a i méně náročné na provoz a následné zpracování výsledných dílů.

Nevýhodou může být potřeba podpěr u složitějších dílů, nebo vliv orientace dílu na jeho pevnost, jelikož FDM díly jsou zpravidla nejméně pevné v ose z, kdy při namáhání dochází k oddělení jednotlivých vrstev od sebe. Mnohdy při zvažování orientace dílu v tiskovém prostoru musí člověk volit mezi tiskem bez podpěr, ale v nevhodné orientaci pro pevnost, anebo vhodnější orientací, ale za cenu potřeby tisku podpěr. Obecně jsou podpěry problém ze dvou důvodů, prvním je vyšší spotřeba materiálu a druhým je následné oddělování podpěr a povrchová úprava dílu v místě po oddělení podpěr.

Při FDM tisku hraje roli mnoho parametrů a proměnných, které jsem rozdělil do tří kategorií – parametry a funkce samotných **tiskáren**, dále **tiskové parametry**, které lze ladit pro každý tisk a v poslední řadě **materiály** užívané pro filamenty.

Tiskárny FDM

Na trhu existuje mnoho výrobců FDM tiskáren, přičemž se stále objevují nové firmy, které inovují a posouvají technologii FDM dopředu. Mezi jedny z největších výrobců tiskáren do domácnosti, případně do škol patří např. firmy AnyCubic, BambuLab, Creality, Prusa a Ultimaker. Dále existují i firmy zabývající se průmyslovými FDM tiskárnami, například Markforged, Stratasys a Zortax.

Jednotlivé modely tiskáren se od sebe liší v mnoha parametrech, které mohou být limitující. Základní parametry jsou velikost tiskového prostoru, a zda je tiskový prostor zakrytý. Dále zda má tiskárna vyhřívanou podložku, a jakých teplot může podložka a tryska dosahovat, což může limitovat, ze kterých materiálů může člověk tisknout, a také průměr a materiál trysky, rychlost pohybu tiskové hlavy (případně podložky) a rychlost vytlačování filamentu. Pokročilejšími parametry může být například podpora vícemateriálového tisku, technologie "input shaping", která neguje vlastní vibrace tiskárny, preciznost motorů, které tiskárna používá, připojení přes internet a tedy možnosti ovládání a kontroly tiskárny na dálku apod.

Tiskové parametry

Mezi jedny z nejdůležitějších tiskových parametrů patří například tloušťka vrstvy, počet a překryv obvodových stěn, překryv výplně a stěny. Dále i parametry jako vzor výplně a hustota zaplnění, kterými se zabírám v experimentální části, ale i orientace výplně, počet horních a spodních vrstev dílu. Zásadní je i orientace a umístění dílu v tiskovém prostoru, kdy obecně díly tištěné metodou FDM jsou méně pevné v ose z , tedy ve směru působení kolmo k jednotlivým vrstvám a jsou pevnější v osách x a y , tedy při působení síly v rovině jednotlivých vrstev.^{17, 18}

Filament

Filament hraje u FDM tisku klíčovou roli. Volbu materiálu filamentu ovlivňuje mnoho faktorů, od požadovaného využití výsledného dílu, přes možnosti tiskárny (maximální teplota trysky, podložky apod.) až po estetické faktory (barva, transparentnost, příměsi aj.).

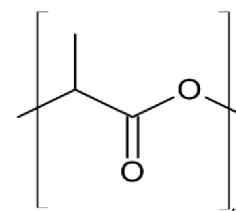
Nejčastěji se u FDM tisku využívá materiálů PLA a PETG. Dále se lze setkat i s materiály jako polypropylen (PP), ABS, ASA, Nylon (PA), PC, PVB, HIPS a rovněž i s různými kompozity, recykláty, flexibilní materiály (TPE), anebo s BVOH a PVA, které jsou ve vodě rozpustné a lze je využít místo podpěr.¹⁹

Obdobně jako u tiskáren, existuje i zde mnoho výrobců filamentu. Mnohdy samotní výrobci tiskáren nabízí i vlastní filament ke svým tiskárnám, ale je mnoho firem, které se specializují pouze na filameny pro FDM tisk. Mezi české výrobce patří například Filameny PM od firmy Plasty Mladeč, Prusament od firmy Prusa, nebo Filamentum. Zahraničními zástupci jsou například Verbatim, VoxelPLA, Colorlab, Fiberlogy, Ultimaker, 3D Republika, aj.

Jednotlivé filameny se v závislosti od výrobce liší složením, tedy použitými aditivami a nabízenými barevnými provedeními, případně různými kopolymery a upravenými variantami jednotlivých materiálů, včetně různých příměsí jako uhlíková nebo dřevěná vlákna, částice kovů apod. Jak ukázal výzkum Hodzic et al., filameny od různých výrobců mají vliv na výsledné mechanické vlastnosti FDM tištěných dílů.²⁰

PLA

Kyselina polymléčná (PLA, též polylaktid, obr. 1) patří mezi nejvíce využívané materiály v oblasti FDM tisku. Jedná se o biokompatibilní alifatický polyester, který je kompostovatelný a biodegradovatelný pomocí H₂O a CO₂. Proto je nutné PLA filament skladovat a chránit před vlivem

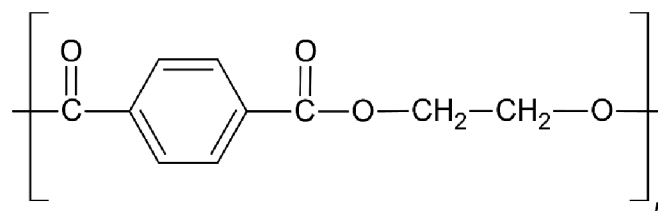


Obr. 2 Strukturální jednotka PLA

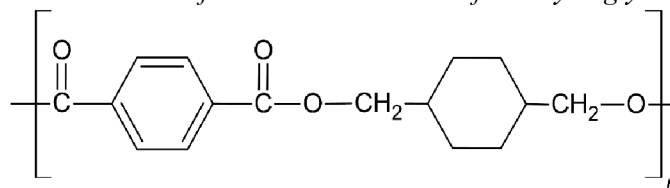
vlhkosti.²¹ Rovněž je nutné jej chránit před vlivem UV, jelikož při dlouhodobé expozici dochází ke křehnutí materiálu.²² PLA je nerozpustný v acetonu, což znemožňuje čištění nebo případné povrchové úpravy. Dále při chladnutí materiálu nedochází k signifikantnímu smršťování, což umožňuje díly chladit již v průběhu tisku.²³ K tisku z PLA není potřeba zakrytého tiskového prostoru, a doporučené tiskové teploty se pohybují v rozmezí 50-60 °C pro podložku a 185-235 °C pro trysku.¹⁹ Vyhřívání podložky zlepšuje adhezi k podložce.²³

PETG

Polyethyltereftalát modifikovaný glykolem (PETG, z angl. PolyEthylene Terephthalate, Glycol-modified), je kopolymer ethylenglykolu a kyseliny tereftalové (PET, obr. 3) s dalším typem glykolu (G), jehož obsah dosahuje až 50 mol. %, přičemž dolní hranice je



Obr. 3 Stavěbní jednotka PETG obsahující ethylenglykol

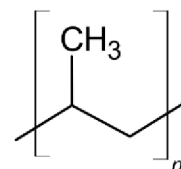


Obr. 4 Stavěbní jednotka PETG obsahující CHDM

přibližně 20 mol. %. Nejčastěji se používá 1,4-cyklohexandimetanol (CHDM, obr. 4), který zajišťuje, že výsledný materiál má snížený stupeň krystalinity a zůstává amorfní i při průmyslovém zpracování. Díky tomu je vhodný i pro FDM tisk, a rovněž jej lze vyrábět i v transparentních barevných provedeních.²⁴ Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 70-90 °C pro tiskovou podložku a 215-270 °C pro trysku.¹⁹

PP

Polypropylen (PP, obr. 5) se řadí mezi oleofiny a patří mezi jeden z nejvíce vyráběných plastů na světě. Ročně se jej vyprodukuje okolo 75 milionů tun.^{25,26} Obecně se PP dodává ve třech variantách – homopolymery, tedy čistý PP, který je nejtvrdější a nejpevnější, ale je křehčí oproti zbylým variantám. Bez přidaných barviv je

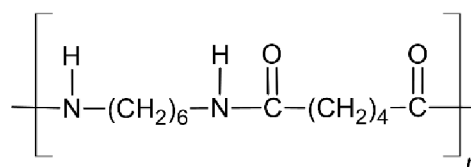


Obr. 5 Strukturální jednotka polypropylenu

průhledný. Dále náhodné kopolymery, které obsahují pod 5 % přidaného ethylenu, což narušuje krystalinitu čistého PP. Jedná se o nejpružnější a nejméně pevnou variantu PP. A v poslední řadě blokové kopolymery, kdy je nejdříve vytvořen matrix čistého PP, který je následně polymerizován spolu s ethylenem za vzniku ethylen-propylenové gumy (EPR). Tato varianta PP se pevností a tvrdostí nachází někde mezi přechozími dvěma zmiňovanými typy.²⁷ Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 0-100 °C pro tiskovou podložku a 220-245 °C pro trysku.¹⁹

PA

Jedná se o polyamidy (**Nylon, PA, obr. 6**), které se vznikají reakcí nenasycených dikarboxylových kyselin a nenasycených diaminů.



Obr. 6 Strukturální jednotka Nylonu 66

Na základě použitých výchozích látek rozlišujeme různé typy, například Nylon 6, Nylon 66, Nylon 11 apod.

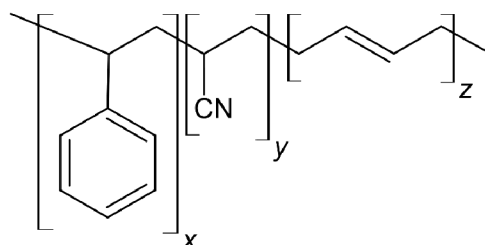
Konkrétně uvedu informace o PA66, který je velmi často využíván jako inženýrský plast, díky svým význačným mechanickým, chemickým a tepelným vlastnostem. PA66 je semikrystalický termoplast, s vysokou teplotní stabilitou a mechanickou pevností. Nylon 66 se vyrábí výše uvedeným procesem, a to konkrétně reakcí hexamethyldiaminu a adipové kyseliny. Nevýhodou nylonu 66 je náchylnost na vlhkost.²⁸

Díky náchylnosti na vlhkost je nutné filamenty z nylonu skladovat v suchém prostředí. Zároveň je pro kvalitní tisk potřeba tiskárna s uzavřeným tiskovým prostorem, díky čemuž lze

regulovat teplotu a vlhkost tiskového prostředí. Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 70-115 °C pro tiskovou podložku a 240-285 °C pro trysku.¹⁹

ABS

Akrylonitril-butadien-styren (ABS, obr. 7) je kopolymer složený ze tří monomerů, akrylonitrilu, butadienu a styrenu.²⁹ Důležitá je oddělená příprava styren-akrylonitrilu (SAN) a elastomerního polybutadienu, a následné zavádění polybutadienu do SAN. Prostým smícháním jednotlivých polymerů nebo polymerací všech tří monomerů společně vznikají nepoužitelné směsi. ABS je velice tvrdý a pevný materiál se špatnou odolností vůči UV. Tento materiál lze snadno zpracovávat, svařovat nebo lepit. Nejčastěji se využívá pro vstřikování³⁰ (např. díly stavebnice LEGO³¹) nebo vytlačování (např. odpadní potrubí³²).

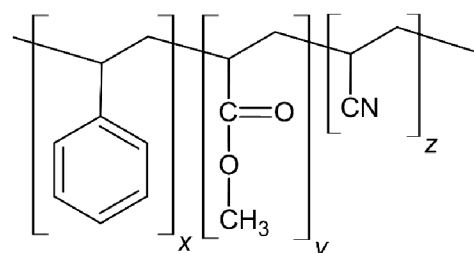


Obr. 7 Jednotlivé stavební jednotky ABS – styren (x), akrylonitril (y), butadien (z)

Pro 3D tisk se jedná o pokročilejší materiál. Kvůli obsahu styrenu a uvolňování par v průběhu tisku je naprosto nutné tisknout výhradně s uzavřeným tiskovým prostorem a v místnosti s dobrým odvětráváním. Zároveň může při tisku z ABS docházet ke smršťování a kroucení výsledného dílu, a to obzvláště u větších nebo složitějších dílů. Rovněž může docházet k odlepení dílů od podložky. Při aktivním chlazení již v průběhu tisku dochází k nerovnoměrnému smršťování dílu a může docházet ke vzniku prasklin a trhlin. Z těchto důvodů je doporučováno vypnout tiskový ventilátor při práci s ABS.²³ Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 95-110 °C pro tiskovou podložku a 230-255 °C pro trysku.¹⁹

ASA

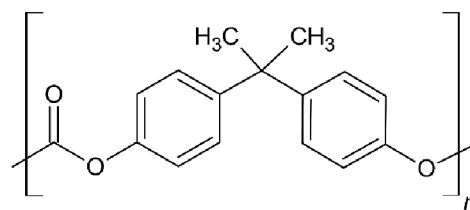
Akrylonitril-styren-butylakrylát, běžně též akrylonitril-styren-akrylát (ASA, obr. 8) je další kopolymerem na bázi styrenu. Oproti ABS je sice odolný vůči UV³⁰, ale stále se jedná o náročný materiál na tisk, který díky styrenu opět vyžaduje uzavřený tiskový prostor a dobře větranou místnost. Stejně jako u ABS dochází u ASA ke kroucení a smršťování, byť v menší míře.³³ Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 90-110 °C pro tiskovou podložku a 220-275 °C pro trysku.¹⁹



Obr. 8 Jednotlivé stavební jednotky ASA – styren (x), butylakrylát (y), akrylonitril (z)

PC

Poly (bisfenol A karbonát), běžně zkracován pouze na **polykarbonát (PC)**, obr. 9) je vyráběný syntézou z fosgenu a bisfenolu A (BPA).³⁴ PC nachází uplatnění v dopravě, obalových materiálech, optických mediích, jako CD a DVD, elektronice,



Obr. 9 Strukturální jednotka PC

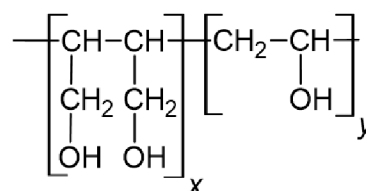
neprůstředná okna, apod. Široké spektrum využití vychází z transparentnosti, vynikající odolnosti vůči teplu a hoření, pevností a stabilitě v různých prostředích. Velkou nevýhodou PC je vzniklý odpad, který není biodegradovatelný ani recyklovatelný pomocí existujících procesů, a tudíž končí běžně na skládkách nebo je spálen. Skládkování je o to problematičtější, že PC je považován za zdroj BPA, který je nebezpečný jak pro lidské zdraví, tak pro životní prostředí.³⁵ Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 100-115 °C pro tiskovou podložku a 270-275 °C pro trysku.¹⁹

Flexibilní filamenty – TPE/TPU

Jedná se o materiály spadající do skupiny **termoplastických elastomerů (TPE)**. Obecně TPE kombinují mechanické vlastnosti gumových materiálů s jednoduchou zpracovatelností termoplastů, a navíc dosahují větší škály možných aplikací než samotné gumy nebo termoplasty. Někdy výrobci filamentů používají i označení **TPU**, neboli **termoplastické urethany**. Jedná o podskupinu TPE s lepšími mechanickými vlastnostmi (např. pevnost, tvrdost, odolnost proti otěru a opotřebení).³⁰ Filamenty z těchto materiálů jsou vhodné pro tisk různých izolací a podložek, kol, hadic, svorek, náramků, hraček aj. Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 40-85 °C pro tiskovou podložku a 220-260 °C pro trysku.¹⁹

Rozpustné filamenty (BVOH, PVOH/PVA)

Butenediol vinylalkohol kopolymer (BVOH), obr. 10) je hydrofilní a ve vodě rozpustný materiál, což je dáno velkým počtem obsažených hydroxylových skupin. Dále je BVOH dobře tvarovatelný díky nízké teplotě tavení, což umožňuje vylepšování jeho vlastností prostým mícháním roztavených polymerů.³⁶ Materiál není toxický, a po rozpuštění lze výsledný odpad vylévat i do běžné kanalizace. Je ovšem nutné použít minimálně 20 ml vody na 1 g materiálu a likvidovat takto maximálně 2 kg tohoto materiálu denně. BVOH je také citlivý na světlo a UV záření a



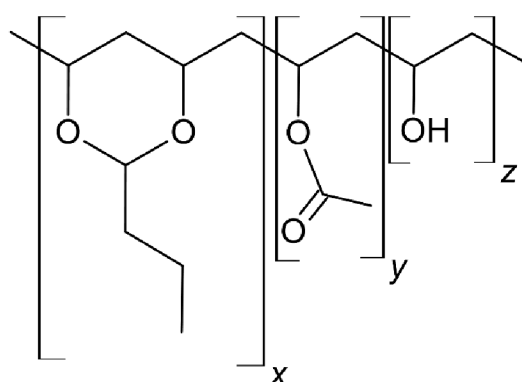
Obr. 10 Stavěbní jednotky BVOH (x) a PVOH (y)

při 3D tisku se nejlépe kombinuje s ABS, PLA a PETG.³⁷ Doporučovaná tisková teplota je 60 °C pro tiskovou podložku a 215 °C pro trysku.¹⁹

Polyvinylalkohol (PVOH nebo též **PVA**) je rovněž netoxický, biodegradovatelný a hydrofilní polymer rozpustný ve vodě. Obdobně jako BVOH lze vylepšovat vlastnosti PVOH, anebo modifikovat vlastnosti jiných materiálů, prostým mísením roztavených polymerů.³⁶ Krom 3D tisku nachází využití ve formě různých ve vodě rozpustných filmů, například u kapslí pro myčky nádobí.²⁷ Doporučovaná tisková teplota je 60 °C pro tiskovou podložku a 195 °C pro trysku.¹⁹ Struktura PVOH je znázorněna v rámci obrázků 9 a 10.

PVB

Polyvinylbutyral (PVB, obr. 11) je považován za acetal, který vzniká reakcí aldehydu a alkoholu. Výsledný řetězec neobsahuje pouze čistý PVB, ale i segmenty PVOH a polyvinylacetátu. Variováním poměrů jednotlivých složek lze optimalizovat výsledné parametry tohoto polymeru.²⁷ Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 75 °C pro tiskovou podložku a 215 °C pro trysku.¹⁹



Obr. 11 Jednotlivé složky PVB – polyvinylbutyral (x), polyvinylacetát (y) a PVOH (z)

HIPS

Polystyren (PS) je termoplast, který je široce využíván v oblasti obalových materiálů, izolací a potravinových obalů. Mezi hlavní tři typy polystyrenu patří expandovaný PS (EPS), PS pro obecné využití (GPPS) a právě “vysoce nárazový nebo tvrdý PS” (**HIPS**, z angl. **High-Impact PolyStyrene**). Jak naznačuje samotný název, HIPS je vysoce pevný, a také levný a lehký materiál. HIPS obsahuje 6-12 % elastomerního polybutadienu, který dodává PS právě vysokou pevnost.³⁸ HIPS se hodí pro tisk velkých objektů nebo jako podpěry pro materiály ABS, ASA a PETG. Oproti ABS je HIPS lehčí a mnohem méně se smršťuje, ale i tak může být tisk z HIPS náročný.³⁹ Doporučované tiskové teploty se pohybují v rozmezí 100-110 °C pro tiskovou podložku a 225-255 °C pro trysku.¹⁹

2.3. Dosavadní výzkum vlivu parametrů na 3D tisk

Jak shrnul ve svém článku Gao et al., v oblasti 3D tisku již bylo provedeno mnoho výzkumu. Kupříkladu byly zkoumány parametry jako orientace dílu, překryv naneseného filamentu (angl. air gap), tloušťka vrstvy, šířka a orientace naneseného filamentu (angl. raster width a raster angle), rychlost tisku, ale právě i vzor a hustota výplně.¹⁷

Konkrétně orientace v prostoru byla již značně prozkoumána, i v kombinaci s různými materiály, a byl prokázán vliv například na testování v tahu a kompresní testy. S rostoucím úhlem mezi dílem a podložkou klesala pevnost a rostla křehkost dílů. Stejně tak orientace naneseného filamentu byla již důkladně otestována, a byl prokázán vliv při tahových zkouškách, přičemž nejpevnější bylo zarovnání 0° (tedy filament nanesený ve směru tahu), a nejslabší 90° (tedy filament nanesený kolmo na směr tahu), ale zároveň kombinace orientace - $45^\circ/45^\circ$ (do kříže) měla lepší vlastnosti v ohybu i v tahu.^{17,40}

Dalším prozkoumaným parametrem byla tloušťka vrstvy, u které bylo prokázáno, že tenčí vrstvy dosahují vyšší nosnosti a také pevnosti v ohybu.¹⁷

Podobně tomu bylo u rychlosti tisku, kdy s vyšší rychlostí tisku klesala pevnost dílů, a díly tištěné při nižších rychlostech vykazovaly lepší mechanické vlastnosti.¹⁷

Vliv překryvu byl také zkoumán, přičemž bylo zjištěno, že nejpevnější jsou díly s malým překryvem, a rostoucí vzdáleností mezi naneseným filamentem klesá pevnost. Zároveň bylo pozorováno, že různá velikost mezer mezi filamentem má větší vliv, než než různá velikost překryvu.¹⁷

Byl zkoumán i vliv počtu obvodových stěn, společně s hustotou výplně, přičemž s rostoucím počtem obvodových stěn rostla pevnost dílů. S rostoucí hustotou docházelo také k nárůstu, a tento nárůst byl výraznější s rostoucím počtem obvodových stěn.⁴¹

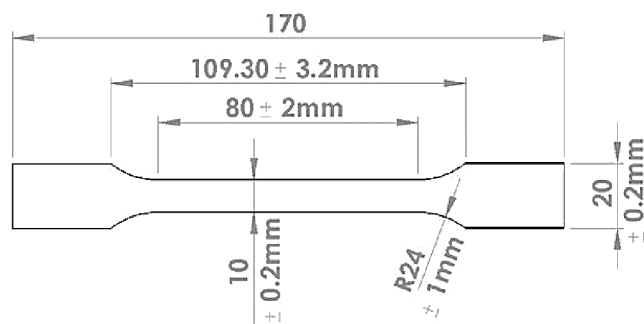
U hustoty výplně bylo pozorováno, že s rostoucí hustotou obecně rostla pevnost FDM dílů, ale například u CABS/ZnO kompozitů neměla hustota výplně značný vliv na pevnost, ale docházelo k nárůstu Youngova Modulu a tedy tuhosti.¹⁷ Pandžić et al. ukázal, že s rostoucí hustotou docházelo k růstu pevnosti i Youngova modulu.⁴² Laszlo Racz a Mircea Cristian Dudescu poukázali na rozdíly mezi experimentálně získanými daty z tahových zkoušek, kdy se u plochy průřezu vzorku nezohledňuje volný prostor ve výplni a simulacemi, kde tento volný prostor byl zohledněn. Rozdíly byly větší u nižších hustot zaplnění a s rostoucí hustotou zaplnění docházelo k poklesu rozdílů mezi srovnávanými daty.⁴³

Při testování vzoru výplně u PLA dílů došla skupina Cho et al. k závěru, že nejpevnější vzor je **Triangle**. a že vzor výplně nemá značný vliv na pevnost. K tomuto závěru ovšem autoři došli na základě testování pouze tří ze čtrnácti vzorů, **Triangle**, **Zig Zag** a **Grid**, které nabízí jimi používaný software Ultimaker Cura.^{17, 44, 45} Skupina Fernandez-Vicente et al. došla k závěru, že vliv vzorů výplně na díly z ABS byl menší než 5 %.⁴⁶ Zároveň skupina Akhoundi et al. došla k závěru, že nejpevnějším vzorem výplně je vzor **Concentric**, ale opět testovali pouze čtyři vzory, **Concentric**, **Rectilinear**, **Hilbert curve** a **Honeycomb**. Skupina sice testovala i různé hustoty výplně, ale opět pouze tři hodnoty, a to 20 %, 50 % a 100 %.⁴⁷ Vliv vzorů výplně se tedy zdá být komplexnější než u jiných parametrů, a je třeba výsledky z testování analyzovat a prezentovat s větší mírou opatrnosti.¹⁷

2.4. Testování 3D tištěných dílů

2.4.1. Používané normy a modely

Pro účely mého výzkumu jsem využil normu ISO 527-2 pro testování plastových dílů.⁴⁸ Konkrétně byl zvolen model 1A pro testování v tahu (viz Obr. 12).⁴⁹ Uvedená norma ISO 527-2 je sice norma pro testování plastových dílů, ovšem byla zamýšlena pro konvenční metody výroby, např. vstřikolisy, a nepočítala s technologií výroby jako je 3D tisk.⁴⁸



Sample thickness 4mm ± 0.2mm

Obr. 12 Rozměry modelu 1A pro testování v tahu⁵⁰

Přesto jsem tuto normu ze dvou důvodů zvolil pro svůj výzkum. Prvním důvodem je skutečnost, že tato norma již byla mnohokrát využita při výzkumech parametrů 3D tisku.⁵¹ Druhým důvodem je skutečnost, že v tuto chvíli neexistuje norma pro testování dílů vyrobených pomocí technologie 3D tisku, ať jde o díly z plastů, kovů, nebo jiných materiálů.

Mým cílem do budoucna je krom testování parametrů 3D tisku, přijít i s normami, které by byly optimalizované pro testování 3D tištěných dílů, případně samotných tiskáren, a dále s programem, který by na základě výsledků testování umožňoval automatizaci volby parametrů pro konkrétní 3D tištěný díl a jeho aplikaci, bez nutnosti experimentovat se širokou škálou proměnných. Takový program by zajistil jako časové, tak materiální, a tedy i finanční úspory, a navíc by mohl poskytovat lépe optimalizované díly pro danou aplikaci než při dosavadním rapidním prototypování.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. Použitý filament

Pro svou práci jsem zvolil filament značky Filament PM od firmy Plasty Mladeč. Materiál filamentu jsem zvolil kyselinu polymléčnou (PLA) o tloušťce struny 1,75 mm.⁵² Tento materiál byl zvolen, jelikož se jedná o velmi často používaný typ filamentu pro 3D tisk.^{51,53,44} Barva filamentu byla zvolena bílá, a to na základě výzkumu Pandžić et al., který zkoumal vliv barvy filamentu na pevnost výsledných dílů.⁵¹ Pro účely mého výzkumu bylo objednáno 10 kg výše popsaného filamentu po 2kg kotoučích přímo od firmy Plasty Mladeč,⁵² aby byly eliminovány vstupní proměnné jako například různé stáří použitého filamentu, nevhodné skladování, vystavení vlhkosti nebo i potenciálně rozdíly mezi filamentem vyrobeným v různých obdobích. Výrobce udává hodnoty Youngova modulu 3,41 GPa, hodnotu maximálního napětí 59,4 MPa a prodloužení 2,3 %.⁵²

3.2. Použitý testovací model

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, pro účely mého výzkumu jsem využil model 1A pro testování v tahu⁴⁹ z normy ISO 527-2 pro testování plastových dílů.⁴⁸ Tento model ve formátu pro 3D tisk byl převzat z webové stránky Thingiverse od uživatele granieure.⁴⁹ Následně byly zkontrolovány všechny rozměry v programu Blender.⁵⁴ Pro tisk byly v programu PrusaSlicer měněny vzory výplně a hustota zaplnění.⁵⁵ Výška obrysu (Skirt Hight) byla nastavena na jednu vrstvu a minimální délka obrysu byla vynulována. Dále byl upraven výstupní formát názvu tiskového souboru pro snazší orientaci mezi soubory s jednotlivými variantami výplně. Všechny ostatní možné parametry byly ponechány v základním nastavení programu PrusaSlicer, dle předvolby „0.20mm SPEED @MK3“.⁵⁵

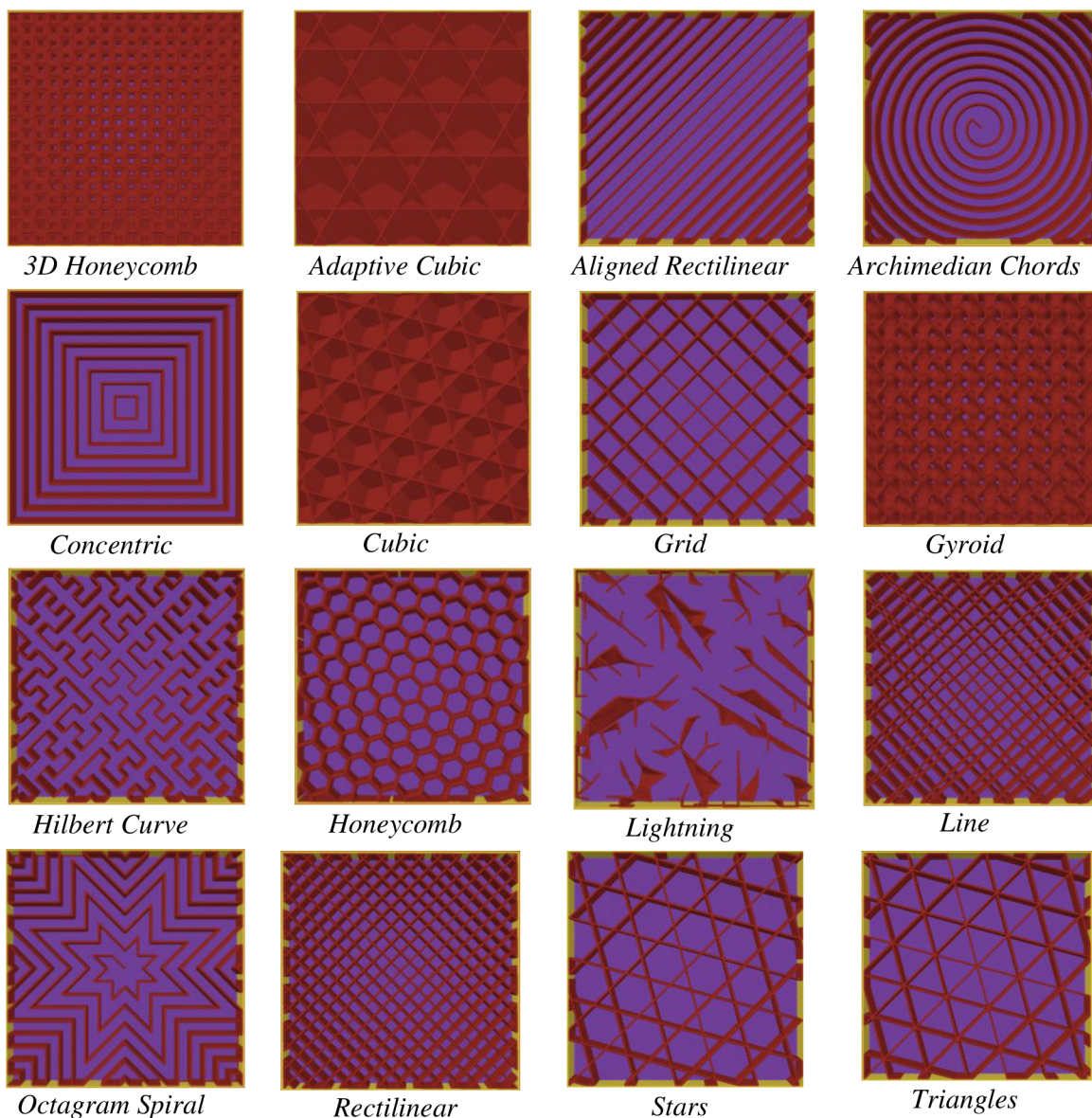
3.3. Parametry výplní modelu

Na začátku mé práce stála hypotéza, že jednotlivé vzory budou mít vliv na výslednou pevnost FDM 3D tištěných dílů. Účelem práce tedy bylo ověřit, zda opravdu vzory významně ovlivňují pevnost těchto dílů, a kvantifikovat případné rozdíly.

3.3.1. Vzory

Ve své práci jsem porovnával různé vzory nabízené programem PrusaSlicer. V době testování vzorů byly k dispozici vzory *3D Honeycomb*, *Adaptive Cubic*, *Aligned Rectilinear*, *Archimedian Chords*, *Concentric*, *Cubic*, *Grid*, *Gyroid*, *Hilbert Curve*, *Honeycomb*, *Lightning*, *Line*, *Octagram Spiral*, *Rectilinear*, *Stars a Triangles*.⁵⁶ K dispozici byl i vzor *Supportive Cubic*,⁵⁶ který podobně jako *Adaptive Cubic* vyplňuje daný model dle jeho velikosti. Vzor *Supportive Cubic* však narozdíl od *Adaptive Cubic* **nebyl testován** z důvodu, že při velikosti modelu 1A dle ISO 527-2 se neprojeví rozdíly mezi těmito dvěma vzory. Zároveň je ale i v tomto měřítku rozdíl mezi těmito dvěma vzory a vzorem *Cubic*, a proto byl alespoň jeden ze zmíněných adaptivních vzorů testován.

Tabulka 1: Ilustrační obrázky jednotlivých vzorů výplně



3.4. Hustota zaplnění

Spolu se vzory výplně jsem se rozhodl otestovat i vliv hustoty zaplnění na jednotlivé vzory. Program PrusaSlicer umožňuje nastavit hustotu zaplnění od 0 % až po 99 %, respektive u některých vzorů až 100 %. Ve své práci jsem se rozhodl otestovat různé hustoty zaplnění po 5% nárůstech od 5% až po 95 %, respektive 100 %. Výjimkou byly hustoty 35 %, 45 %, 55 % a 65 %, které byly na základě prvotních testů vyřazeny, jelikož v oblasti od 30 % po 70 % nedocházelo ke značnému nárůstu v pevnosti. Zároveň byly vytištěny i vzorky s 0% výplní, jako základ pro srovnání ostatních vzorů.

3.5. Metodologie testování

Nejprve byly zvoleny dva podobné vzory, *Line* a *Rectilinear*, a vytištěny s hustotou zaplnění od 5 % po 95 % u vzoru *Line* a po 100 % u vzoru *Rectilinear*. Nárůst hustoty byl po 5 %. Tyto podobné vzory byly zvoleny, aby byla otestována hypotéza, zda mezi jednotlivými vzory jsou rozdíly v pevnosti a jak se mění pevnost s rostoucí hustotou.

Výsledky těchto prvotních testů ukázaly, že i mezi velmi podobnými vzory jako *Line* a *Rectilinear* jsou rozdíly, a tedy má smysl otestovat i ostatní vzory, které jsou více odlišné. Zároveň se ukázalo, že v oblasti od 30 % do 70 % nedochází k rapidnímu nárůstu pevnosti, a tedy bylo rozhodnuto v dalších testech vynechat hustoty zaplnění 35 %, 45 %, 55 % a 65 %. Primární motivací bylo snížení časové i materiálové náročnosti práce.

3.5.1. Množství vzorků

V samotném výzkumu již bylo testováno celkem **16 vzorů**, přičemž u každého z nich bylo zkoumáno **15 hustot zaplnění**. U 6 vzorů výplně, které to umožňovaly, byla navíc otestována i hustota zaplnění 100 %. Také byla otestována 0% hustota zaplnění, u které se tedy neuplatnil žádný vzor. Celkem bylo testováno **247 různých variant výplně**. Všechny varianty byly navíc vytištěny třikrát, aby bylo možné provést statistickou analýzu. V součtu bylo tedy vytištěno **741 vzorků A1 dle ISO 527-2**. S ohledem na to, že v mém případě nebylo možné tisknout přes noc, trvalo vytištění všech vzorků přibližně jeden měsíc.

3.5.2. Hmotnost vzorků

Než byly jednotlivé vzorky otestovány, byly zváženy a zprůměrovány pro jednotlivé varianty výplně. Průměrné hmotnosti pro jednotlivé vzory jsou uvedeny v Tabulce 2.

Tabulka 2: Průměrné hmotnosti vzorků jednotlivých testovaných variant výplně

%	<i>3D Honeycomb</i>	<i>Adaptive Cubic</i>	<i>Aligned Rectilinear</i>	<i>Archimedian Chords</i>	<i>Con- centric</i>	<i>Cubic</i>	<i>Grid</i>	<i>Gyroid</i>
0	6,05							
5	6,42	6,32	6,50	6,47	6,57	6,38	6,40	6,38
10	6,72	6,52	6,77	6,73	6,80	6,67	6,70	6,72
15	7,00	6,78	7,00	7,03	7,07	6,92	6,90	6,95
20	7,32	6,92	7,28	7,28	7,30	7,20	7,22	7,12
25	7,60	7,15	7,55	7,57	7,58	7,45	7,42	7,47
30	7,88	7,32	7,80	7,80	7,80	7,70	7,68	7,70
40	8,43	7,72	8,32	8,33	8,30	8,28	8,22	8,22
50	9,03	8,12	8,87	8,88	8,80	8,77	8,75	8,67
60	9,63	8,48	9,35	9,18	9,30	9,27	9,23	9,10
70	10,05	8,87	9,88	9,70	9,90	9,77	9,68	9,57
75	10,47	9,10	10,13	9,93	10,00	10,00	10,00	9,80
80	10,73	9,23	10,40	10,20	10,40	10,28	10,32	10,07
85	11,03	9,45	10,65	10,48	10,48	10,53	10,47	10,27
90	11,25	9,62	10,92	10,72	10,90	10,77	10,73	10,60
95	11,65	9,83	11,20	10,98	10,97	11,02	11,00	10,80
100	---	---	11,25	11,08	11,33	---	---	---
%	<i>Hilbert Curve</i>	<i>Honeycomb</i>	<i>Lightning</i>	<i>Line</i>	<i>Octagram Spiral</i>	<i>Rectilinear</i>	<i>Stars</i>	<i>Triangles</i>
0	6,05							
5	6,38	6,42	6,13	6,50	6,45	6,57	6,32	6,40
10	6,80	6,82	6,38	6,80	6,72	6,88	6,70	6,70
15	7,00	7,20	6,50	7,10	7,00	7,10	6,90	6,92
20	7,30	7,47	6,70	7,37	7,25	7,40	7,20	7,18
25	7,52	7,82	6,83	7,65	7,58	7,63	7,40	7,50
30	7,82	8,13	6,97	7,93	7,80	7,90	7,75	7,77
40	8,35	8,70	7,13	8,52	8,30	8,45	8,23	8,27
50	8,85	9,27	7,37	9,00	8,82	9,00	8,77	8,80
60	9,15	9,75	7,43	9,50	9,17	9,50	9,27	9,28
70	9,70	10,20	7,70	10,00	9,67	10,00	9,75	9,78
75	9,92	10,45	7,67	10,30	9,95	10,28	9,97	10,00
80	10,22	10,60	7,80	10,58	10,20	10,50	10,27	10,30
85	10,48	10,85	7,80	10,83	10,43	10,77	10,45	10,55
90	10,75	11,00	7,82	11,07	10,70	11,00	10,70	10,80
95	10,98	11,17	8,00	11,40	10,98	11,30	10,92	11,00
100	11,10	---	---	---	11,07	11,40	---	---

3.5.3. Testování v tahu

Připravené vzorky byly testovány v tahu pomocí přístroje Schimadzu Autograph AGS-100kNX pro mechanické testování dostupného na katedře fyzikální chemie PŘF UPOL. Přístroj rovněž umožňuje testování v tlaku a testování metodou třibodového ohybu. K obsluze přístroje byl využíván program Trapezium X dodávaný výrobcem přístroje.

Všechny vzorky byly předpínány na 300 N rychlostí 1 mm/s, aby u všech vzorků bylo dosaženo stejné výchozí pozice, a následně natahovány do přetrhnutí rychlostí 5 mm/s. Tomuto předpínání odpovídá posun v grafech tahových zkoušek v příloze. Vyhodnocovány byly údaje maximální napětí, Youngův modul pružnosti a poměrné prodloužení.

Napětí při tahové zkoušce odpovídá podílu síly působící na testovaný vzorek a počáteční plochy průřezu vzorku v místě přetržení (Obr. 13).

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Obr. 13 Vztah pro výpočet napětí při tahové zkoušce

Youngův modul pružnosti je počítán z lineární části tahové zkoušky, kde platí Hookův zákon (Obr. 14). V této oblasti dochází k pružné deformaci, a pakliže by na vzorek přestala působit síla, vrátil by se vzorek do původního stavu, na konci této oblasti se nachází tzv. mez úměrnosti (také nazývána mez pružnosti), po které následuje oblast plastické (nevratné) deformace. U některých materiálů následuje nejprve oblast kluzu, kdy dochází k prodlevě, a tzv. mez kluzu, ale mnohé materiály tuto prodlevu nemají, a je u nich mez úměrnosti a mez kluzu ztotožňována. V oblasti plastické deformace se nachází tzv. mez pevnosti, která odpovídá maximálnímu napětí dosaženému při zkoušce. Po dosažení meze pevnosti dochází u vzorku ke vzniku tzv. krčku, ve kterém se vzorek zužuje, a nakonec se v tomto místě přetrhne.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Obr. 14 Vztah pro výpočet Youngova modulu pružnosti z Hookova zákona

Poměrné prodloužení odpovídá rozdílu délky vzorku při přetržení a počáteční délky poděleném počáteční délkou (Obr. 15). Jelikož byly všechny varianty vytištěny třikrát, jsou všechny dále uváděné hodnoty napětí a Youngova modulu průměrem tří naměřených hodnot. Uváděné prodloužení není průměrováno, jelikož u mnohých variant výplně byly značné rozdíly mezi třemi vytištěnými vzorky.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

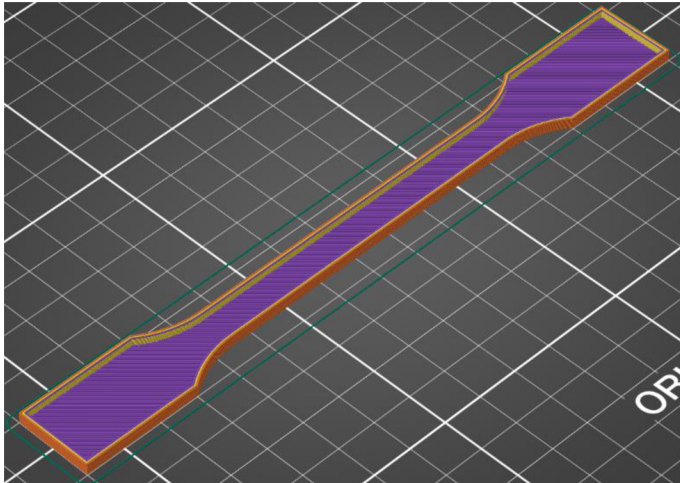
Obr. 15 Vztah pro výpočet poměrného prodloužení při tahové zkoušce

4. VÝSLEDKY

4.1. Výsledky jednotlivých vzorů

4.1.1. Nulová hustota zaplnění

Aby bylo možné odlišit příspěvek k pevnosti jednotlivých částí tištěných dílů od samotné výplně, byly krom jednotlivých vzorů výplně třikrát vytištěny i vzorky s nulovou hustotou zaplnění (viz Obr. 16) a i tyto vzorky byly otestovány v tahu.

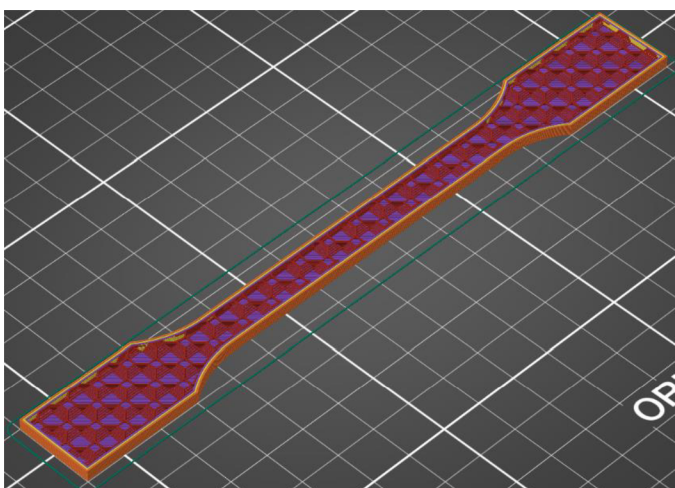


Obr. 16 Vzorek s nulovou hustotou zaplnění v programu PrusaSlicer

Při tahových zkouškách bylo naměřeno maximální napětí 24 MPa, Youngův modul pružnosti 1,46 GPa a prodloužení v rozmezí 1,75 % až 2,49 %.

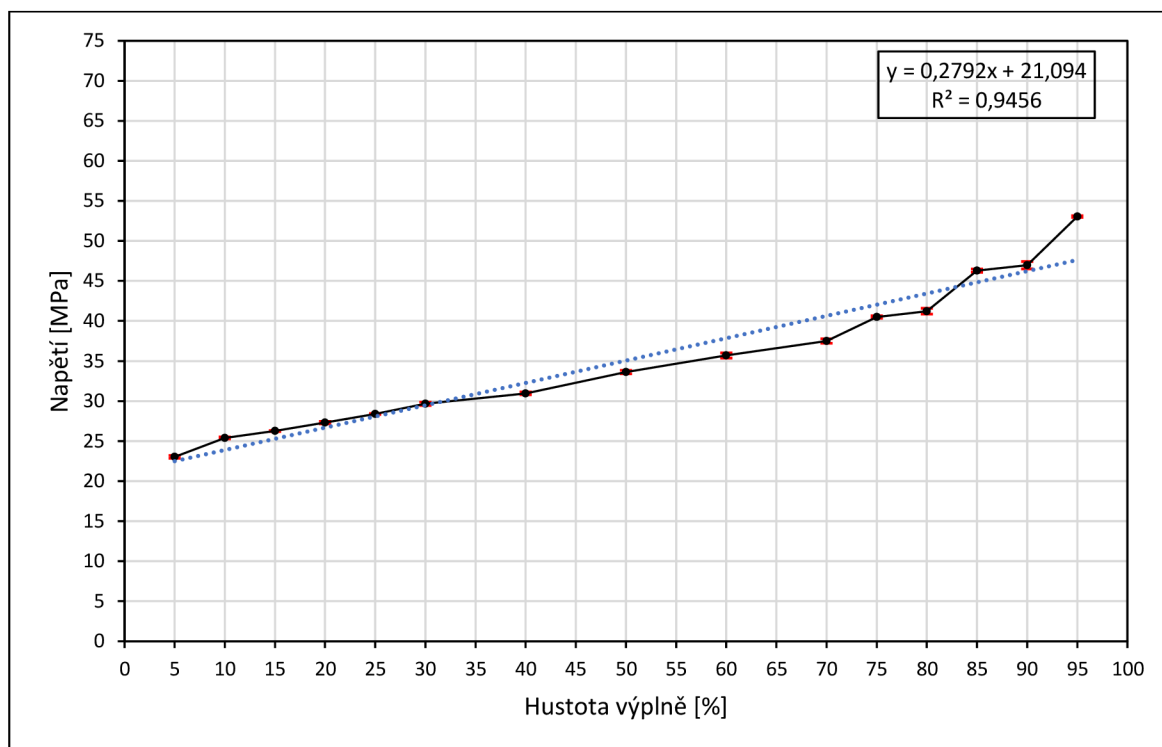
4.1.2. 3D Honeycomb

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 17) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 23,03 MPa, Youngův modul pružnosti 1,56 GPa a prodloužení v rozmezí 1,48 % až 2,15 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 53,05 MPa, Youngův modul pružnosti 3,59 GPa a prodloužení v rozmezí 3,23 % až 3,61 %.



Obr. 17 Vzorek s 10% hustotou zaplnění vzoru **3D Honeycomb**

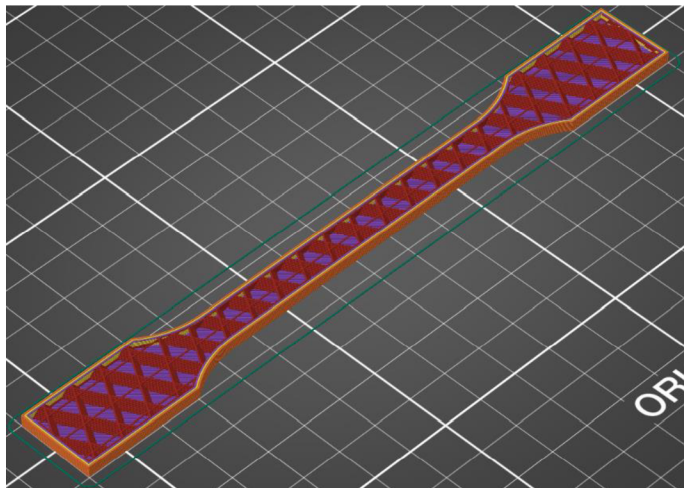
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k nárůstu maximálního napětí, přičemž u hustot zaplnění 75 %, 85 % a 95 % došlo k prudkému nárůstu oproti předchozím hodnotám (viz Obr. 18). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 18 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **3D Honeycomb**. Červeně jsou v tomto i následujících grafech vyznačeny standardní chyby stanovení průměrné hodnoty ($n = 3$)

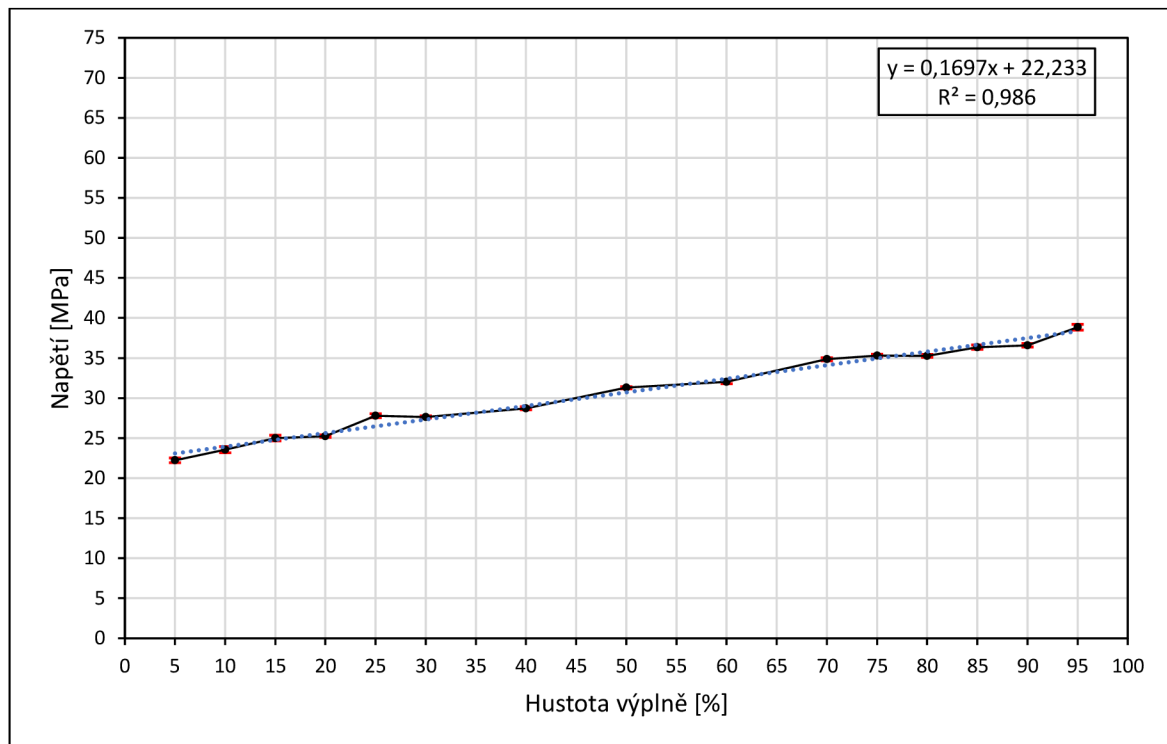
4.1.3. Adaptive Cubic

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 19) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 22,22 MPa, Youngův modul pružnosti 1,55 GPa a prodloužení v rozmezí 1,28 % až 1,54 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 38,85 MPa, Youngův modul pružnosti 2,79 GPa a prodloužení v rozmezí 1,72 % až 2,05 %.



Obr. 19 Vzorek s 25% hustotou zaplnění vzoru *Adaptive Cubic*

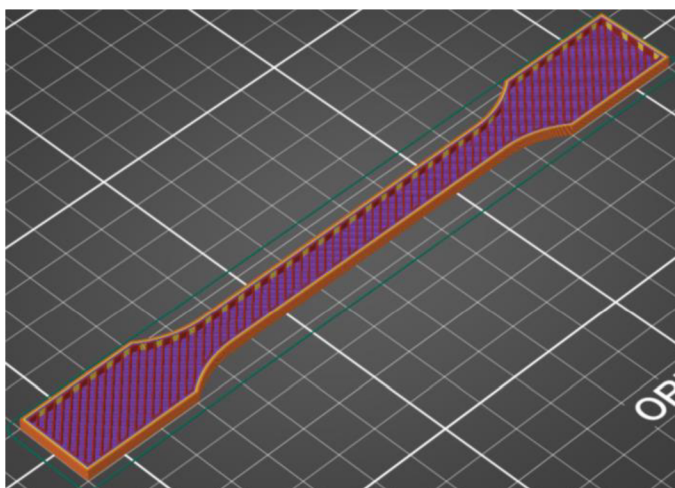
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k pozvolnému nárůstu hodnoty maximálního napětí, přičemž u hustot zaplnění 25 % a 95 % došlo k výraznějšímu nárůstu oproti předchozím hodnotám (viz Obr. 20). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 20 Hodnoty maximálního napětí u vzoru *Adaptive Cubic*

4.1.4. Aligned Rectilinear

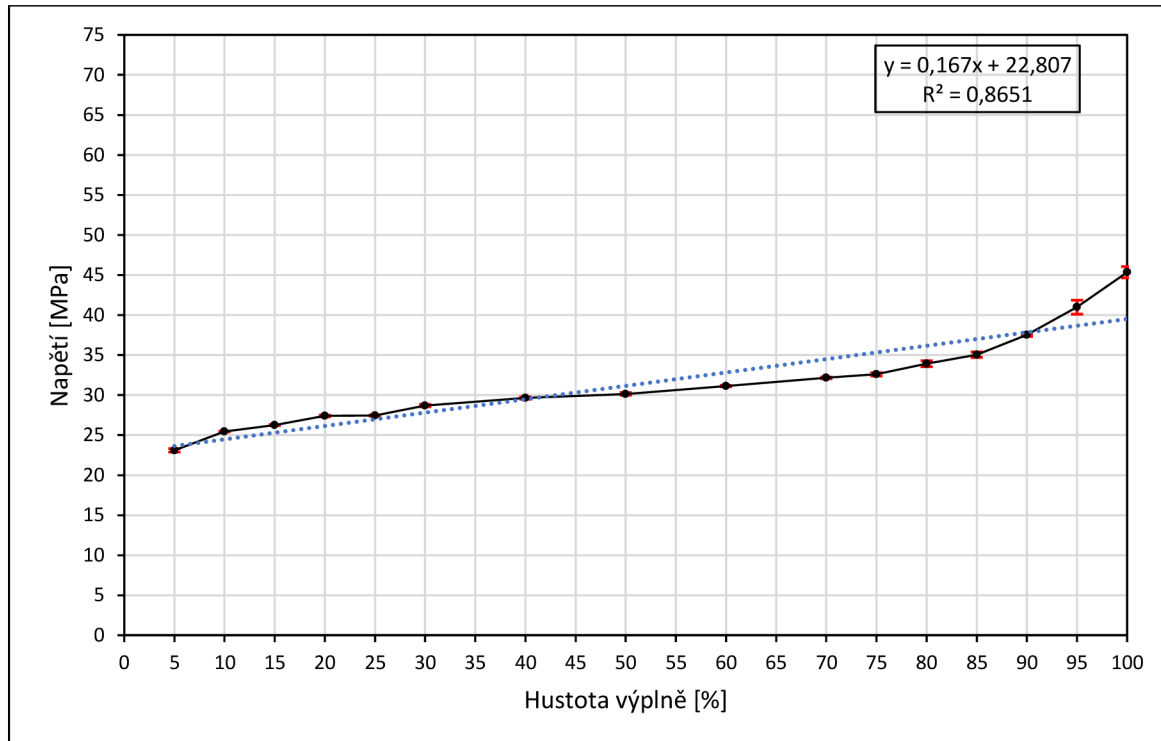
Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 21) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 23,10 MPa, Youngův modul pružnosti 1,74 GPa a prodloužení v rozmezí 1,25 % až 1,39 %. U vzorků s 95%, a 100% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 40,99 MPa, a 45,35 MPa, Youngův modul pružnosti 3,34 GPa a 3,66 GPa a prodloužení v rozmezí



Obr. 21 Vzorek s 25% hustotou zaplnění vzoru

Aligned Rectilinear
1,45 % až 1,60 %, respektive 1,27 % až 1,81 %.

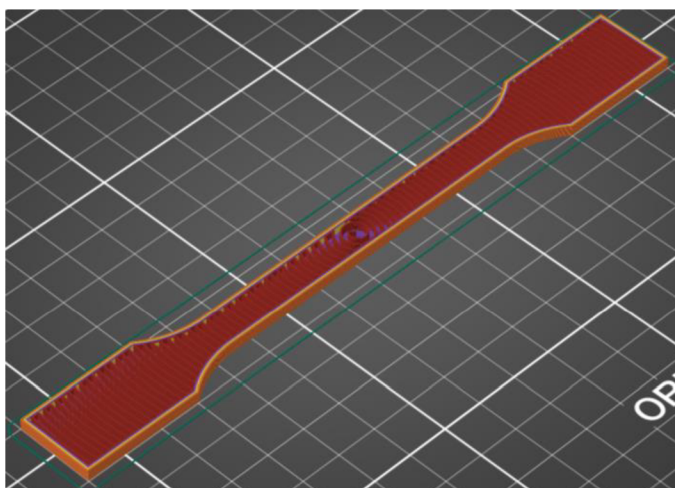
S rostoucí hustotou zaplnění od 5 % do 20 % docházelo k nárůstu hodnoty maximálního napětí, přičemž od 30 % do 60 % nedocházelo k signifikantnímu nárůstu a od 70 % docházelo k výraznému růstu maximálního napětí. Zajímavá je oblast nelineárního nárůstu pevnosti nad 80 % (viz Obr. 22).



Obr. 22 Hodnoty maximálního napětí u vzoru *Aligned Rectilinear*

4.1.5. Archimedian Chords

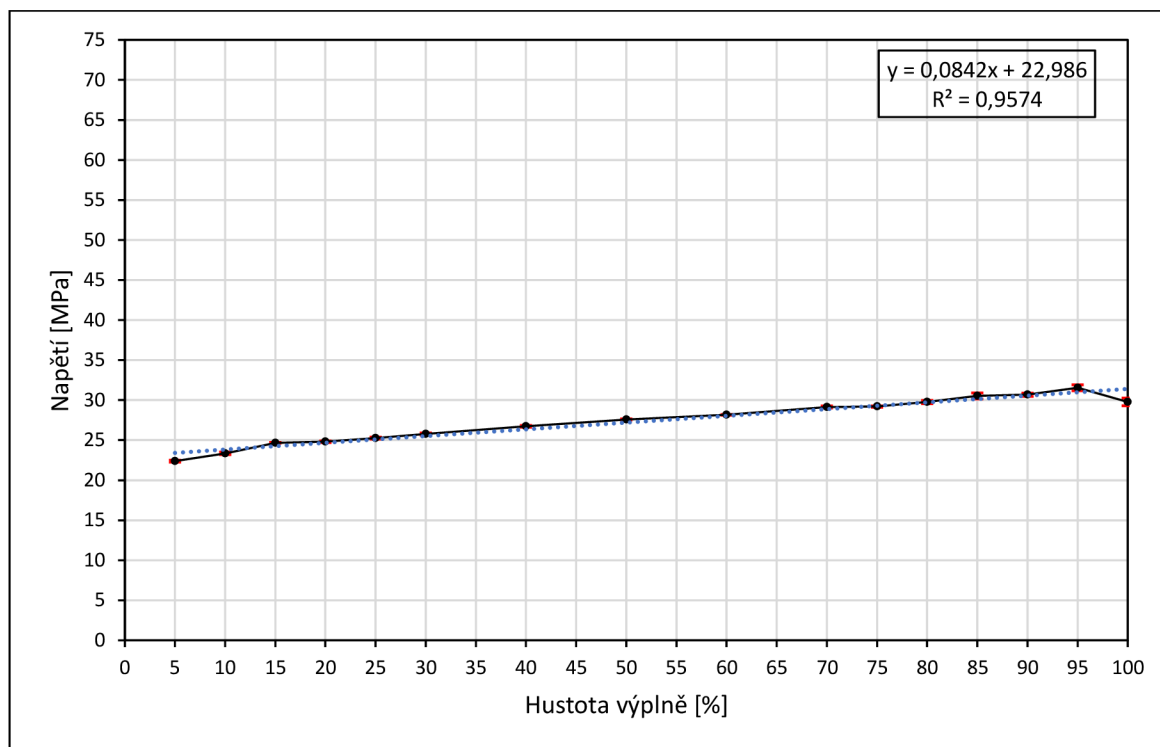
Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 23) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 22,39 MPa, Youngův modul pružnosti 1,57 GPa a prodloužení v rozmezí 1,44 % až 1,64 %. U vzorků s 95%, a 100% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 31,55 MPa, a 29,78 MPa, Youngův modul pružnosti 2,70 GPa a 2,88 GPa a prodloužení v rozmezí



Obr. 23 Vzorek s 25% hustotou zaplnění vzoru

1,18 % až 1,31 %, respektive 1,01 % až 1,12 %.

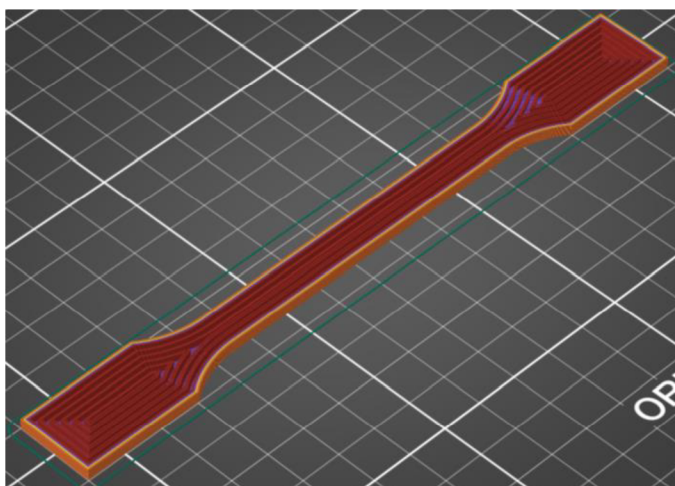
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo pouze k mírnému lineárnímu nárůstu hodnoty maximálního napětí, přičemž u 100% hustoty zaplnění došlo k poklesu hodnoty maximálního napětí (viz Obr. 24).



Obr. 24 Hodnoty maximálního napětí u vzoru *Archimedian Chords*

4.1.6. Concentric

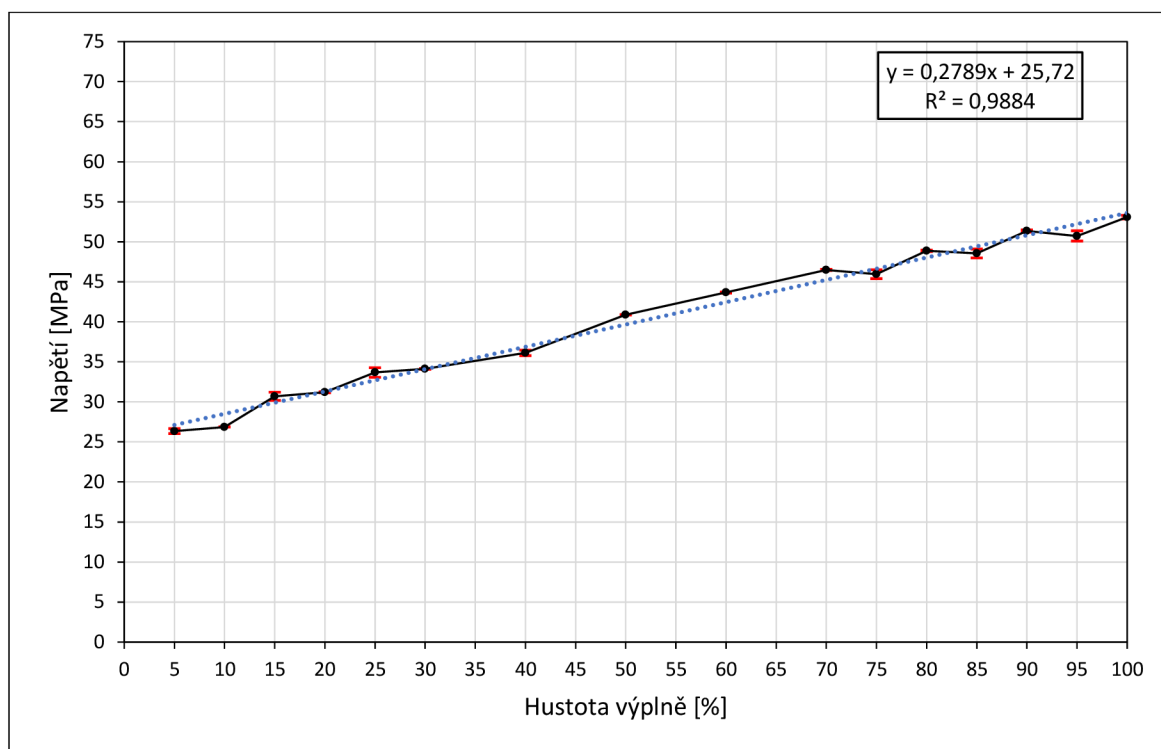
Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 25) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 26,35 MPa, Youngův modul pružnosti 1,87 GPa a prodloužení v rozmezí 1,45 % až 1,73 %. U vzorků s 95%, a 100% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 50,73 MPa, a 53,08 MPa, Youngův modul pružnosti 3,53 GPa



Obr. 25 Vzorek s 25% hustotou zaplnění vzoru **Concentric**

a 3,71 GPa a prodloužení v rozmezí 2,18 % až 2,33 %, respektive 1,62 % až 1,84 %.

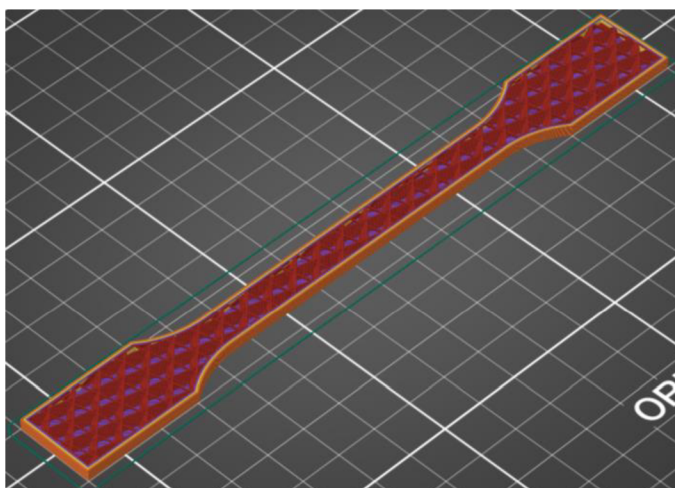
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k značnému skoro lineárnímu nárstu hodnoty maximálního napětí (viz Obr. 26).



Obr. 26 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **Concentric**

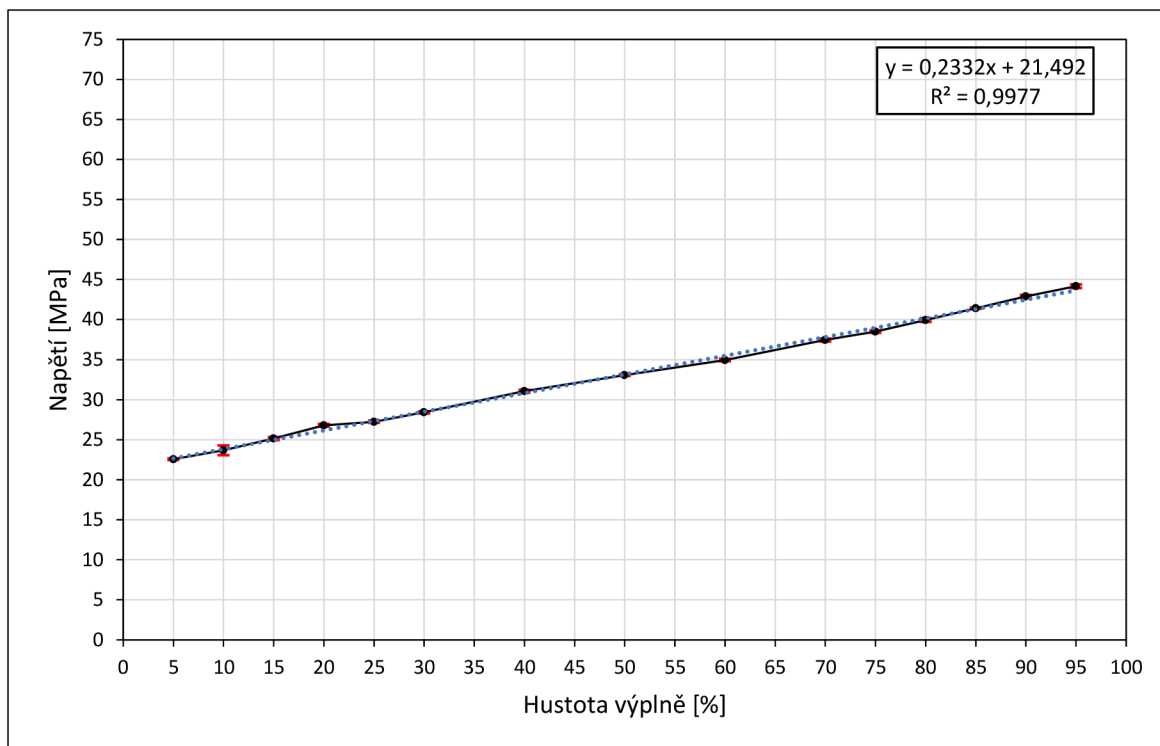
4.1.7. Cubic

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 27) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 22,57 MPa, Youngův modul pružnosti 1,63 GPa a prodloužení v rozmezí 1,45 % až 1,59 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 44,17 MPa, Youngův modul pružnosti 3,39 GPa a prodloužení v rozmezí 1,89 % až 2,21 %.



Obr. 27 Vzorek s 25% hustotou zaplnění vzoru **Cubic**

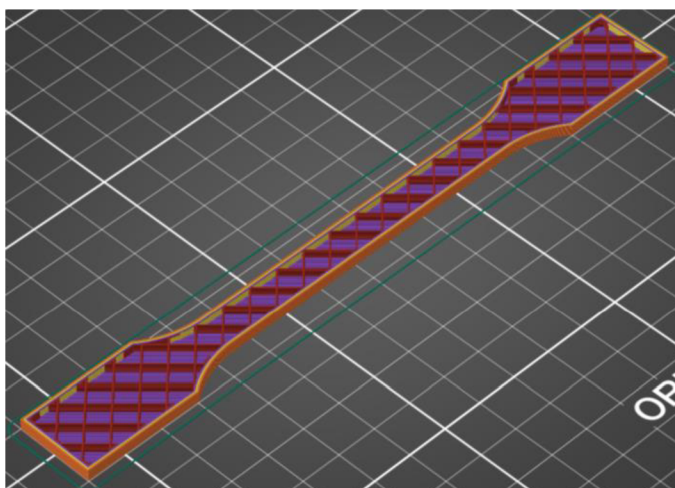
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k lineárnímu nárůstu hodnoty maximálního napětí, přičemž u 20% hustoty zaplnění došlo k mírně vyššímu nárůstu hodnoty maximálního napětí oproti předchozí hodnotě (viz Obr. 28). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 28 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **Cubic**

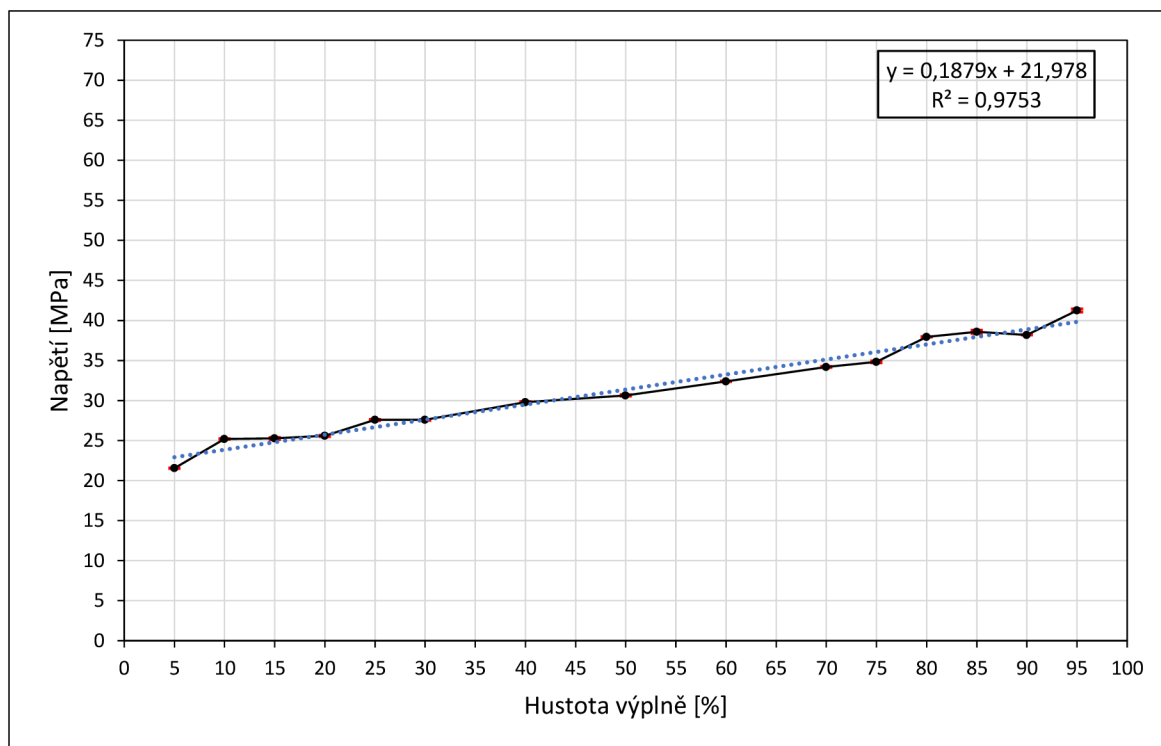
4.1.8. Grid

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 29) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 21,54 MPa, Youngův modul pružnosti 1,54 GPa a prodloužení v rozmezí 1,32 % až 1,86 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 41,25 MPa, Youngův modul pružnosti 3,13 GPa a prodloužení v rozmezí 1,71 % až 1,75 %.



Obr. 29 Vzorek s 15% hustotou zaplnění vzoru *Grid*

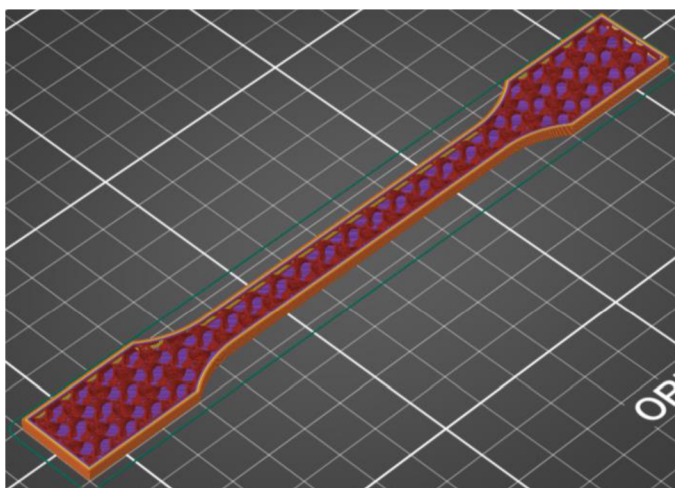
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k téměř lineárnímu nárůstu hodnoty maximálního napětí, přičemž u hustot zaplnění 5 % a 75 % byly hodnoty nižší oproti trendu a u hustot zaplnění 10 %, 25 %, 80 %, 85 % a 95 % došlo k vyšším nárůstům hodnoty maximálního napětí oproti jinde pozorovanému trendu (viz Obr. 30). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 30 Hodnoty maximálního napětí u vzoru *Grid*

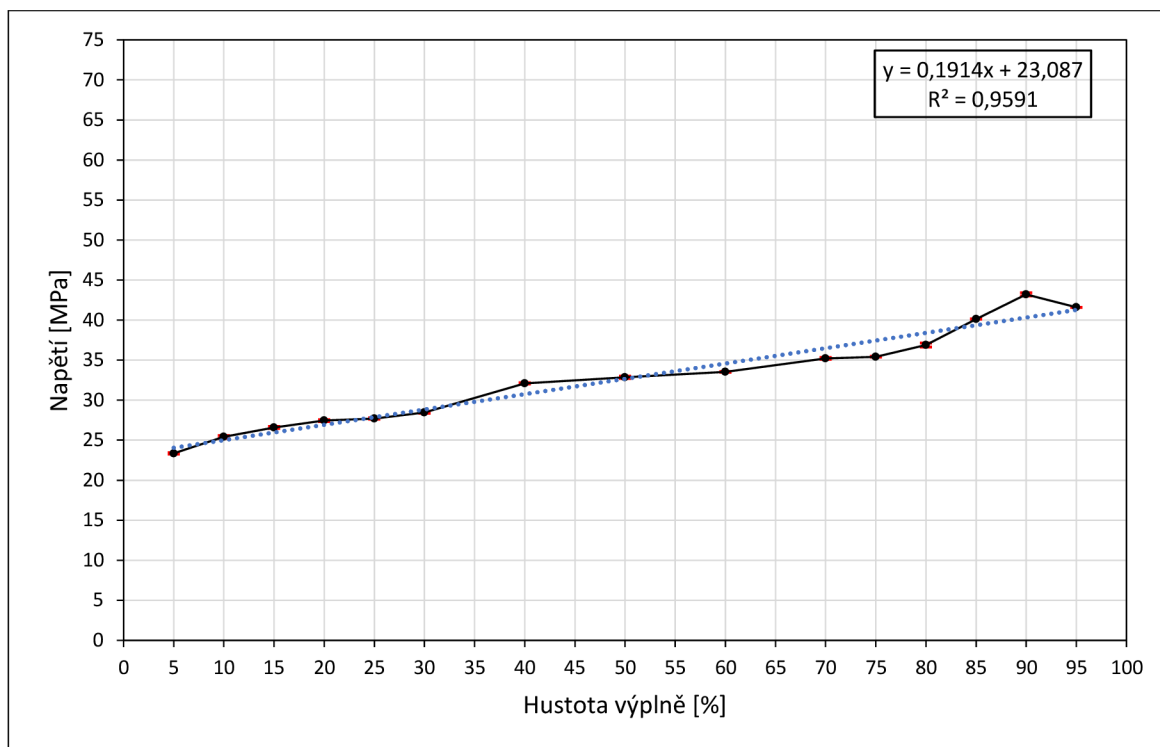
4.1.9. Gyroid

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 31) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 23,35 MPa, Youngův modul pružnosti 1,66 GPa a prodloužení v rozmezí 1,38 % až 1,86 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 41,59 MPa, Youngův modul pružnosti 2,99 GPa a prodloužení v rozmezí 1,77 % až 1,85 %.



Obr. 31 Vzorek s 15% hustotou zaplnění vzoru **Gyroid**

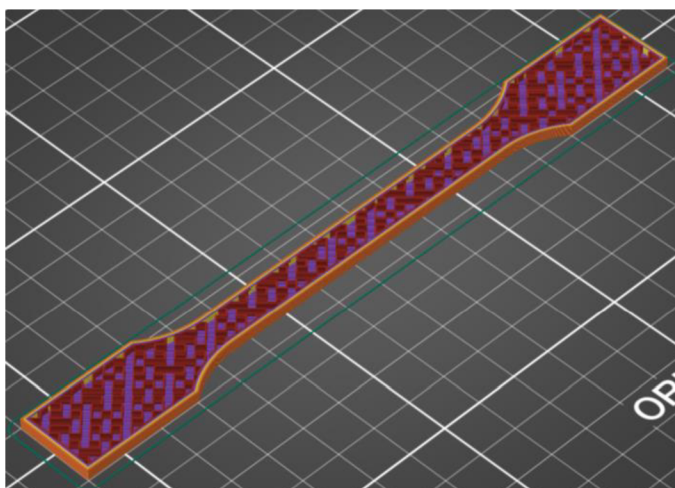
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k pozvolnému nárůstu hodnoty maximálního napětí, přičemž u hustoty zaplnění 40 % došlo k vyššímu nárůstu a následně až do 75 % nedošlo k signifikantnímu nárůstu. Od 80 % docházelo k výraznému nárůstu, ale u 95% hustoty zaplnění došlo k poklesu (viz Obr. 32). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 32 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **Gyroid**

4.1.10. Hilbert Curve

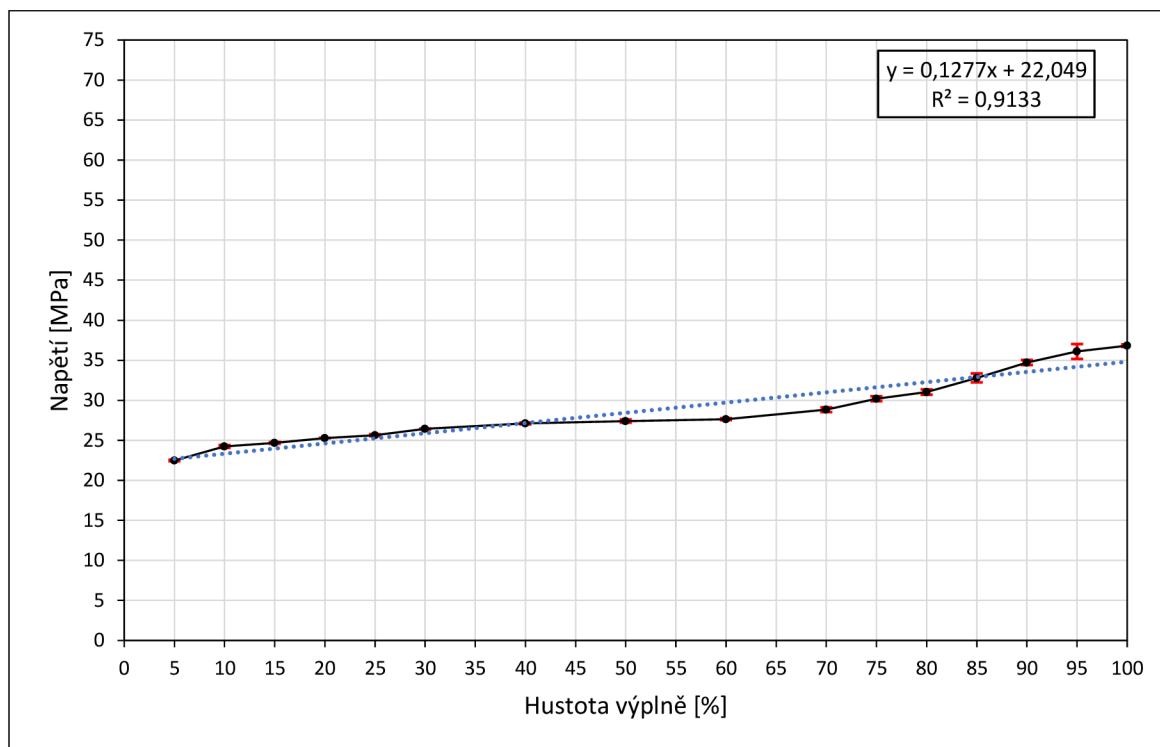
Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 33) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 22,47 MPa, Youngův modul pružnosti 1,68 GPa a prodloužení v rozmezí 1,28 % až 1,34 %. U vzorků s 95%, a 100% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 36,09 MPa, a 36,82 MPa, Youngův modul pružnosti 3,24 GPa a 3,38 GPa a prodloužení v rozmezí



Obr. 33 Vzorek s 20% hustotou zaplnění vzoru

Hilbert Curve
1,19 % až 1,25 %, respektive 1,25 % až 1,33 %.

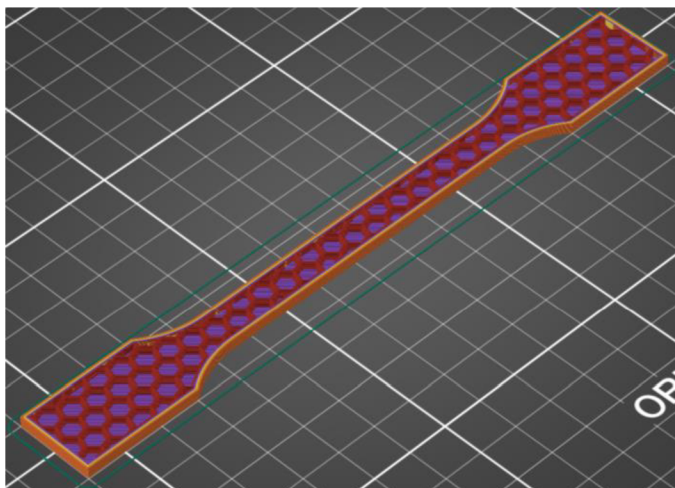
S rostoucí hustotou zaplnění nedocházelo k výraznému nárůstu hodnoty maximálního napětí až po 70 %, a k výraznějšímu lineárnímu růstu docházelo až od 75% hustoty zaplnění (viz Obr. 34).



Obr. 34 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **Hilbert Curve**

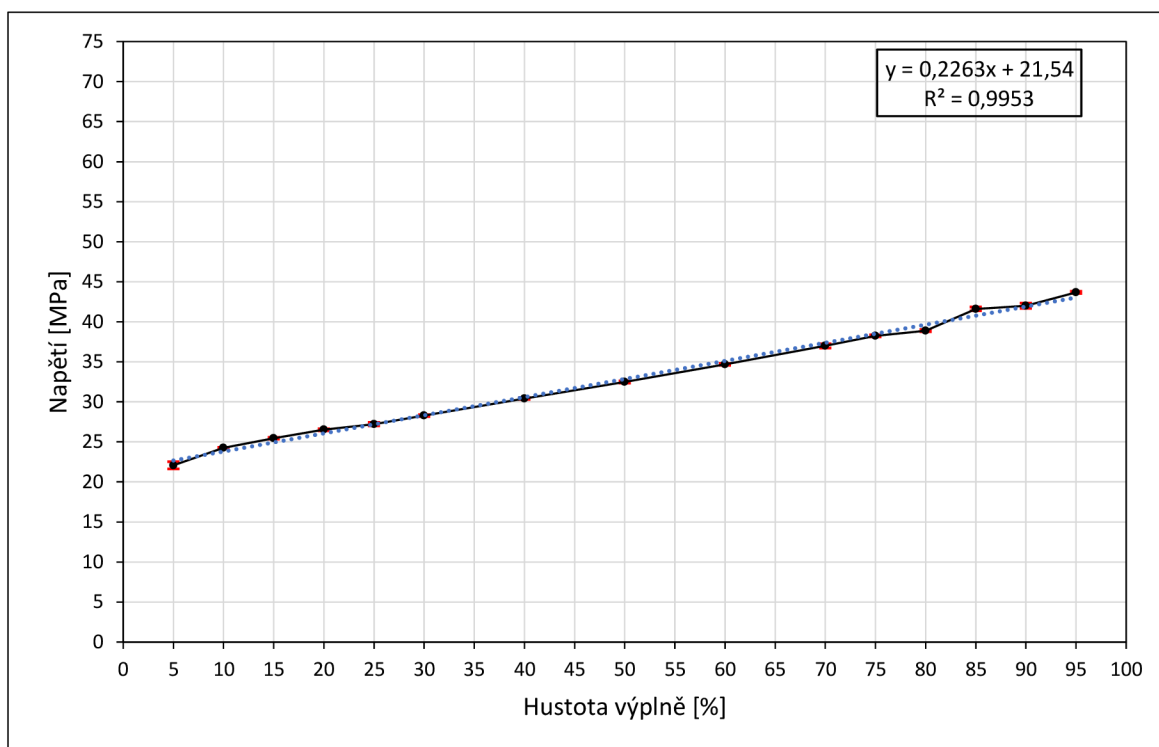
4.1.11. Honeycomb

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 35) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 22,07 MPa, Youngův modul pružnosti 1,56 GPa a prodloužení v rozmezí 1,33 % až 1,47 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 43,67 MPa, Youngův modul pružnosti 3,38 GPa a prodloužení v rozmezí 1,65 % až 1,68 %.



Obr. 35 Vzorek s 15% hustotou zaplnění vzoru **Honeycomb**

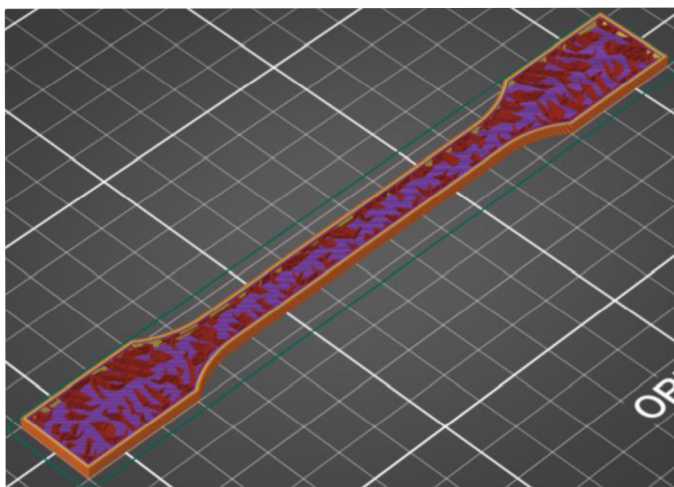
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k téměř lineárnímu nárůstu hodnoty maximálního napětí. Výjimkou byla 80% hustota zaplnění, u které byla nižší hodnota oproti trendu a 85%, u které byla vyšší hodnota oproti trendu (viz Obr. 36). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 36 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **Honeycomb**

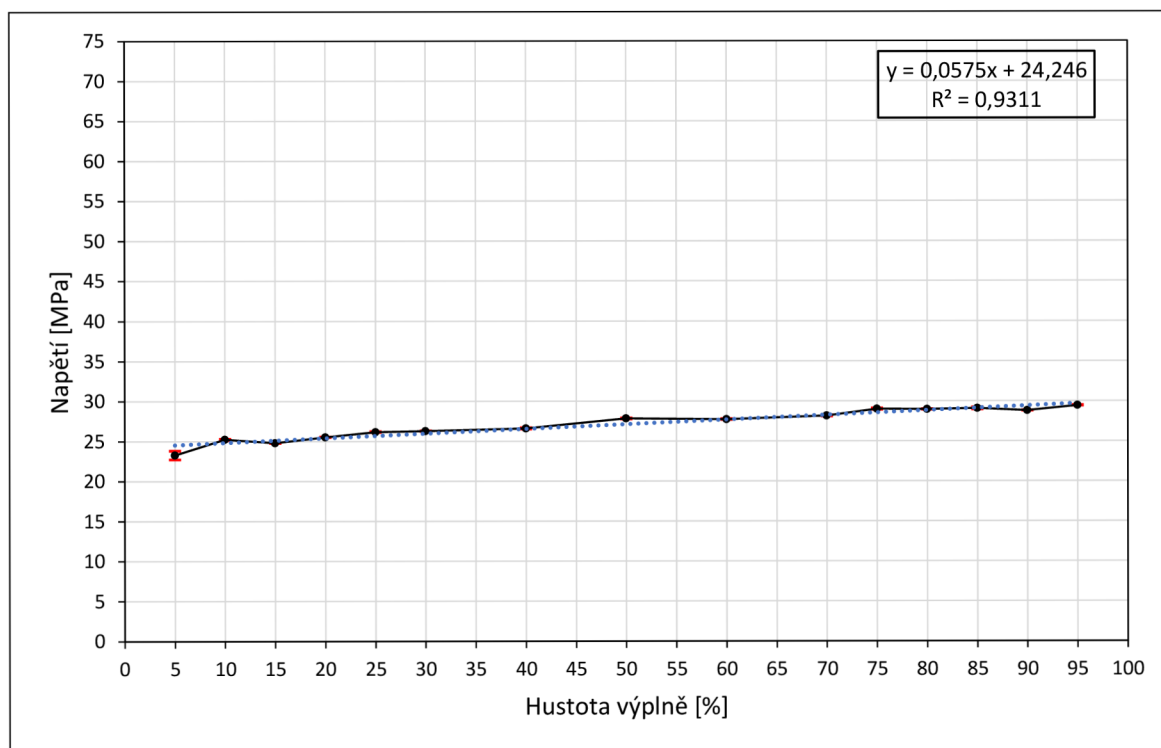
4.1.12. Lightning

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 37) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 23,28 MPa, Youngův modul pružnosti 1,52 GPa a prodloužení v rozmezí 1,52 % až 2,01 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 29,42 MPa, Youngův modul pružnosti 2,08 GPa a prodloužení v rozmezí 1,54 % až 1,57 %.



Obr. 37 Vzorek s 25% hustotou zaplnění vzoru *Lightning*

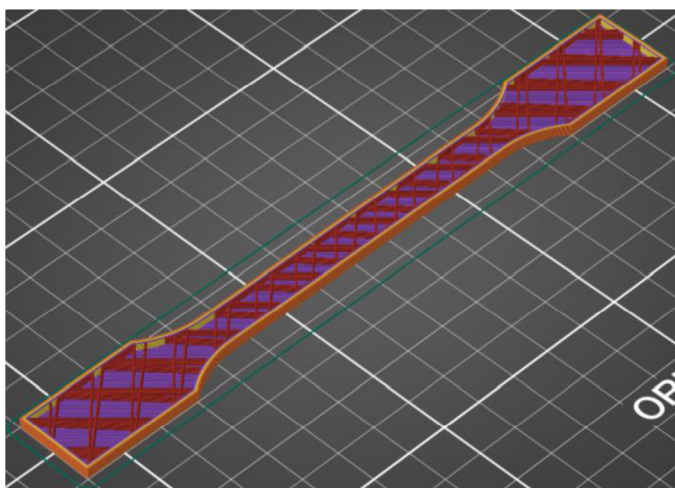
S rostoucí hustotou zaplnění téměř nedocházelo k nárustu hodnoty maximálního napětí. Výjimkou je 10% hustota zaplnění, u které byla vyšší hodnota oproti okolním hodnotám (viz Obr. 38). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 38 Hodnoty maximálního napětí u vzoru *Lightning*

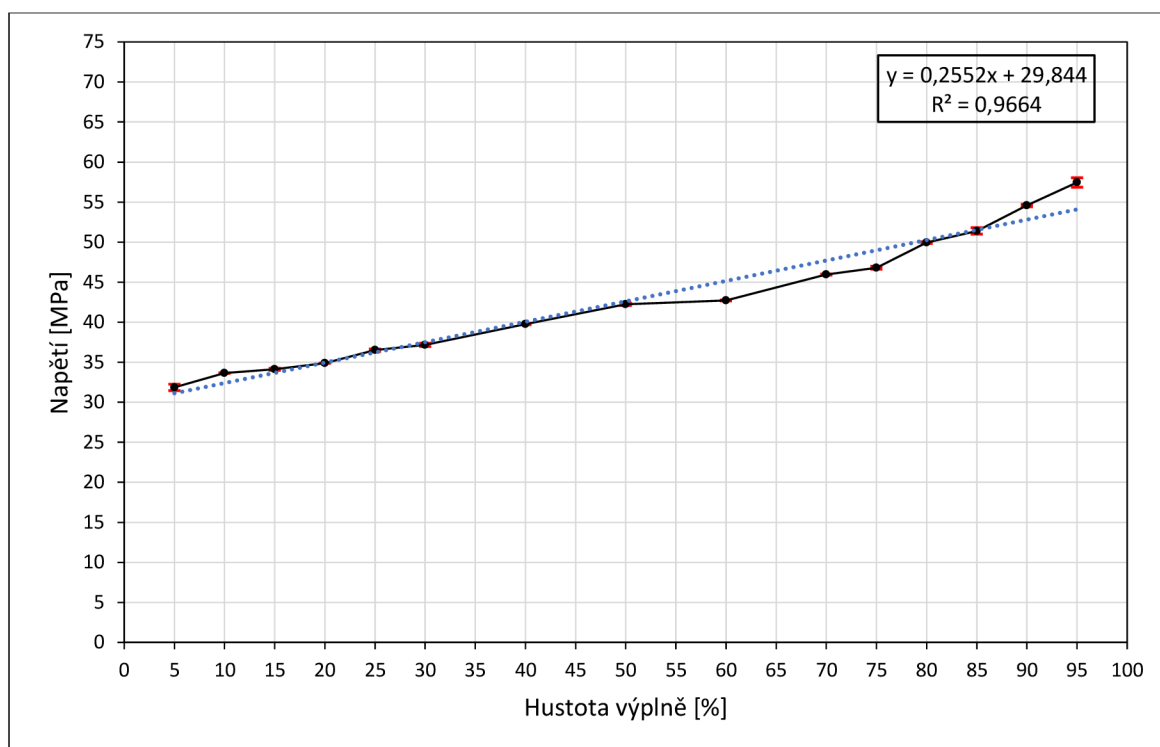
4.1.13. Line

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 39) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 31,86 MPa, Youngův modul pružnosti 1,73 GPa a prodloužení v rozmezí 1,78 % až 2,32 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 57,46 MPa, Youngův modul pružnosti 3,40 GPa a prodloužení v rozmezí 2,31 % až 2,62 %.



Obr. 39 Vzorek s 10% hustotou zaplnění vzoru **Line**

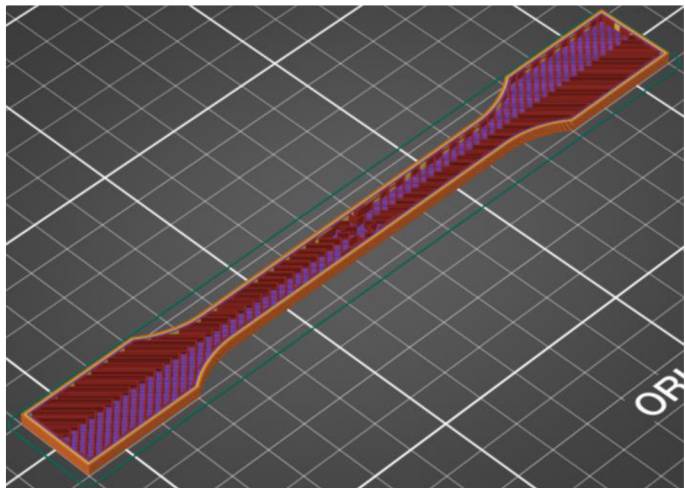
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k lineárnímu nárůstu hodnoty maximálního napětí až do 50 %. Dále nedocházelo k signifikantnímu růstu až po 75 %, a následně pokračoval růst hodnot maximálního napětí (viz Obr. 40). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 40 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **Line**

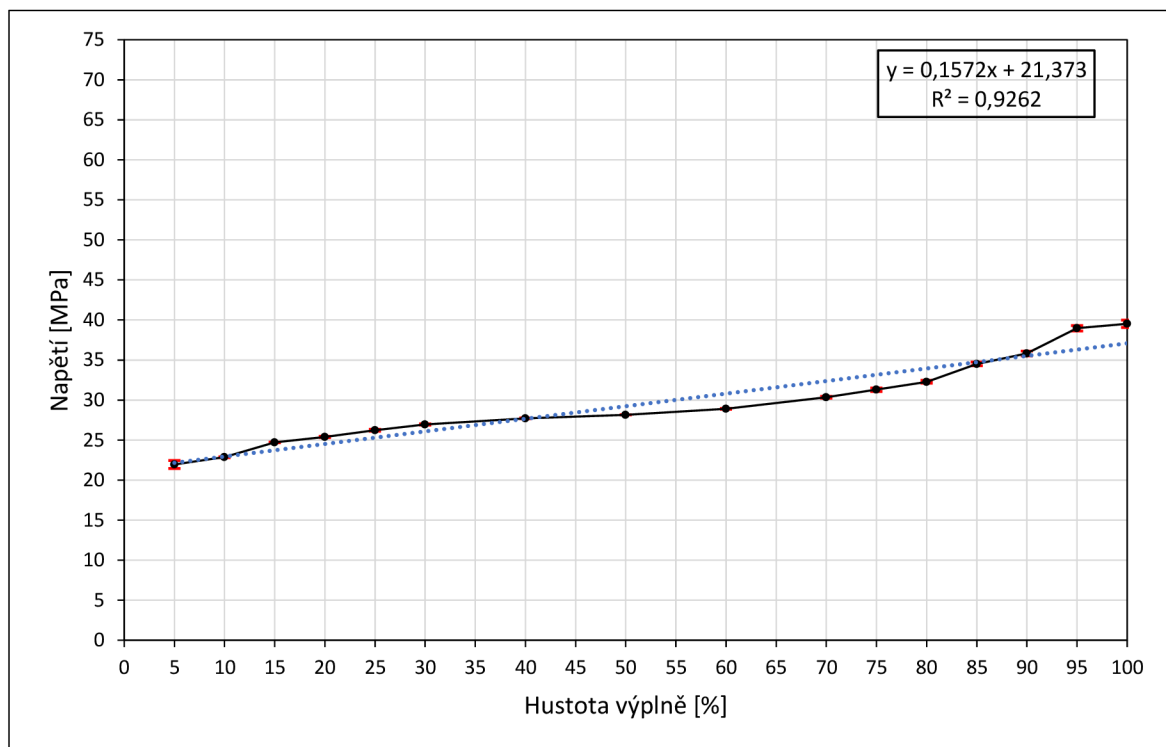
4.1.14. Octagram Spiral

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 41) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 21,95 MPa, Youngův modul pružnosti 1,58 GPa a prodloužení v rozmezí 1,38 % až 2,03 %. U vzorků s 95%, a 100% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 38,96 MPa, a 39,52 MPa, Youngův modul pružnosti 3,09 GPa a 3,28 GPa a prodloužení v rozmezí 1,43 % až 1,49 %, respektive 1,29 % až 1,31 %.



Obr. 41 Vzorek s 25% hustotou zaplnění vzoru *Octagram Spiral*

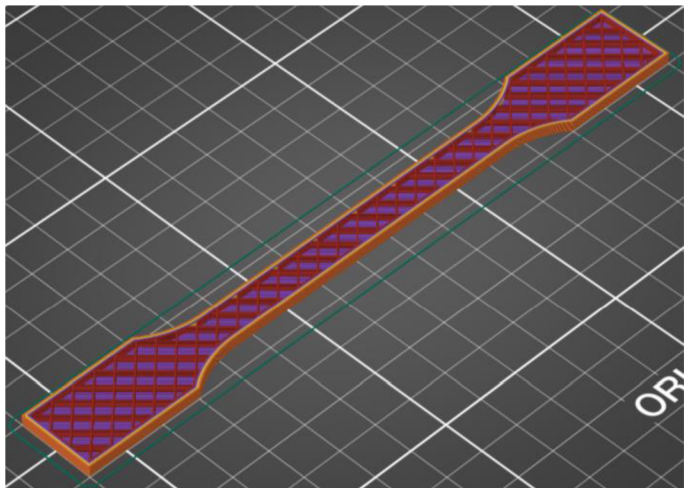
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k nárůstu hodnoty maximálního napětí až do 30 %. Dále nedocházelo k signifikantnímu růstu až po 60 %, a následně pokračoval růst hodnot maximálního napětí, přičemž u 100% zaplnění opět nedošlo k signifikantnímu nárůstu (viz Obr. 42).



Obr. 42 Hodnoty maximálního napětí u vzoru *Octagram Spiral*

4.1.15. Rectilinear

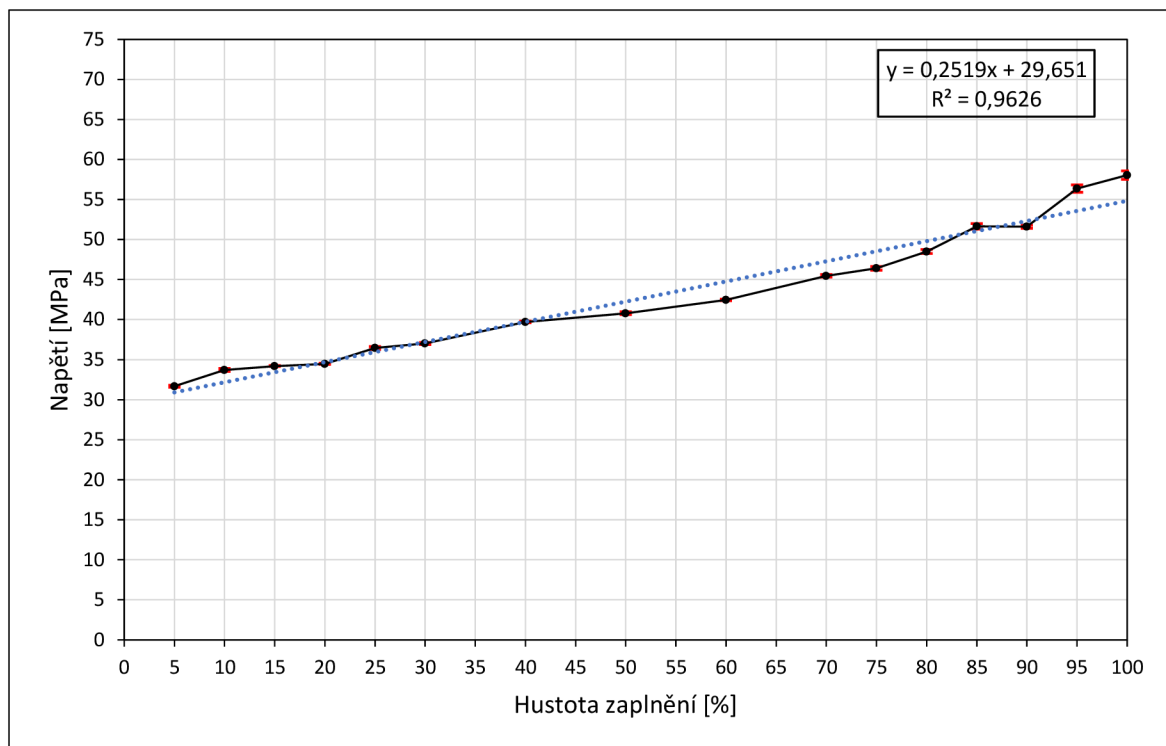
Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 43) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 31,68 MPa, Youngův modul pružnosti 1,61 GPa a prodloužení v rozmezí 1,87 % až 1,93 %. U vzorků s 95%, a 100% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 56,36 MPa, a 58,05 MPa, Youngův modul pružnosti 3,33 GPa



Obr. 43 Vzorek s 10% hustotou zaplnění vzoru **Rectilinear**

a 3,47 GPa a prodloužení v rozmezí 2,69 % až 3,13 %, respektive 2,07 % až 3,50 %.

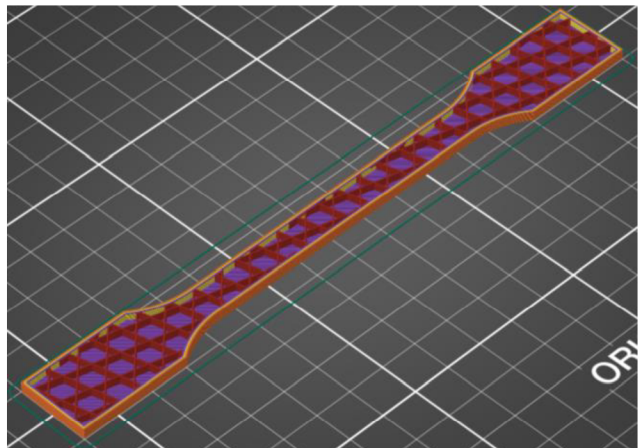
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k téměř lineárnímu nárůstu hodnoty maximálního napětí. Vyšší hodnoty oproti tomuto trendu byly u hustot 10 %, 95 % a 100 % a nižší hodnoty od 50 % do 80% (viz Obr. 44).



Obr. 44 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **Rectilinear**

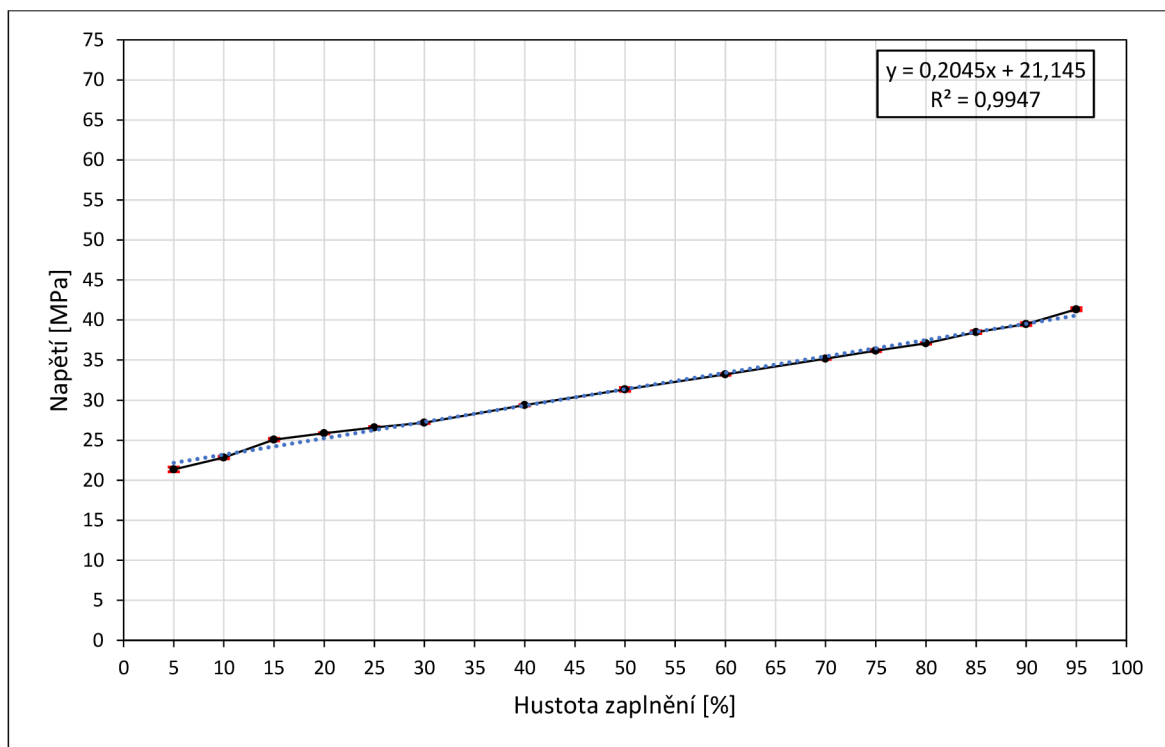
4.1.16. Stars

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 45) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 21,34 MPa, Youngův modul pružnosti 1,52 GPa a prodloužení v rozmezí 1,21 % až 1,48 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 41,35 MPa, Youngův modul pružnosti 3,17 GPa a prodloužení v rozmezí 1,39 % až 1,44 %.



Obr. 45 Vzorek s 20% hustotou zaplnění vzoru *Stars*

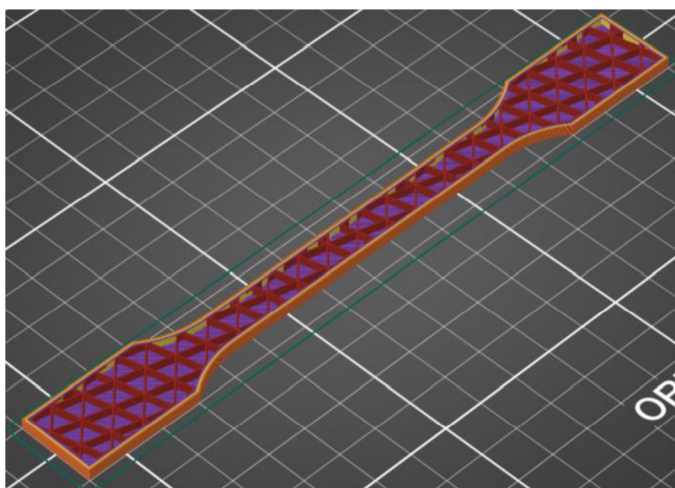
S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k lineárnímu nárůstu hodnoty maximálního napětí. U žádné z hodnot nedošlo k výrazným odchylkám od lineárního trendu (viz Obr. 46). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 46 Hodnoty maximálního napětí u vzoru *Stars*

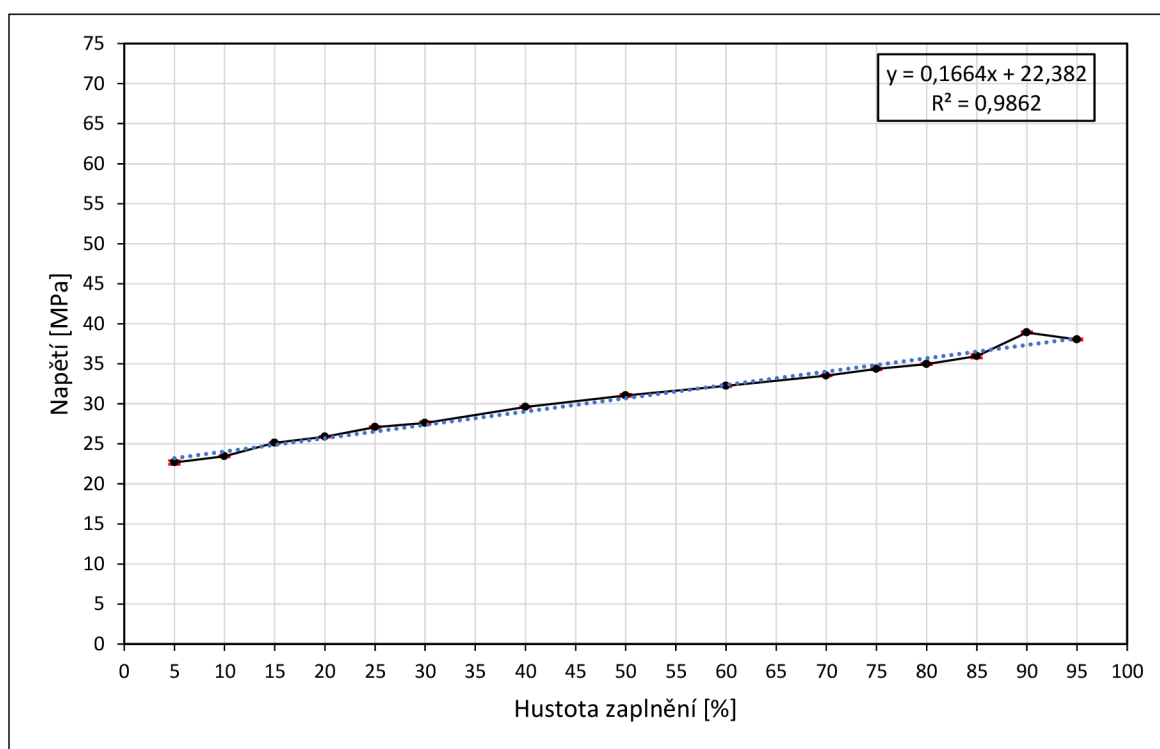
4.1.17. Triangles

Při tahových zkouškách bylo u vzorků (viz Obr. 47) s 5% hustotou zaplnění naměřeno maximální napětí 22,68 MPa, Youngův modul pružnosti 1,62 GPa a prodloužení v rozmezí 1,22 % až 1,44 %. U vzorků s 95% hustotou zaplnění bylo naměřeno maximální napětí 38,04 MPa, Youngův modul pružnosti 3,05 GPa a prodloužení v rozmezí 1,28 % až 1,31 %.



Obr. 47 Vzorek s 20% hustotou zaplnění vzoru **Triangles**

S rostoucí hustotou zaplnění docházelo k téměř lineárnímu nárůstu hodnoty maximálního napětí. Vyšší hodnota oproti tomuto trendu byla pouze u hustoty 90 %. U ostatních hodnot nedošlo k výrazným odchýlkám od trendu (viz Obr. 48). Tento typ výplně neumožňuje 100% zaplnění.



Obr. 48 Hodnoty maximálního napětí u vzoru **Triangles**

4.2. Porovnání jednotlivých vzorů

4.2.1. Maximální napětí

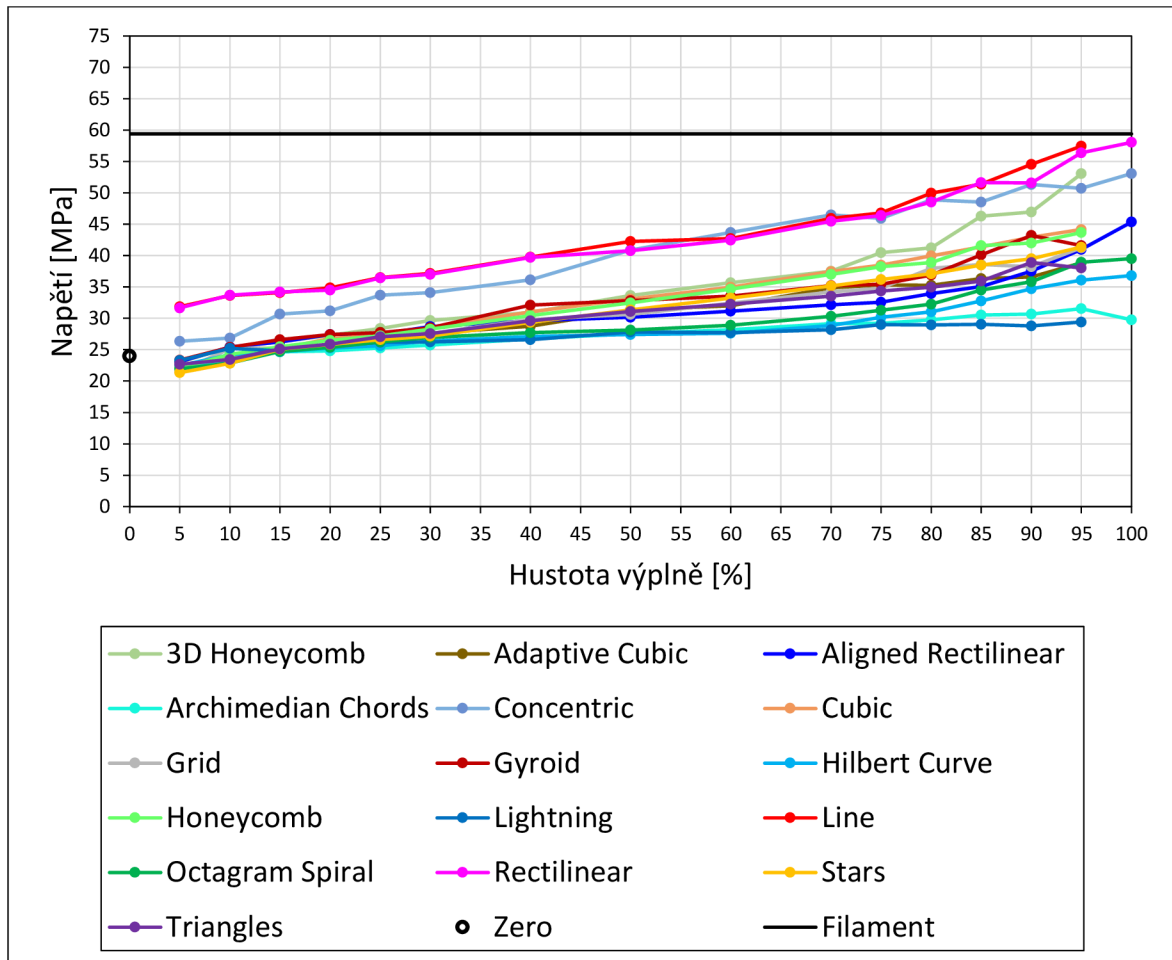
U všech testovaných vzorů výplně docházelo k nárůstu hodnot maximálního napětí. Chování jednotlivých vzorů ale nesledovalo stejný trend, u některých vzorů byl trend téměř lineární, ale u mnohých byl trend složitější. V tabulce 3. jsou uvedeny hodnoty lineárních trendů u jednotlivých vzorů. Zároveň tyto hodnoty narůstaly u jednotlivých vzorů s různou rychlostí, a s rostoucí hustou zaplnění vesměs rostly rozdíly mezi jednotlivými vzory.

Tabulka 3: Hodnoty trendů u jednotlivých vzorů seřazené podle linearity

Vzor	a *den	+ b	R^2
<i>Cubic</i>	0.2332	21.49	0.998
<i>Honeycomb</i>	0.2263	21.54	0.995
<i>Stars</i>	0.2045	21.15	0.995
<i>Concentric</i>	0.2789	25.72	0.988
<i>Triangles</i>	0.1664	22.38	0.986
<i>Adaptive Cubic</i>	0.1697	22.23	0.986
<i>Grid</i>	0.1879	21.98	0.975
<i>Line</i>	0.2552	29.84	0.966
<i>Rectilinear</i>	0.2519	29.65	0.963
<i>Gyroid</i>	0.1914	23.09	0.959
<i>Archimedian Chords</i>	0.0842	22.99	0.957
<i>3D Honeycomb</i>	0.2792	21.09	0.946
<i>Lightning</i>	0.0575	24.25	0.931
<i>Octagram Spiral</i>	0.1572	21.37	0.926
<i>Hilbert Curve</i>	0.1277	22.05	0.913
<i>Aligned Rectilinear</i>	0.167	22.81	0.865

První sloupec a *den označuje směrnici růstu – maximální nárůst maximálního napětí je značen zeleně, minimální červeně. Druhý sloupec + b označuje průsečík s nulovým zaplněním – a tedy jak velký je rozdíl v pevnosti už v konstrukci první a poslední vrstvy – maximální hodnoty jsou modře, minimální červeně. Třetí sloupec R^2 pak udává korelaci proloženého lineárního modelu s daty nárůstu pevnosti. Čím vyšší je korelace, o tím více lineární trend se jedná. Je vidět, že každý vzor se chová poněkud odlišně, ale lze vypořadovat určité klastry vzorů, které se chovají podobně, např. *Cubic* s *Honeycomb*, nebo *Triangles* a *Adaptive Cubic*, či *Line* a *Rectilinear*.

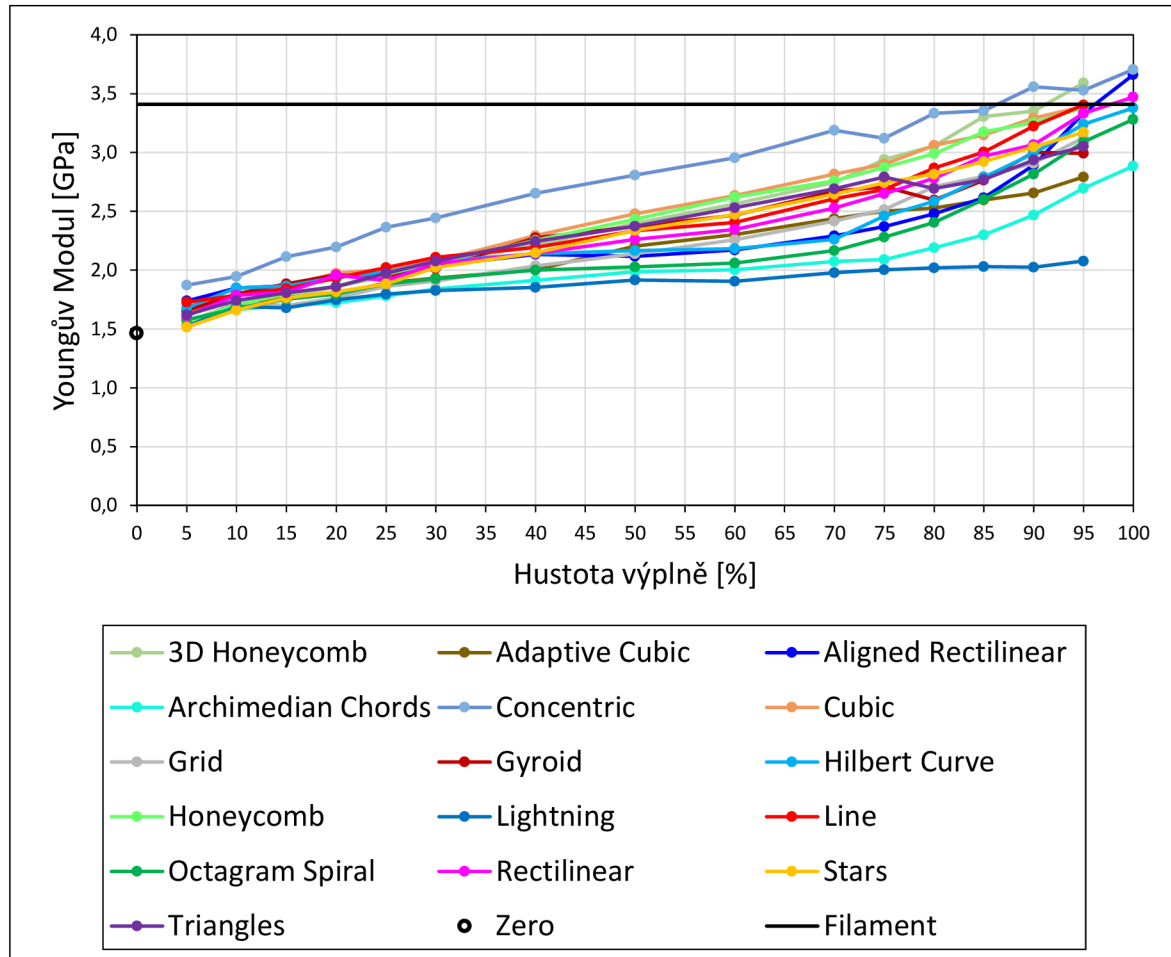
U nejnižší hustoty zaplnění byl rozdíl maximálního napětí mezi nejslabším a nejpevnějším vzorem 49,3 %, zatímco u 95% zaplnění byl rozdíl 95,3 % a u 100% zaplnění byl rozdíl dokonce 97,3 % (viz Obr. 49 a 52).



Obr. 49 Hodnoty maximálního napětí pro všechny testované varianty a samotný filament

4.2.2. Youngův modul

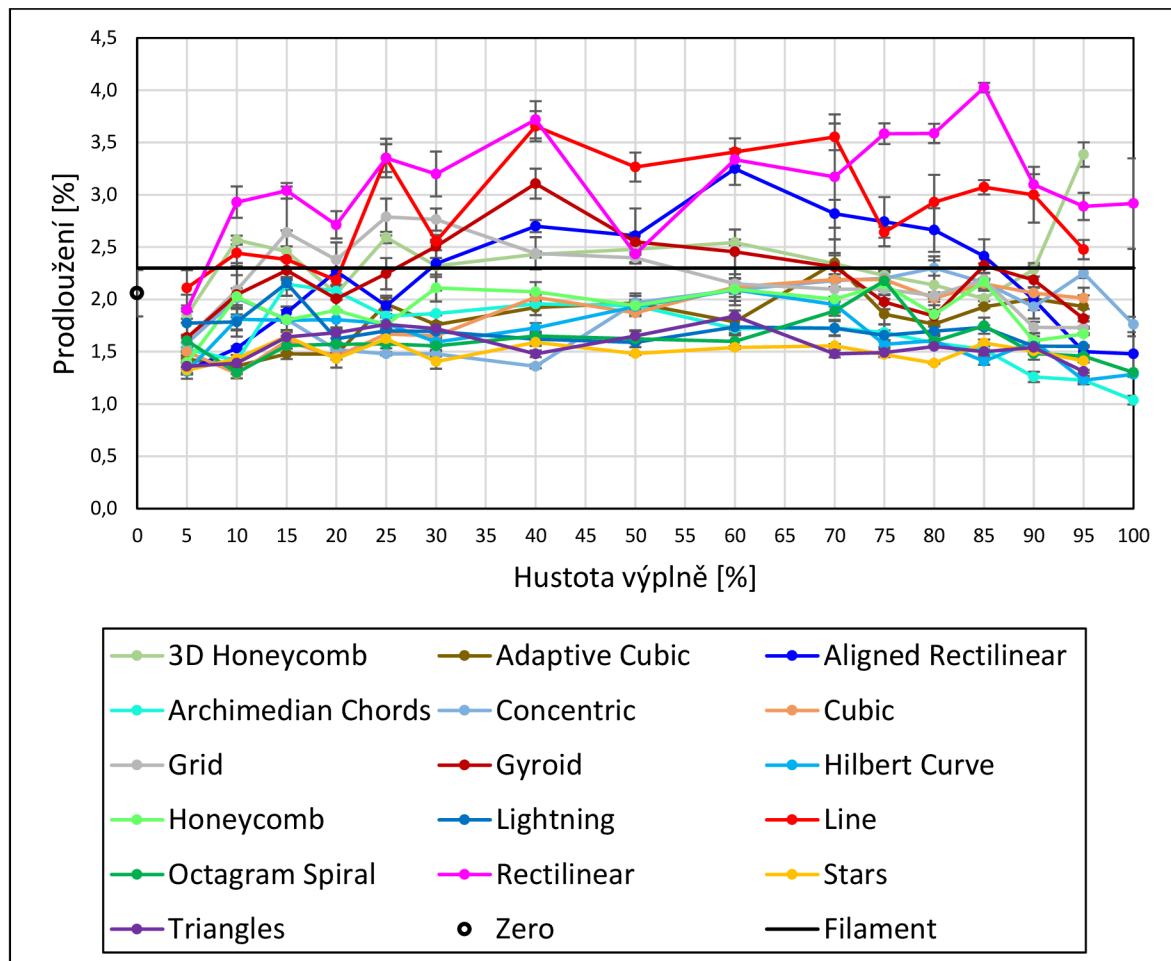
U všech testovaných vzorů výplně docházelo k nárůstu také u Youngova modulu pružnosti. Nejpevnější vzory u 95 % a 100 % zaplnění byly pevnější o 139,4 %, respektive 141,9 % oproti nulové výplni (viz Obr. 50).



Obr. 50 Hodnoty Youngova modulu pro všechny testované varianty a samotný filament

4.2.3. Prodloužení

Oproti těmto veličinám bylo zcela nekonzistentní prodloužení u jednotlivých vzorků. Mnohdy byly značné rozdíly i mezi 3 vzorky se stejnými parametry, a rostoucí hustotou zaplnění nebylo možné u žádného vzoru určit nějaký trend. Ze všech testovaných vzorků se prodloužení pohybovalo v rozmezí od 1,04 % po 4,03 %, přičemž průměrná hodnota je 2,01% (viz Obr. 51).



Obr. 51 Hodnoty prodloužení pro všechny testované varianty a samotný filament

5. Diskuze

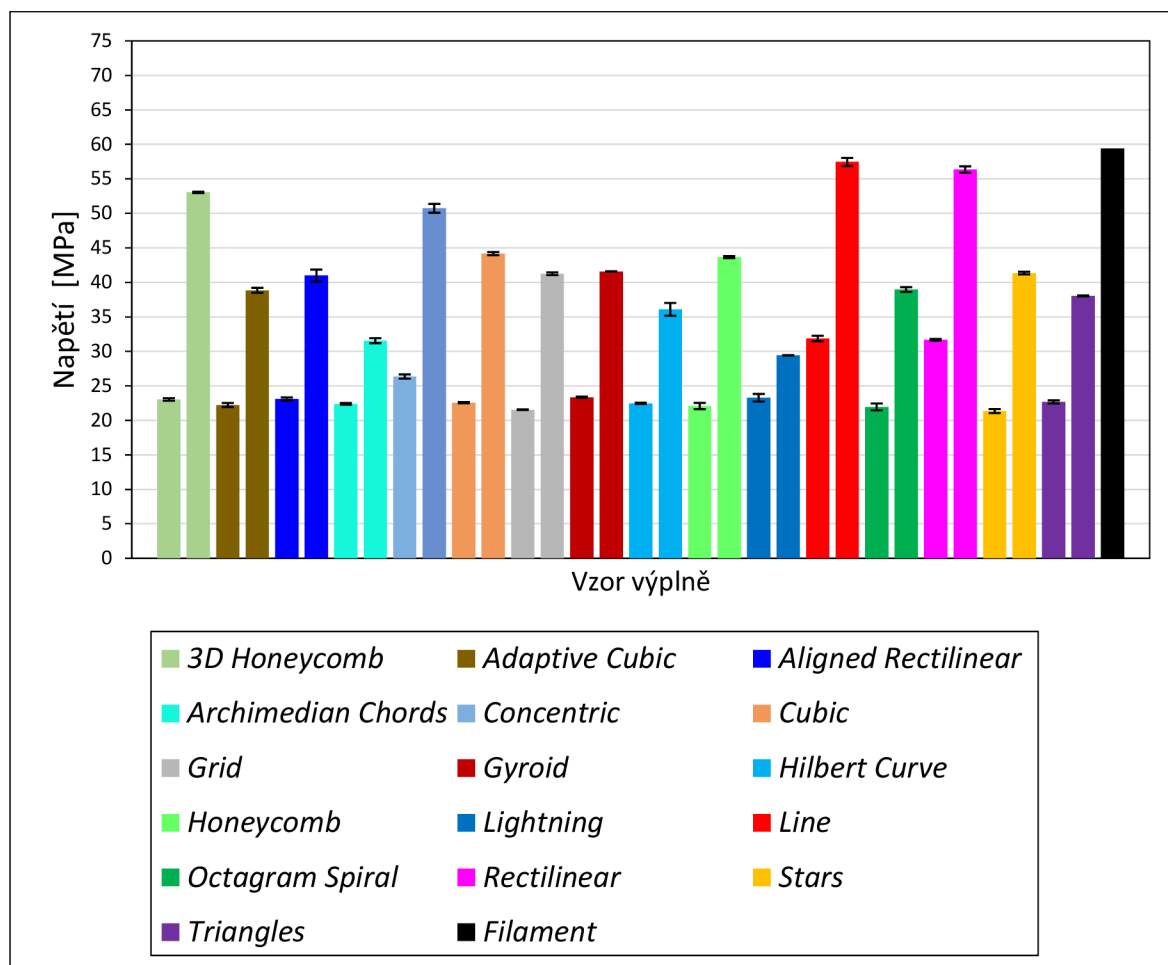
5.1.1. Nejslabší a nejsilnější vzory

Všechny pořadí vzorů u různých hustot zaplnění jsou znázorněny v grafech v příloze, porovnání 5 % a 95 % je znázorněno i v Obr. 52. Skrze různé hustoty zaplnění byly konzistentně v různém pořadí **nejslabší** vzory *Lightning*, *Archimedian Chords*, *Hilbert Curve* a *Octagram Spiral*, přičemž jako zcela **nejslabší** převažovaly vzor ***Lightning*** a ***Archimedian Chords***. Výjimkami byly hustota zaplnění 5 %, u které bylo pořadí *Stars*, *Grid*, *Octagram Spiral* a *Honeycomb*, u 10 % *Stars*, *Octagram Spiral*, *Archimedian Chords* a *Triangles*, u 20 % *Archimedian Chords*, *Adaptive Cubic*, *Hilbert Curve* a *Octagram Spiral* a pak až u 95 % *Lightning*, *Archimedian Chords*, *Hilbert Curve* a *Triangles*. Vzor *Lightning* neumožňuje hustotu zaplnění 100 %, ale zbylé tři prve jmenované vzory ano, a opět byly nejslabší v pořadí *Archimedian Chords*, *Hilbert Curve* a *Octagram Spiral*.

Téměř u všech hustot zaplnění byly konzistentně **nejpevnější** vzory v pořadí ***Line***, ***Rectilinear***, ***Concentric***, přičemž u některých hustot zaplnění došlo k záměně pořadí. Na čtvrtém místě byl u vyšších hustot zaplnění vzor *3D Honeycomb* a u nižších *Gyroid*. Jedinou výjimkou v zastoupení vzorů byla 10% hustota zaplnění, u které bylo pořadí *Rectilinear*, *Line*, *Concentric* a *Aligned Rectilinear*. Vzory *Line*, *3D Honeycomb* a *Gyroid* neumožňují hustotu zaplnění 100 %, a z těch, které ho umožňují bylo výsledné pořadí *Rectilinear*, *Concentric* a *Aligned Rectilinear*.

Nejnižší hodnoty **Youngova modulu** byly u vzorů ***Lightning*** a ***Archimedian Chords***, přičemž u hustot zaplnění 20 % a 25 % bylo jejich pořadí obrácené. Výjimkami bylo 5 %, kde bylo pořadí *Stars* a *Lightning*, a 10 %, kde bylo pořadí *Stars* a *Archimedian Chords*. Na třetím místě se umístily vzor *Grid* u hustot zaplnění 5 % a 15% až 30 %, vzor *Octagram Spiral* u 10 % a 40 % až 80 %, a vzor *Adaptive Cubic* u 85 % až 95 %. U 100 % bylo pořadí vzorů ***Archimedian Chords***, ***Octagram Spiral*** a ***Hilbert Curve***.

Nejvyšší hodnoty **Youngova modulu** byly u vzoru ***Concentric***. Na dalších pozicích se umístily různé vzory, pouze na druhém místě u 20 %, 40 % až 70 % a 80 % se umístil vzor ***Cubic***. U 100 % hustoty zaplnění bylo pořadí vzorů *Concentric*, *Aligned Rectilinear* a *Rectilinear*.



Obr. 52 Maximální hodnoty napětí u jednotlivých vzorů při hustotách zaplnění 5 % a 95 %, a u samotného filamentu

5.1.2. Zohlednění spotřeby materiálu

Při **zohlednění** spotřeby materiálu u jednotlivých variant výplně, a přepočtení hodnot maximálního napětí vůči **hmotnosti** vzorků, jako **nejslabší** vzory při různých hustotách zaplnění převažují *Archimedian Chords* a *Hilbert Curve*, přičemž u hodnot 50%, 60% a 70% hustoty zaplnění je jejich pořadí opačné. Na třetím místě se nejčastěji umístil vzor *Octagram Spiral*. Na čtvrtém místě se do hustoty zaplnění 40 % nejčastěji umístil vzor *Honeycomb*, a od 50 % vzor *Aligned Rectilinear*. Vyjímkami jsou hustoty zaplnění 5 % a 10 %, kde bylo pořadí *Grid*, *Stars*, *Octagram Spiral* a *Honeycomb*, respektive *Octagram Spiral*, *Stars*, *Archimedian Chords* a *Triangles*. Další výjimky na třetím místě byly pouze u hustot zaplnění 85 %, kde se třetí umístil vzor *Aligned Rectilinear*, a 95 %, kde se třetí umístil vzor *Triangles*. Na čtvrtém místě byly déle výjimky u hustot zaplnění 20 %, kde se čtvrtý umístil vzor *Grid*, a poté u 85 % a 95 %, kde se čtvrtý umístil vzor *Octagram Spiral*. U 100% hustoty zaplnění byly pořadí stejné, tedy *Archimedian Chords*, *Hilbert Curve* a *Octagram Spiral*.

Nejpevnější vzory byly při **zohlednění hmotnosti** v různém pořadí skrze jednotlivé

hustoty zaplnění *Line*, *Rectilinear* a *Concentric*. Jedinou výjimkou je zaplnění 10 %, kde se na třetím místě umístil vzor *Lightning*. Na čtvrtém místě se nejčastěji umístil vzor *Adaptive Cubic* a *Gyroid*, přičemž u hustoty zaplnění 5 % a 10 % to byly vzory *Lightning*, respektive *Concentric* a u 80 %, 85 % a 95 % vzor *Cubic*. U 100% hustoty zaplnění byly nejpevnější vzory *Rectilinear*, *Concentric* a *Aligned Rectilinear*

Tabulka 4: Průměrné hodnoty maximálního napětí přepočtené ku hmotnosti u jednotlivých variant výplně [MPa/g]

%	<i>3D Honeycomb</i>	<i>Adaptive Cubic</i>	<i>Aligned Rectilinear</i>	<i>Archimedian Chords</i>	<i>Concentric</i>	<i>Cubic</i>	<i>Grid</i>	<i>Gyroid</i>
0	3,97							
5	3,59	3,52	3,55	3,46	4,01	3,54	3,37	3,66
10	3,78	3,61	3,76	3,47	3,95	3,55	3,76	3,78
15	3,75	3,69	3,75	3,51	4,34	3,63	3,66	3,83
20	3,73	3,65	3,76	3,41	4,27	3,72	3,54	3,85
25	3,74	3,89	3,64	3,34	4,44	3,66	3,72	3,71
30	3,76	3,78	3,68	3,30	4,37	3,69	3,59	3,70
40	3,67	3,72	3,56	3,21	4,35	3,75	3,63	3,90
50	3,72	3,85	3,40	3,11	4,64	3,77	3,50	3,79
60	3,71	3,77	3,33	3,07	4,69	3,77	3,51	3,68
70	3,73	3,93	3,25	3,01	4,70	3,83	3,53	3,68
75	3,87	3,88	3,22	2,94	4,59	3,85	3,48	3,62
80	3,84	3,82	3,26	2,92	4,70	3,89	3,68	3,66
85	4,20	3,85	3,29	2,91	4,63	3,93	3,68	3,91
90	4,17	3,80	3,43	2,86	4,71	3,98	3,56	4,08
95	4,55	3,95	3,66	2,87	4,62	4,01	3,75	3,85
100	---	---	4,03	2,69	4,68	---	---	---
%	<i>Hilbert Curve</i>	<i>Honeycomb</i>	<i>Lightning</i>	<i>Line</i>	<i>Octagram Spiral</i>	<i>Rectilinear</i>	<i>Stars</i>	<i>Triangles</i>
0	3,97							
5	3,52	3,44	3,80	4,90	3,40	4,82	3,38	3,54
10	3,56	3,56	3,95	4,95	3,40	4,90	3,41	3,50
15	3,53	3,54	3,81	4,81	3,53	4,82	3,63	3,63
20	3,46	3,55	3,81	4,73	3,50	4,66	3,59	3,61
25	3,41	3,48	3,83	4,77	3,46	4,78	3,59	3,61
30	3,38	3,48	3,77	4,69	3,45	4,68	3,51	3,55
40	3,25	3,50	3,73	4,67	3,34	4,70	3,57	3,58
50	3,10	3,50	3,77	4,69	3,19	4,53	3,57	3,53
60	3,02	3,56	3,73	4,50	3,15	4,47	3,58	3,48
70	2,97	3,63	3,66	4,60	3,14	4,55	3,61	3,43
75	3,04	3,66	3,78	4,54	3,14	4,51	3,63	3,43
80	3,04	3,67	3,71	4,72	3,16	4,62	3,61	3,40
85	3,13	3,83	3,73	4,75	3,31	4,80	3,68	3,41
90	3,23	3,82	3,68	4,93	3,35	4,69	3,69	3,60
95	3,29	3,91	3,68	5,04	3,55	4,99	3,79	3,46
100	3,32	---	---	---	3,57	5,09	---	---

Tabulka 5: Průměrné hodnoty Youngova modulu přepočtené k hmotnosti
u jednotlivých variant výplně [GPa/g]

%	<i>3D Honeycomb</i>	<i>Adaptive Cubic</i>	<i>Aligned Rectilinear</i>	<i>Archimedian Chords</i>	<i>Concentric</i>	<i>Cubic</i>	<i>Grid</i>	<i>Gyroid</i>
0	0,24							
5	0,24	0,25	0,27	0,24	0,29	0,26	0,24	0,26
10	0,25	0,26	0,27	0,25	0,29	0,27	0,26	0,27
15	0,25	0,26	0,27	0,24	0,30	0,27	0,25	0,27
20	0,25	0,26	0,27	0,24	0,30	0,27	0,24	0,28
25	0,26	0,26	0,26	0,24	0,31	0,27	0,25	0,26
30	0,26	0,26	0,26	0,24	0,31	0,27	0,25	0,26
40	0,26	0,26	0,26	0,23	0,32	0,28	0,25	0,28
50	0,27	0,27	0,24	0,22	0,32	0,28	0,24	0,27
60	0,27	0,27	0,23	0,22	0,32	0,28	0,24	0,27
70	0,27	0,27	0,23	0,21	0,32	0,29	0,25	0,28
75	0,28	0,27	0,23	0,21	0,31	0,29	0,25	0,28
80	0,28	0,27	0,24	0,21	0,32	0,30	0,26	0,26
85	0,30	0,27	0,25	0,22	0,32	0,30	0,27	0,27
90	0,30	0,28	0,26	0,23	0,33	0,31	0,27	0,28
95	0,31	0,28	0,30	0,25	0,32	0,31	0,28	0,28
100	---	---	0,33	0,26	0,33	---	---	---
%	<i>Hilbert Curve</i>	<i>Honeycomb</i>	<i>Lightning</i>	<i>Line</i>	<i>Octagram Spiral</i>	<i>Rectilinear</i>	<i>Stars</i>	<i>Triangles</i>
0	0,24							
5	0,26	0,24	0,25	0,27	0,24	0,25	0,24	0,25
10	0,27	0,25	0,26	0,26	0,25	0,26	0,25	0,26
15	0,27	0,25	0,26	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26
20	0,27	0,25	0,26	0,26	0,25	0,26	0,25	0,26
25	0,26	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,26
30	0,27	0,25	0,26	0,27	0,25	0,26	0,26	0,27
40	0,26	0,26	0,26	0,26	0,24	0,25	0,26	0,27
50	0,24	0,26	0,26	0,26	0,23	0,25	0,27	0,27
60	0,24	0,27	0,26	0,25	0,22	0,25	0,27	0,27
70	0,23	0,27	0,26	0,26	0,22	0,25	0,27	0,28
75	0,25	0,27	0,26	0,26	0,23	0,26	0,28	0,28
80	0,25	0,28	0,26	0,27	0,24	0,26	0,27	0,26
85	0,27	0,29	0,26	0,28	0,25	0,28	0,28	0,26
90	0,28	0,30	0,26	0,29	0,26	0,28	0,28	0,27
95	0,30	0,30	0,26	0,30	0,28	0,29	0,29	0,28
100	0,30	---	---	---	0,30	0,30	---	---

Nejvyšší hodnoty Youngova modulu při zohlednění hmotnosti byly u vzorů *Concentric* a *Cubic*, s výjimkou 5 % a 10 %, kde se na druhém místě umístil vzor *Aligned Rectilinear*, a 15 % a 20 %, kde se na druhém místě umístil vzor *Gyroid*. Na dalších pozicích se u jednotlivých hustot zaplnění umístily různé vzory. U hustoty zaplnění 100 % byly nejvyšší hodnoty Youngova modulu u vzorů *Concentric*, *Aligned Rectilinear* a *Rectilinear*.

Nejnižší hodnoty Youngova modulu při zohlednění hmotnosti byly u vzoru *Archimedian Chords*, a na druhém místě převažoval vzor *Octagram Spiral*. Výjimkou byla hustota zaplnění 5 %, kde se umístily vzory *Stars* a *Grid*. Na druhém místě se pak dále umístily u hustoty zaplnění 10 % vzor *Stars*, u 15 % a 20 % vzor *Grid*, u 85 % vzor *Aligned Rectilinear* a u 90 % a 95 % vzor *Lightning*. Na třetím a čtvrtém místě se umístily různé vzory, pouze v oblasti 50 % až 80 % se umístil třetí vzor *Aligned Rectilinear* a v oblasti 60 % až 80 % se umístil čtvrtý vzor *Hilbert Curve*. U hustoty zaplnění 100 % byly nejnižší hodnoty u vzorů *Archimedian Chords*, *Octagram Spiral* a *Hilbert Curve*.

5.2. Vysvětlení pozorovaných trendů pevnosti vzorů

Obecně měly nejpevnější vzory, *Line* a *Rectilinear*, geometrii lineárních čar s orientací 45°/45°, tedy do kříže, kdy každá druhá vrstva je otočena o 90° oproti předchozí. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma vzory je úhlu, který svírají lineární čáry v rámci vrstvy. U vzoru *Rectilinear*, jsou tyto čáry v rámci každé jedné vrstvy vůči sobě rovnoběžné, zatímco u vzoru *Line* tyto čáry v rámci každé jedné vrstvy svírají ostrý úhel, připomínající pomyslné kmitání.

Podobnou geometrii jako vzor *Rectilinear* má i vzor *Grid*, u toho se ovšem nejedná o přímky, které jsou k sobě každou druhou vrstvu kolmé, ale čtvercovou síť, která je v každé vrstvě identická s tou předchozí. Díky tomu u tohoto vzoru nedochází k jakémusi "nůžkovému efektu", který umožňuje právě geometrie vzorů *Line* a *Rectilinear*, kdy při tahové zátěži pravděpodobně dochází k mírnému natáčení lineárních čar ve snaze zarovnat ve směru působící síly. Jelikož ale vzor *Grid* nemá prostor k takovému pohybu, nedosahuje tento vzor tak vysokých mechanických parametrů.

Zcela odlišným, ale také velmi pevným vzorem je *Concentric*. Geometrie tohoto vzoru kopíruje několikrát vnější stěnu dílu až do samotného středu. Rozestupy mezi těmito "kopiemi" závisí na zvolené hustotě tak, že s rostoucí hustotou klesají. Pravděpodobně zde dochází k podobnému efektu, kdy tyto kopie vytváří křivky, které se při tahové zátěži snaží narovnat ve směru působící síly. Zásadním problémem tohoto vzoru je, že výrazně závisí na vnějším tvaru dílu, lze se tedy domnívat, že právě tvar oboustranné lopatky testovacího modelu má vhodný tvar pro popsání efekt. Pakliže-by ovšem daný díl neobsahoval žádné oblé tvary ve

směru působící síly, kupříkladu krychle, nemusel by tento vzor dosahovat takových pevností v tahu.

Nejslabší vzor, *Archimedian Chords* má geometrii spojitě spirály, která začíná ve středu dílu a pokračuje směrem ke stěnám dílu, s tím, že pakliže stěny dílu v nějakém místě spirálu protknou, PrusaSlicer dopočítá pokračování spirály, i když již nebude spojitá (viz. Tabulka 1). Tento vzor opět výrazně závisí na tvaru dílu, a v případě oboustranné lopatky je tedy znevýhodněn, jelikož výsledná spirála není vůbec spojitá, a spíše tvoří nelineární křivky, které jsou ovšem orientovány kolmo ke směru působící síly při tahovém zatížení. Ve výsledku tyto křivky nepřispívají významně k pevnosti dílu, což potvrzuje i pouze mírný nárůst maximálního napětí s rostoucí hustotou zaplnění.

U dalšího slabého vzoru *Lightning* závisí, zohledníme-li hmotnost dílu. Bez zohlednění není výsledek překvapivý, jelikož se jedná o nespojitou výplň připomínající blesky nebo větve. Zohledníme-li ovšem hmotnost, patří tento vzor k pevnějším vzorům, ovšem pouze po hustotu zaplnění 60 %. S narůstající hustotou totiž roste spotřeba materiálu rychleji než samotná pevnost tohoto vzoru.

Posledními velmi slabými vzory jsou *Hilbert Curve* a *Octagram Spiral*, které mají oba poměrně komplikované geometrie s množstvím hran, které jsou při tahové zkoušce více namáhány než jiné části, a zároveň tyto vzory opět výrazně závisí na tvaru dílu.

V případě oboustranné lopatky je u vzoru *Octagram Spiral* výsledná geometrie nespojitá, a tvoří křivky orientované kolmo ke směru působící síly podobně jako vzor *Archimedian Chords*, ovšem s tím rozdílem, že tyto křivky jsou lineární a připomínají písmeno „V“. Každé rameno této křivky je tedy méně odkloněno od směru působící síly. Než u vzoru *Archimedian Chords*, což zpevňuje tento vzor.

V případě vzoru *Hilbert Curve* je u oboustranné lopatky geometrie sice částečně spojitá, ale obsahuje velmi vysoké množství hran, kde se lineární části křivky potkávají pod úhlem 90°, a tedy v těchto místech může snadno docházet k selhání.

6. ZÁVĚR

Na základě provedených tahových zkoušek bylo prokázáno, že parametry, vzor výplně a hustota zaplnění mají výrazný vliv na pevnost FDM tištěných dílů z PLA. Při nižších hustotách zaplnění byly mezi jednotlivými vzory menší rozdíly, a s rostoucí hustotou rostly jak hodnoty maximálního napětí a Youngova modulu, tak rozdíly mezi jednotlivými vzory. Hustota zaplnění tedy ovlivňuje jednotlivé vzory různě, a tedy nelze používat data vlivu hustoty zaplnění na pevnost při použití jednoho vzoru jako obecně platná pro všechny FDM díly, bez zohlednění použitého vzoru. Zároveň nebylo možné určit vliv parametrů výplně na tažnost, jelikož hodnoty prodloužení u jednotlivých vzorků byly spíše náhodné a nebyl u nich pozorován jakýkoli trend.

Testování v tahu je pouze jedním z mnoha možných mechanických testů, a je tedy potřeba dalšího výzkumu, kde budou použity i jiné metody testování, např. třibodový ohyb a kompresní testování. Dále je zde mnoho dalších parametrů, které mohou mít vliv na mechanické vlastnosti FDM dílů, včetně barvy, materiálu a výrobce filamentu, tiskových teplot, počet obvodových stěn apod., které nebyly testovány, a tedy se jedná o další možné oblasti výzkumu.

7. SUMMARY

Based on the tensile tests, it was proven that infill parameters, infill type and infill density do play a major role in the mechanical strength of FDM parts printed from PLA filament. The differences were less significant at lower values of infill density. Increasing infill density increases the differences between each infill type as well as the values of maximum stress and Young's modulus increases. Therefore, it is being concluded that infill density does affect each infill pattern differently, and as such, the data from testing the effect of infill density, while using only one or few infill types can not be viewed as generally valid for other infill types. At the same time, it was impossible to determine the influence of infill patterns on the ductility of tested specimen, since all the elongation values were rather random, and no trend was observed.

Tensile testing is only one of many possible mechanical tests, and therefore there is the need of more research using other testing methods, such as three-point bending flexural test or compression test. Furthermore, there are many parameters that could affect the mechanical properties of FDM parts, including the color, material and manufacturer of filament, printing temperatures, number of perimeter walls and many others, which were not tested, and are therefore other possible areas for further research.

8. ZDROJE LITERATURY

1. Haines, J. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? *All3DP*
<https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>,
Navštívěno 28. 2. 2024
2. Gottwald, J. F. Liquid metal recorder.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/025283635/publication/US3596285A?q=pn%3DUS3596285A>, Číslo patentu: US3596285A
3. Kodama, H. Stereoscopic Figure Drawing Device.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/012797030/publication/JPS56144478A?q=pn%3DJPS56144478A>, Číslo patentu: JPS56144478A.
4. Brown, C. O., Breinan, E. M. & Kear, B. H. Method for fabricating articles by sequential layer deposition.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/022213611/publication/US4323756A?q=pn%3DUS4323756A>, Číslo patentu: US4323756A
5. Hull, C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/024561940/publication/US4575330A?q=pn%3DUS4575330A>, Číslo patentu: US4575330A
6. Masters, W. E. Computer automated manufacturing process and system.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/024513743/publication/US4665492A?q=pn%3DUS4665492A>, Číslo patentu: US4665492A
7. Crump, S. S. Apparatus and method for creating three-dimensional objects.
<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/023701397/publication/US5121329A?q=pn%3DUS5121329A>, Číslo patentu: US5121329A
8. Syrlybayev, D. *et al.* Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review. *Polymers* **13**, 1587 (2021).
9. Wu, P., Wang, J. & Wang, X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction* **68**, 21–31 (2016).
10. Jones, R. *et al.* RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica* **29**, 177–191 (2011).
11. Amanullah, A. N. M., Murshiduzzaman, Saleh T. & Khan, R. Design and Development of a Hybrid Machine Combining Rapid Prototyping and CNC Milling Operation. *Procedia Engineering* **184**, 163–170 (2017).
12. Oskui, S. M. *et al.* Assessing and Reducing the Toxicity of 3D-Printed Parts. *Environmental Science & Technology Letters*. **3**, 1–6 (2016).
13. Min, K. *et al.* 3D Printing-Induced Fine Particle and Volatile Organic Compound Emission: An Emerging Health Risk. *Environmental Science & Technology Letters*. **8**, 616–625 (2021).
14. Original Prusa MMU3 upgrade kit (pro MK3.9/4) *Prusa3D by Josef Prusa*
<https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-mmu3-upgrade-kit-pro-mk3-9-4/>.
Navštívěno 28. 2. 2024

15. 3D tiskárna Original Prusa XL *Prusa3D by Josef Prusa*
<https://www.prusa3d.com/cs/produkt/3d-tiskarna-original-prusa-xl/#features>.
Navštíveno 28. 2. 2024
16. Bambu Lab X1 Series | Desktop 3D Printer *Bambu Lab*. <https://bambulab.com/en-eu/x1>. Navštíveno 28. 2. 2024
17. Gao, G., Xu, F., Xu, J., Tang, G. & Liu, Z. A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines* **13**, 553 (2022).
18. Samykano, M. *et al.* Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **102**, 2779–2796 (2019).
19. Prusa Tabulka Materiálů | Prusa Knowledge Base. <https://help.prusa3d.com/materials>.
Navštíveno 3. 1. 2024
20. Hodzic, D., Pandžić, A., Hajro, I. & Tasić, P. Strength Comparison of FDM 3D Printed PLA Made by Different Manufacturers. *TEM Journal* **9**, 966–970 (2020).
21. Yu, W., Shi, J., Qiu, R. & Lei, W. Degradation Behavior of 3D-Printed Residue of Astragalus Particle/Poly(Lactic Acid) Biocomposites under Soil Conditions. *Polymers* **15**, 1477 (2023).
22. Tomczyk, K., Raczkiwicz, A. & Paśnikowska-Lukaszuk, M. Analysis of the Quality of Printed PLA Samples Using Various 3D Printers and Print Preparation Programs. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska* **13**, 43–46 (2023).
23. Zgryza, Ł., Raczyńska, A. & Paśnikowska-Lukaszuk, M. Thermovisual Measurements of 3D Printing of ABS and PLA Filament. *Advances in Science and Technology Research Journal* **12**, 266–271 (2018).
24. Turner, S. R. & Liu, Y. 5.14 - Chemistry and Technology of Step-Growth Polyesters. in *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (eds. Matyjaszewski, K. & Möller, M.) 311–331 (Elsevier, Amsterdam, Nizozemsko, 2012, ISBN 978-0-08-087862-1).
25. Janssens, V. Plastics - the Facts 2022. *Plastics Europe* https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2022/10/PE-PLASTICS-THE-FACTS_V7-Tue_19-10-1.pdf,
Navštíveno 30. 1. 2024
26. Polypropylene global market volume 2015-2030. *Statista*
<https://www.statista.com/statistics/1245169/polypropylene-market-volume-worldwide/>,
Navštíveno 1. 2. 2024
27. McKeen, L. W. 9 - Polyolefins, Polyvinyls, and Acrylics. in *Permeability Properties of Plastics and Elastomers (Fourth Edition)* 157–207 (William Andrew Publishing, 2017, ISBN 9780323508599).
28. Al-Shawabkeh, A. Optoelectronic investigation and spectroscopic characteristics of polyamide-66 polymer. *e-Polymers* **22**, 858–869 (2022).
29. Turku, I., Kasala, S. & Kärki, T. Characterization of Polystyrene Wastes as Potential Extruded Feedstock Filament for 3D Printing. *Recycling* **3**, 57 (2018).
30. Sastri, V. R. 8 - Other Polymers: Styrenics, Silicones, Thermoplastic Elastomers, Biopolymers, and Thermosets. in *Plastics in Medical Devices (Third Edition)* (ed. Sastri, V. R.) 287–342 (William Andrew Publishing, 2022, ISBN 9780323851268).

31. Materials - Sustainability - LEGO.com. <https://www.lego.com/ms-my/sustainability/product-safety/materials>, Navštíveno 30. 1. 2024
32. ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) | PPFA. <https://www.ppfa.com/page/abs>, Navštíveno 30. 1. 2024
33. Stříteský, O. Prusament ASA je tady. Jak a co tisknout s nástupcem ABS? *3D tiskárny Original Prusa* https://blog.prusa3d.com/cs/prusament-asa-je-tady-jak-a-co-tisknout-s-nastupcem-abs_30636/, Navštíveno 1. 2. 2024
34. Yoganathan, R., Mammucari, R. & Foster, N. A Green Method for Processing Polymers using Dense Gas Technology. *Materials* **3**, (2010).
35. Al-Hakami, Y. M. N., Abdul Wahab, M., Yildirim, E. & Ates, F. Thermal degradation kinetics, thermodynamics and pyrolysis behaviour of polycarbonate by TGA and Py-GC/MS. *Journal of the Energy Institute* **113**, 101499 (2024).
36. Xing, J. *et al.* Morphology and Properties of Polylactic Acid Composites with Butenediol Vinyl Alcohol Copolymer Formed by Melt Blending. *Molecules* **28**, 3627 (2023).
37. Struna Verbatim BVOH 1,75 mm – Přírodní | Verbatim Online Shop. *Verbatim - Technology you can trust* <https://www.verbatim-europe.cz/cz/prod/verbatim-bvoh-filament-175-mm--transparent-55903/>, Navštíveno 3. 1. 2024
38. Velásquez, E. *et al.* Repetitive mechanical recycling of post-consumer high impact polystyrene from yogurt cups: A pilot-scale performance assessment at different reprocessing cycles. *Resources, Conservation and Recycling* **202**, 107368 (2024).
39. HIPS | Prusa Knowledge Base. https://help.prusa3d.com/article/hips_167118, Navštíveno 1. 2. 2024
40. Bruère, V. M., Lion, A., Holtmannspötter, J. & Jöhlich, M. The influence of printing parameters on the mechanical properties of 3D printed TPU-based elastomers. *Prog Addit Manuf* **8**, 693–701 (2023).
41. Gao, J., Li, B., Hengchang, B., Li, X. & Zhan, X. Effect of infill density and reinforced perimeters on tensile properties and fracture mechanism of 3D printing carbon fiber–reinforced composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **128**, 1–15 (2023).
42. Pandžić, A., Hodžić, D. & Kadrić, E. Experimental Investigation on Influence of Infill Density on Tensile Mechanical Properties of Different FDM 3D Printed Materials. *TEM Journal* 1195–1201 (2021) doi:10.18421/TEM103-25.
43. Racz, L. & Dulescu, M. Numerical Investigation of the Infill Rate upon Mechanical Properties of 3D-Printed Materials. *Polymers* **14**, 2022 (2022).
44. VietnameseGerman University, Vietnam. Investigation on Influence of Infill Pattern and Layer Thickness on Mechanical Strength of PLA Material in 3D Printing Technology. *Journal of Engineering and Science Research* **3**, 27–37 (2019).
45. UltiMaker Cura: Powerful, easy-to-use 3D printing software. <https://ultimaker.com> <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>, Navštíveno 24. 3. 2024
46. Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S. & Conejero, A. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing* **3**, 183–192 (2016).

47. Akhoundi, B. & Behraves, A. H. Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. *Experimental Mechanics* **59**, 883–897 (2019).
48. ISO 527-2:2012 *Iteh Standarts*
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/56046/c5c3ec20cc0741289bf6def861e0a40b/ISO-527-2-2012.pdf>, Navštíveno: 24. 11. 2024
49. granieure, ISO 527-2 Model 1A. *Thingiverse*
<https://www.thingiverse.com/thing:2842050>, Navštíveno 24. 11. 2024
50. Gordelier, T., Thies, P., Turner, L. & Johannig, L. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. *Rapid Prototyping Journal* (2019).
51. Pandžić, A., Hodzic, D. & Milovanović, A. Influence of Material Colour on Mechanical Properties of PLA Material in FDM Technology. (DAAM International, Vídeň, Rakousko, 2019, ISBN 978-3-902734-xx-x)
52. PLA Bílá (1,75 mm, 2 kg) | Tiskové struny. *Filament PM* <https://www.filament-pm.cz/pla-bila-1-75-mm-2-kg/p149>, Navštíveno 24. 11. 2024
53. Álvarez, K., Lagos, R. F. & Aizpun, M. Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ingeniería e Investigación* **36**, 110–116 (2016).
54. Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software. *blender*
<https://www.blender.org/>, Navštíveno 24. 11. 2024
55. PrusaSlicer | Original Prusa 3D printers directly from Josef Prusa. *Prusa3D by Josef Prusa* https://www.prusa3d.com/page/prusaslicer_424/, Navštíveno 12. 3. 2024
56. Infill patterns | Prusa Knowledge Base. https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130, Navštíveno 29. 11. 2024

9. PŘÍLOHY

Obsahuje grafy průběhů tahových zkoušek u jednotlivých vzorů a nulové výplně, a grafy srovnávající rozdíly mezi hodnotami maximálního napětí jednotlivých vzorů při různých hustotách výplně.