

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Metodika testování tištěných 3D struktur

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Radek SPURNÝ**
Osobní číslo: **E18B0137P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Metodika testování tištěných 3D struktur**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte možnosti 3D tisku materiálů ABS, PLA, PET a dalších.
2. Vytvořte metodiku testování výsledných tvarů z hlediska pevnosti, vnitřní struktury a množství použitého materiálu.
3. Připravte standardizovanou skupinu testů a experimentálně otestujte vybrané materiály.
4. Statisticky vyhodnoťte data získaná z měření.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Josef Průša: Základy 3D tisku (online).
2. Daniel Farbman, Chris D. McCoy: Materials Testing of 3D Printed ABS and PLA Samples to Guide Mechanical Design.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Pavel Karban, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská se zabývá možnostmi tisku materiálů pro 3D tiskárny. V dané problematice byly analyzovány metody tisku na tiskárně FFF/FDM. V práci jsou dále popsány základní materiály pro tyto tiskárny a jejich doporučené teploty. Práce následně zkoumá pevnost materiálů ABS-T, PC Blend, PLA a PET-G a vliv změny vzoru a hustoty různých výplní. V práci jsou popsány i mechanické zkoušky kterými se vyhodnocují jednotlivé vlastnosti materiálů, při čemž hlavním nástrojem byla zvolena zkouška v tahu.

Klíčová slova

3D Tisk, Technologie 3D tisku, FDM/FFF, SLA, SLS, PLA, ABS, ABS-T, ASA, PET-G, PC Blend, TPE, TPU, BVOH, PVA, 3D výplně, Mechanické zkoušky, Tahové zkoušky, Ohybové zkoušky, Zkoušky tvrdosti, Rázové zkoušky

Abstract

The bachelor theses presents options of printing materials for 3D printers. In given problematic, printing with FFF/FDM type of printers were analysed. As next are described primary materials for these types of printers and their recommended temperatures. This study examines the strength of ABS-T, PC Blend, PLA and PET-G and the influence of alternation on their pattern and density of infills. In bachelor theses are described multiple mechanical tests, which evaluates individual properties of materials, whereas the main tool was selected tension test.

Key words

3D Printing, Technology of 3D printing, FDM/FFF, SLA, SLS, PLA, ABS, ABS-T, ASA, PET-G, PC Blend, TPE, TPU, BVOH, PVA, 3D infills, Mechanical tests, Tensile testing, Three-point flexural tests, Indentation hardness, Impact tests

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.



.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2021

Radek Spurný

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavlovi Karbanovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a že to se mnou nevzdal. Dále patří velké díky Ing. Petru Kadlecovi Ph.D. za poskytnutí věcných rad a pomoci při praktické části. Velké díky také patří Petru Staškovi za poskytnutí 3D tiskárny.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1. TECHNOLOGIE 3D TISKU	12
1.1. FDM/FFF.....	12
1.2. SLA.....	13
1.3. SLS	13
1.4. Použité tiskárny	13
2. MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V TECHNOLOGII 3D TISKU	15
2.1. PLA	15
2.2. ABS	15
2.3. ASA	15
2.4. PET-G.....	15
2.5. PC Blend	16
2.6. TPE a TPU	16
2.7. Kompozitní materiály	16
2.8. Vodou rozpustné (BVOH/PVA).....	16
3. NÁVRH TESTOVACÍCH SAD VZORKŮ	17
3.1. Tvar a rozměry vzorků	17
3.2. Druhy výplní	18
3.2.1. 3D pláštěv	20
3.2.2. Gyroid	20
3.2.3. Přímocharý	20
3.2.4. Čára.....	21
3.2.5. Kubická	21
3.2.6. Kubická adaptivní	22
3.2.7. Kubická podepíratelná.....	22
3.2.8. Mřížka.....	22
3.2.9. Trojúhelníky	23

3.2.10.	Plástev	23
3.2.11.	Hilbertova křivka	23
4.	TESTOVÁNÍ VZORKŮ	24
4.1.	Metody testování	24
4.1.1.	Tahová zkouška	24
4.1.2.	Ohybová zkouška	26
4.1.3.	Zkouška tvrdosti	27
4.1.4.	Rázová zkouška - Charpyho kladivo	28
4.2.	Postup měření.....	29
4.3.	Hodnoty získané měřením	30
4.3.1.	Optimalizační měření	30
4.3.2.	ABS-T	30
4.3.3.	PC Blend	34
4.3.4.	PET-G	35
4.3.5.	PLA.....	37
4.4.	Srovnání materiálů	38
ZÁVĚR.....	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	41
SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	43
Obrázky	43
Grafy.....	43
Tabulky.....	44

Seznam symbolů a zkratk

FFF	Fused filament fabrication
FDM	Fused deposition modeling
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective laser sintering
PLA	Polylactic acid
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-styren-akryl
PET-G	Polyethyléntereftalát
PC Blend	Polykarbonát
TPE	Termoplastický elastomer
TPU	Termoplastický polyuretan
BVOH	Butenediol vinylalkoholový kopolymer
PVA	Polyvinylalkohol
F_b	Síla při přetržení vzorku [N]
ε, A_b	Poměrné prodloužení [%]
F_{max}	Maximální naměřená síla [N]
σ_m, R_m	Mez pevnosti v tahu [MPa]
S_0	Plocha v místě přetržení vzorku [mm ²]
N	Newton, jednotka síly
F	Působící síla [N]
L_0	Počáteční měřená délka zkušebního tělesa [mm]
ΔL_0	Zvětšení počáteční délky zkušebního tělesa [mm]
σ_y	Napětí na mezi kluzu [MPa]
σ_b	Napětí při přetržení [MPa]
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
M_{OMAX}	Maximální ohybový moment [N]
W_0	Průřezový modul ohybu jednoduché plochy hranolu [mm ³]
σ_{fm}	Mez pevnosti v ohybu [MPa]
HR	Hardness Rockwell - tvrdost podle Rockwella [-]
HB	Hardness Brinell - tvrdost podle Brinella [-]
a_{cU}	Rázová houževnatost [kJ/m ²]
δ_{Rm}	Směrodatná odchylka meze pevnosti [MPa]
δ_{Fmax}	Směrodatná odchylka maximální síly [N]

Úvod

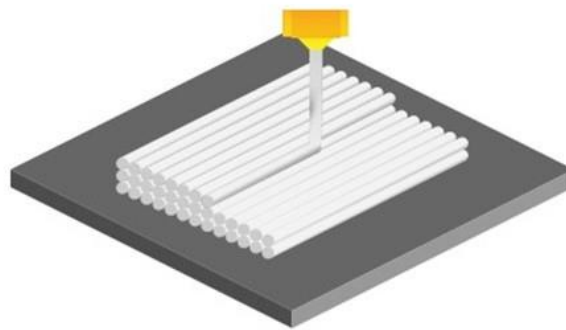
Předkládaná práce se zaměřuje na technologii 3D tisku která se stále více dostává mezi širší veřejnost. Úkolem této práce je shrnout dostupné metody 3D tisku a využívaných materiálů pro 3D tisk. V další části prozkoumat způsoby mechanického testování materiálů a navrhnout sadu testů pro otestování vytištěných vzorků s různými výplněmi. Následně porovnat výsledky a vyhodnotit z hlediska pevnosti nejvhodnější materiál.

1. Technologie 3D tisku

Možnosti 3D tisknutelných objektů se každým dnem rozrůstají. Ať už je to od umělých funkčních orgánů a nebo po 3D domy ve kterých se dá bydlet, v následujících kapitolách jsou popsány technologie, které jsou nejrozšířenějšími a na kterých 3D tisk vystavěl své základy.

1.1.FDM/FFF

Aditivní technologie FFF (fused filament fabrication) je v podstatě synonymem FDM (fused deposition modeling), jenž je registrovanou známkou firmy Stratasys. Jedná se o takřka nejrozšířenější a nejdostupnější technologii, která je vhodná pro poměrně rychlý tisk funkčních dílů. Jako tiskový materiál je využíván filament o typickém průměru 1,75 mm, který je vytlačovaný tiskovou hlavou skrze rozehřátou trysku. V současné době je poměrně rozmanitá škála dostupných filamentů z různých materiálů o velkém rozsahu barevných provedení. Nevýhodou této metody 3D tisku je menší přesnost. Na modelech jsou patrné tiskové vrstvy pohybující se běžně v rozsahu od 0,05 mm do 0,3 mm. Obecně platí, že čím vyšší je výška tiskové vrstvy, tím je tisk rychlejší za cenu menší přesnosti. Přibližná cena tiskárny Prusa i3 MK3, která je jistým kompromisem mezi cenou a kvalitou, se pohybuje okolo 20 000 Kč. [1]



Obrázek 1 Tisk jednotlivých vrstev technologií FDM /FFF [1]

1.2.SLA

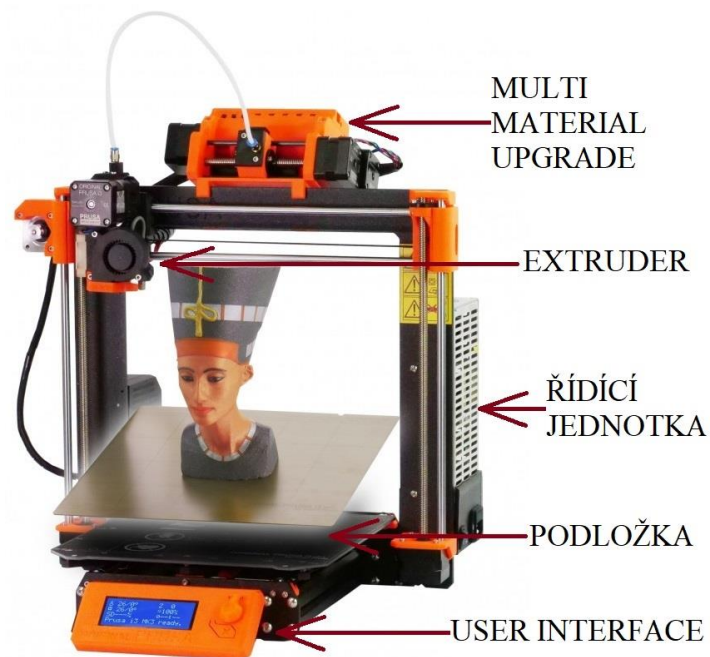
Stereolitografická technologie SLA je odlišná od technologie FDM/FFF tím, že je založena na principu vytvrzování světlocitlivé pryskyřice pomocí světla, proto se zde tedy nevyskytuje žádná tisková struna. SLA tiskárna obsahuje podložku, která se po každém vytvrzení fotopolymeru na požadovaných místech posune nahoru. Při zrychleném pohledu tyto tiskárny vytváří dojem tažení modely z tekutého fotopolymeru. Tato technologie je detailnější a vhodnější pro malé složitější modely, tisk ovšem trvá déle. Mezi výhody oproti technologii FDM/FFF patří téměř hladce vytištěný model s minimální zřetelností tiskových vrstev. Tisková pryskyřice je toxická, proto je zapotřebí vyvarovat se jejímu kontaktu s lidskou pokožkou a minimalizovat dýchání výparů během tisku. Po vytištění je ve většině případech model potřeba očistit v isopropylalkoholu, neboť je značně znečištěný nevytvrzenou pryskyřicí a na dotek působí lepkavě. [1]

1.3.SLS

Technologie SLS (Selective Laser Sintering) funguje na principu laserového sintrování - spékání jemného prášku na požadovaném místě v nanesené vrstvě. Výtisk je dokončen tehdy, kdy je až po poslední vrstvu zasypán v okolním nevytvrzeném prášku. Tato metoda je využívána především v průmyslu. Cena takovýchto tiskáren začíná přibližně na 150 000 Kč, což tyto tiskárny také zatím činí nedostupnými pro běžné uživatele. [1]

1.4.Použité tiskárny

Pro potřeby této práce byly použity tiskárny technologie FDM/FFF pro jejich dostupnost, Prusa i3 MK3S MMU2S a Prusa i3 MK2S, která je starším modelem první zmiňované. Obě tiskárny jsou založeny na pohybu v kartézském souřadnicovém systému po 3 osách. Podložka na kterou se model tiskne, se pohybuje v ose Y zatímco tisková hlava vytlačující materiál (extruder) se pohybuje po ose X a Z. [1]



Obrázek 2 Original Prusa i3 Mk3S MMU2S [7]

Jednou z nejdůležitějších částí tiskárny bývá Extruder. Samotná tisková hlava se u tohoto modelu skládá z chladiče který slouží k odvádění tepla šířícího se přes Heat Break, což je tenká trubička, která odděluje filament v jeho pevné podobě od roztaveného pomocí topného tělesa. Do topného tělesa je vsazena vyměnitelná tryska kterou je možno ovlivnit dobu i kvalitu tisku.

2. Materiály používané v technologii 3D tisku

S pokrokem technologií přicházejí i nové materiály, které posouvají možnosti 3D tisku. V této kapitole jsou představeny základní a nejdostupnější materiály, které se používají pro tisk samotných modelů a jejich podpor.

2.1.PLA

PLA (polylactic acid - kyselina polyléččná) je termoplastický křehký polyester, který je vyráběný z kukuřičného či bramborového škrobu a je biologicky odbouratelným materiálem, který je jedním z nejpoužívanějších při 3D tisku. Je rozpustný v hydroxidu sodném. Díky jeho nízkým tiskovým teplotám a nepatrnému sklonu ke kroucení je velmi snadno tisknutelný, je také doporučený jako materiál pro začátečníky. Velkou nevýhodou tohoto materiálu je jeho tendence pohlcovat vzdušnou vlhkost, což značně zvyšuje nároky na jeho skladování. Vytisknutý model je pevný, tvrdý a má dobře propojené vrstvy, začíná však měknout již při 60 °C. [2]

Materiál není příliš pružný, při kritickém mechanickém namáhání na ohyb výtisky praskají. [3]

2.2.ABS

ABS (akrylonitrilbutadienstyren) řadí se mezi křehké termopolymery, je odolný vůči mechanickému poškození, tuhý, houževnatý a snáší nízké i vysoké teploty. Je zdravotně nezávadný, jedná se ovšem o ropný produkt a zahříváním při tisku uniká škodlivý zápach. [2]

Rozdílem oproti jiným materiálům je možnost tento materiál vyhladit či lepit pomocí acetonu. Tisk ABS je poměrně obtížný, vyžaduje vyšší teploty a má horší přilnavost k podložce. Jednou z nevýhod je také UV nestabilita a inklinace k tvorbám efektu sloní nohy - vytlačení materiálu do stran. [3]

2.3.ASA

ASA (akrylonitril-styren-akrylát) je považován za nástupce materiálu ABS. Je UV stabilní a nebezpečný zápach je mnohem slabší. Ostatní parametry jsou velmi obdobné jako u ABS. Nevýhodou jsou ale ještě vyšší tiskové teploty, je doporučeno mít tiskárnu v boxu. [3]

2.4.PET-G

Materiál PET (polyethylentereftalát), termoplast, který je známý pro své použití v textilním průmyslu, ve výrobě jednorázových nádob a obalů na potraviny nebo pro výrobu lahví. Přiřazené písmeno "G" představuje modifikovaný glykol, který výrazně zlepšuje výsledné

vlastnosti tohoto materiálu. Příkladem zlepšení vlastností oproti čistému PET je například zvýšená odolnost vůči nárazu. Na rozdíl od jiných materiálů je použitelný ve velkém teplotním rozsahu a je odolný vůči rozpouštědlům a kyselinám. PET-G kombinuje mechanické vlastnosti materiálu ABS a snadnost tisku PLA, pro různé výrobce je však potřeba úpravy tiskové teploty. [2]

2.5.PC Blend

Polykarbonátový amorfní termoplast je ve srovnání s ostatními materiály vysoce teplotně odolný. Díky jeho dobrým mechanickým vlastnostem je zcela vhodný pro mechanicky namáhané díly, vyniká také dobrými izolačními vlastnostmi. Mezi nevýhody patří především jeho vysoké tiskové teploty a výrazně vyšší cena, což značně omezuje jeho použití. [3]

2.6.TPE a TPU

TPE (thermoplastic elastomer) a TPU (thermoplastic polyurethane) jsou druhy flexibilních filamentů, které se vyznačují vysokou ohebností, houževnatostí a chemickou odolností. Tohle vše je ovšem za cenu velmi nízké rychlosti tisku, vysoké teploty tisku, obtížného tisku převisů a do vzduchu, tzv. přemostění, a v neposlední řadě vyšší cenové relaci. [4]

2.7.Kompozitní materiály

Kompozitními materiály označujeme obvyklé materiály (PLA, PET, ABS) do kterých je přidán jemný dřevěný nebo kovový prášek díky čemuž získávají různý vzhled a vlastnosti. Především se využívají jako kosmetický doplněk, jelikož přidávaný prášek snižuje mechanickou odolnost a spojitost vrstev. Problém výtisků z kompozitního materiálu nastává při tisku, kde je nutno použít tvrzenou trysku s větším průměrem a vyšší výšku vrstvy aby se předešlo jejímu ucpání. Ceny kompozitních materiálů jsou jedny z nejvyšších. [5]

2.8.Vodou rozpustné (BVOH/PVA)

BVOH (butenediol vinyl alcohol copolymer) a PVA (polyvinyl alcohol) jsou speciálními druhy materiálů, které se dají rozpustit ve vodě jsou především využívány pro tisk nestandardních podpěr. Materiály je nutno skladovat ve velmi suchém prostředí aby se zamezilo vstřebání vlhkosti a je zapotřebí je tisknout na multimateriální tiskárně nebo tiskárně s dvojitým extrudérem/tryskou. Nevýhodou je opět vysoká cena a velká náchylnost k ucpávání trysky. [6]

3. Návrh testovacích sad vzorků

V prvé řadě bylo nutné navrhnout model měřeného vzorku. Toho bylo docíleno pomocí programu SolidWorks 2016, model byl uložen ve formátu STL. Po návržení byla upravena výplň modelu pro individuální vzorky v programu PrusaSlicer ver. 2.3.1., ve kterém se zvolil přednastavený profil materiálu od výrobce, který v sobě obsahuje nastavení teplot tiskárny. Dalším krokem bylo jednotlivé modely s nastavením převést do formátu G-kódu, který tiskárna přijme. Měřený vzorek byl navržen s výškou vrstvy 0,1 mm jako kompromis mezi kvalitou tisku a jeho rychlostí.

Jedno z nastavení určující výslednou výplň vzorku nese název Perimetr. Toto nastavení je de facto počet obvodových stěn modelu, v základním nastavení je hodnota jednoho perimetru přednastavena na 0,45 mm. Pokud je nastavena vnitřní výplň například na 20 % se vzorem mřížka a perimetry jsou nastaveny na 2, zjednodušeně by to znamenalo, že vnější stěny modelu by byly silné 2·0,45 mm a za stěnami uvnitř by byla výplň ve tvaru mřížky. Realita by byla o něco jiná, protože PrusaSlicer zajistí překrytí perimetrů mezi sebou, aby nedocházelo ke vzniku prázdného místa, jelikož tryska vytlačí 1 vrstvu perimetru v průřezu ve tvaru oválu. [9]

V *Tabulka 1* jsou vypsány doporučené hodnoty teplot extruderu a podložky pro jednotlivé materiály spolu s cenou za 1 kg filamentu které zhruba odpovídá 330 metrům.

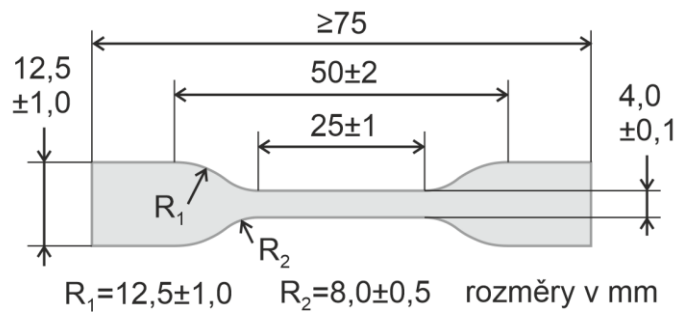
Tabulka 1 Teploty tisku

Materiál	PC Blend	ABS-T	PET-G	PLA
Teplota extruderu [°C]	275	250	250	215
Teplota podložky [°C]	115	110	90	60
Cena za 1 kg [CZK]	1 399	599	699	599

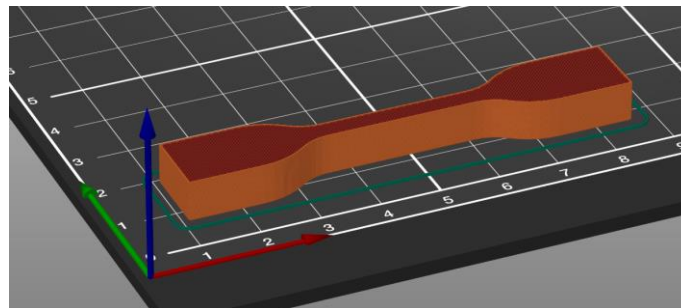
3.1. Tvar a rozměry vzorků

Počáteční tvar vzorku pro tahovou zkoušku byl zvolen z normy ČSN EN ISO 527-2, tisknut na podložku ve směru osy Z (modrá), jak lze vidět na *Obrázek 4*. Zkušební těleso má na koncích rozšířené plochy ve tvaru pádel, které se upínají do čelistí trhacího zařízení. Uprostřed vzorku zúžené místo, které je určeno k tomu, aby v něm vzorek praskl. V zájmu úspory materiálu bylo provedeno optimalizační měření, kde kromě druhů výplní byly zkoušeny i různé výšky vzorků. Z těchto vzorků vyšel nejvíce vyhovující vzorek s výškou 7 mm, s ohledem na rozdíly maximálních sil v tahu. Optimalizační měření dále prokázalo, že nastavení perimetrů bude hrát velkou roli co se týče tahové zkoušky jelikož jsou to právě vnější perimetry, které mají nemalý podíl na pevnosti vzorku.

Zkušební tělísko 5A dle ČSN EN ISO 527-2



Obrázek 3 Rozměry zkušebního vzorku [8]



Obrázek 4 Měřený vzorek ve sliceru

3.2. Druhy výplní

Před samotným testováním bylo provedeno optimalizační měření zkouškou v tahu, které vzniklo za účelem zjistit 4 nejpevnější druhy výplní a ty následně otestovat při různé hustotě. Výplně byly zvoleny předdefinované programem PrusaSlicer, nastaveny na 50 % hustotu, materiálem bylo PLA. Při optimalizačním měření byl perimetr nastaven na hodnotu 3. Ve zjednodušeném pojetí to znamená při šířce vzorku 4 mm v místě přetržení, že by šířky stěn (6 perimetrů vzorku) měly tloušťku 2,7 mm, tudíž na vnitřní výplň zbývalo pouhých 1,3 mm. Toto nastavení silně ovlivnilo měření, jelikož majoritní podíl pevnosti v tahu měly právě perimetry po obvodu měřeného vzorku a ne požadovaná vnitřní výplň, proto byla hodnota perimetrů pro hlavní měření upravena na 1 (tloušťka stěn dohromady rovna 0,9 mm).

Tabulka 2 Druhy výplní použité v optimalizačním měření

Označení vzorku	F_b [N]	A_b [%]	F_{max} [N]	R_m [MPa]	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]
3D plástev	1838,79	3,54	1845,47	57,67	8	4	32
Gyroid	1478,74	4,60	1615,31	50,48	8	4	32
Přímočará	1469,82	3,72	1580,93	49,40	8	4	32
Čára	1466,32	4,20	1555,14	48,60	8	4	32
Kubická	1434,17	4,08	1510,25	47,20	8	4	32
Kubická adaptivní	1291,86	4,58	1501,02	46,91	8	4	32
Mřížka	1372,73	4,40	1463,45	45,73	8	4	32
Trojúhelníky	1416,34	3,79	1457,09	45,53	8	4	32
Kubická podepíratelná	1158,16	4,29	1451,36	45,35	8	4	32
Plástev	1380,37	3,45	1429,71	44,68	8	4	32
Hilbertova křivka	1391,51	3,31	1405,52	43,92	8	4	32

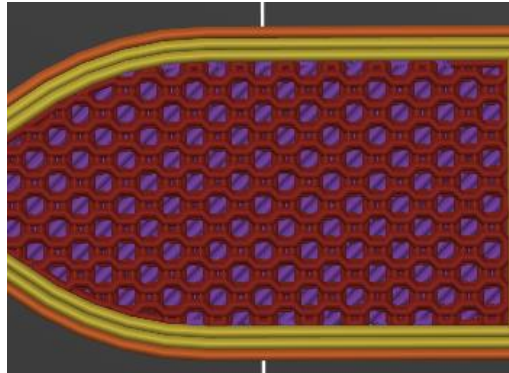
Tabulka 3 Použití materiálu a rychlost tisku při optimalizačním měření (vzorek 5A, hustota 50 %)

Vzory	Použito filamentu [m]	Rychlost tisku [min]
3D plástev	2,67	63
Gyroid	1,64	54
Přímočará	1,67	43
Čára	1,68	43
Kubická	1,65	47
Kubická adaptivní	1,52	42
Mřížka	1,63	43
Trojúhelníky	1,67	49
Kubická podepíratelná	1,50	41
Plástev	1,75	66
Hilbertova křivka	1,67	59

3.2.1. 3D plástev

3D plástev je upravenou variantu jednoduché plástve. Vzor je vytvořen přechodem z menšího čtverce na větší osmiúhelník zpět v menší čtverec, tato kombinace vytvoří sloupec pravidelně měnící svůj průměr. Nevýhoda spočívá ve spotřebě materiálu a dlouhou dobou tisku. [10]

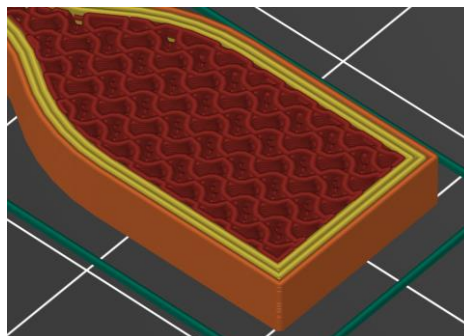
3D plástev se i přes své vynikající výsledky v optimalizačním měření nedostala do užšího výběru, protože po změně perimetru na hodnotu 1 docházelo k vadám tisku.



Obrázek 5 Postupné vrstvení vzoru 3D plástve, hustota 50 %

3.2.2. Gyroid

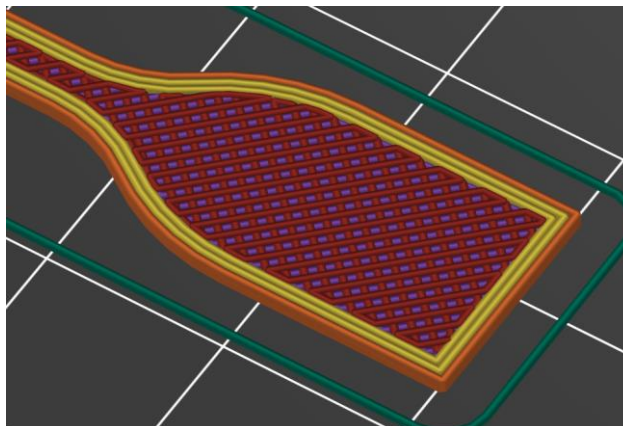
Gyroid je brán jako jedna z nejpevnějších výplní díky tisku ve všech třech rozměrech. K jeho vytisknutí je potřeba obecně méně materiálu jelikože jeho formát připomíná vlny, které hromadí na sobě. [11]



Obrázek 6 Vzor gyroid, hustota 50 %

3.2.3. Přímočarý

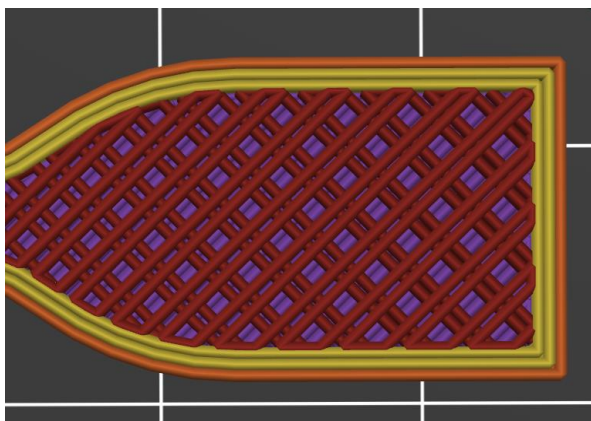
Přímočarý vzor je jedním ze základních druhů výplně. Tisk neupraveného přímočarého vzoru začíná šikmým vytištěním první vrstvy rovnoběžných pruhů na spodní plnou, druhá vrstva pruhů je vůči první pootočená o 90 ° a třetí opět ve směru první vrstvy. Jedná se o jeden z neúspěšnějších a nejrychlejších tisknutelných vzorů. Pokud se nastaví hustota výplně na 100 % tak se jedná o vzor, kterým bude model vyplněn. [10]



Obrázek 7 Přimočarý vzor, hustota 70%

3.2.4. Čára

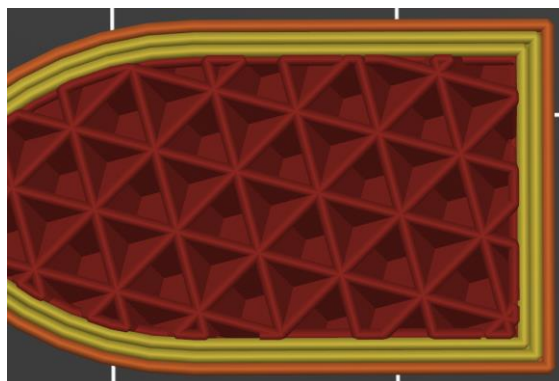
Vzor čára je velmi podobný přimočarému vzoru, jak hodnotami pevnosti, tak spotřebou materiálu. Rozdílem je vzor, kde vytisknuté pruhy nejsou vůči vedlejšímu pruhu rovnoběžné nýbrž svírají ostrý úhel. Díky podobnosti s přimočarým vzorem byl zvolen vzor s vyššími hodnotami.



Obrázek 8 Vzor čára, hustota 50 %

3.2.5. Kubická

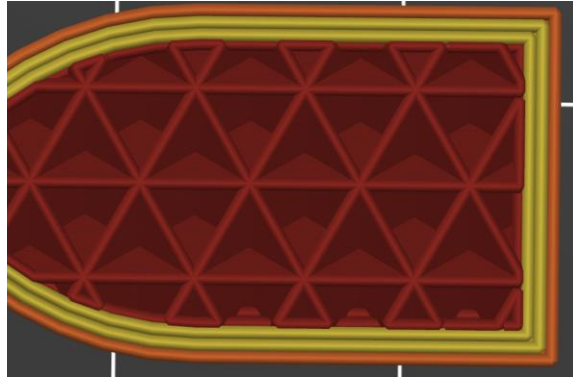
Kubická výplň vytváří uvnitř modelů uzavřené krychle stojící na špičce. Díky tomu je dostatečně pevná ale za cenu větší spotřeby materiálu. [20]



Obrázek 9 Kubický vzor, hustota 50 %

3.2.6. Kubická adaptivní

Adaptivní verze kubického vzoru je založena na úspoře materiálu a času tím, že tiskne u okrajů menší verzi kubické a směrem doprostřed vzorku je zvětšuje. Tento vzor by měl mít jeden z nejlepších poměrů váha/pevnost ovšem díky malému testovacímu vzorku je pro naše účely nevhodný.



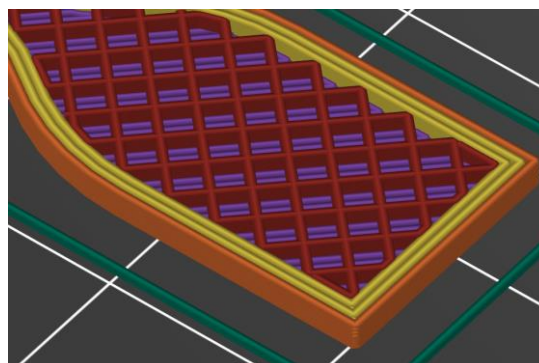
Obrázek 10 Vzor kubický adaptivní, hustota 50 %

3.2.7. Kubická podepíratelná

U této varianty se kubická výplň aplikuje stejně jako u kubické adaptivní, ovšem místo ke stěnám objektu se menší kostky vytvářejí v ose Z, tzn. na spodní straně a směrem k vrchní straně výtisku.

3.2.8. Mřížka

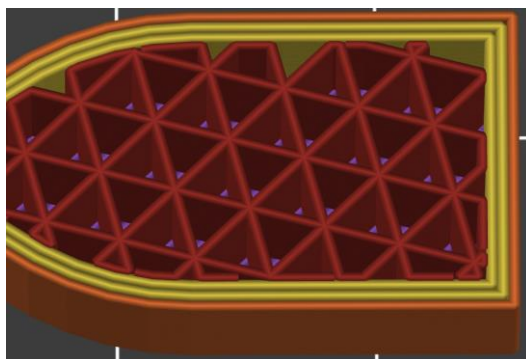
Další z jednoduchých výplní je mřížka. Od přímočaré výplně se liší tím, že následující vrstvu tiskne přímo ve stopě předešlé, tudíž každá vrstva vytváří čtvercovou mříž. Nevýhodou je, že v místě překřížení dochází k hromadění materiálu v jednom místě, to může způsobit při tisku další vrstvy vadu tisku. [10]



Obrázek 11 Vzor mřížka, hustota 50 %

3.2.9. Trojúhelníky

Trojúhelníkový vzor je v podstatě stejný jako vzor mřížka akorát nevytváří čtvercovou mříž ale trojúhelníky.

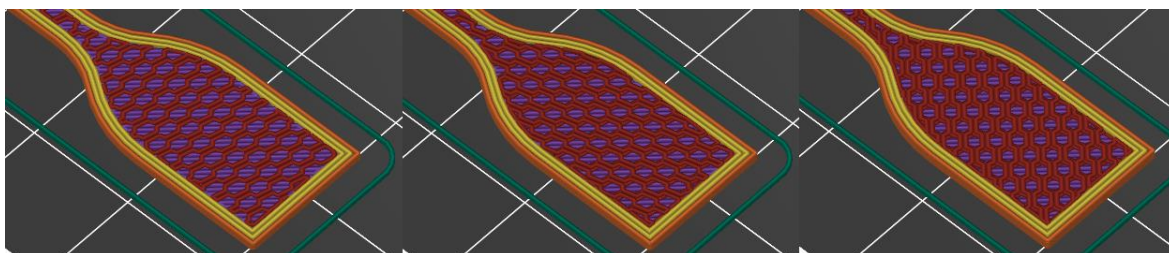


Obrázek 12 Trojúhelníkový vzor, hustota 50 %

3.2.10. Plástev

Už z názvu napovídající plástev se tiskne ve tvaru hexagonů. Její silnou předností je pevnost díky a jednoduchost tisku za cenu času a spotřeby materiálu. [11]

Tisk probíhá tak, že v jedné vrstvě je vytvořen šestiúhelník za pomoci dvou cest. Tyto cesty se v následující vrstvě pootočí o 120° a to se opakuje po zbytek tisku.

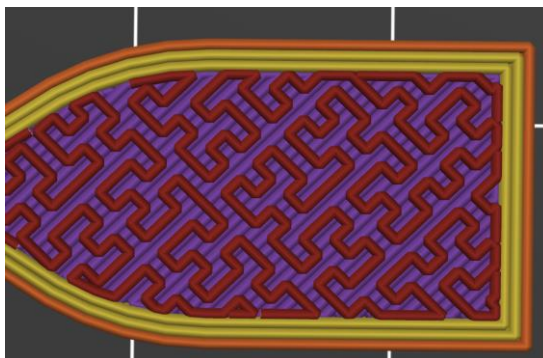


Obrázek 13 Postupné vrstvení vzoru plásteve, hustota 50 %

3.2.11. Hilbertova křivka

Vzor Hilbertovy křivky je vystavěn na křivce vyplňující fraktálovou plochu, popsanou německým matematikem Davidem Hilbertem v roce 1891. [12]

Tento vzor se spíše používá pro svou podobu než aby přinášel mechanické výhody. Hlavní nevýhodou tohoto vzoru je dlouhá doba tisku.



Obrázek 14 Vzor Hilbertova křivka, hustota 50 %

4. Testování vzorků

Do hlavního testování byli vybrány 3 vzory výplní, u kterých byla naměřena nejvyšší hodnota maximální síly v tahu. Tyto vzorky byly porovnávány proti vzorkům s plnou výplní pro poukázání na změnu parametrů mezi plnou a různými druhy výplní. Mezi testované materiály patří PC Blend, PET-G, PLA a ABS-T, který je oproti čistému ABS tvrdší i pevnější. Každý vzorek byl vytištěn 3x aby se předešlo nahodilým chybám. Naměřené hodnoty se po ukončení měření průměrovaly.

4.1. Metody testování

4.1.1. Tahová zkouška

Jedná se o experimentální deformační zkoušku, při které je zkušební těleso postupně natahováno dokud nedojde k jeho přerušení. Průběh zkoušky lze pozorovat pomocí tahového diagramu což je závislost působící síly na prodloužení vzorku. V praxi se častěji vyskytuje pracovní diagram, kde je místo síly závislé napětí na poměrném prodloužení. Testovaný vzorek se umístí mezi čelisti trhacího zařízení, mezi kterými je definovaná vzdálenost. V průběhu zkoušky se zaznamenává působící síly na poměrném protažení měřeného vzorku. Z těchto údajů lze vypočítat smluvní napětí (1) a relativní prodloužení (2).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

kde σ - Napětí materiálu [MPa]; F - Síla v tahu [N]; S_0 - Plocha v místě přetržení vzorku [mm²]; ε - Poměrné prodloužení vzorku [-]; ΔL_0 - Zvětšení počáteční délky zkušební tělesa [mm]; L_0 - Počáteční měřená délka zkušební tělesa [mm].

Aby byli výše uvedené vztahy platné obecně, je zapotřebí používat normalizované rozměry testovacích vzorků pro specifické materiály. V tomto případě tvar 5A (viz *Obrázek 3*) uvedený v normě ČSN EN ISO 527.

Z tahové zkoušky se dá dále určit mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení testovaného vzorku.

Mez pevnosti σ_m je hodnota maximálního napětí v tahu, respektive maximální naměřené síly, jeho hodnota se stanoví pomocí rovnice (3). U běžných plastů se mez pevnosti pohybuje v rozmezí 15 MPa až 100 MPa, u běžných elastomerů je to přibližně do 28 MPa. [13]

$$R_m = \sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa] \quad (3)$$

kde $R_m = \sigma_m$ - mez pevnosti [MPa]; F_{max} - Maximální naměřená síla [N]; S_0 - Plocha v místě přetržení vzorku [mm²].

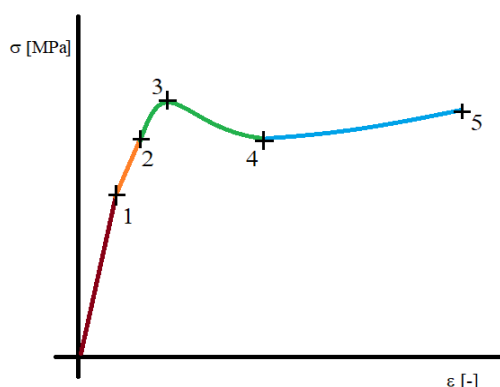
Napětí na mezi kluzu σ_y je napětí, kdy vznikají trvalé deformace a na zkušební vzorku se začíná tvořit krček. U semikrystalických materiálů bývá toto napětí shodné s napětím na mezi pevnosti. [13]

Napětí, při kterém dochází k přerušení zkušební vzorku nazýváme napětí při přetržení σ_b . U amorfních termoplastů bývá toto napětí shodné s napětím na mezi pevnosti. [13]

Další hodnotou, kterou můžeme získat z měření tahové zkoušky je tuhost materiálu. Tu získáme z modulu pružnosti E (4) kde obecně platí čím vyšší hodnota modulu pružnosti, tím vyšší je tuhost materiálu. Hodnotu modulu pružnosti stanovujeme z lineární části deformační křivky kde platí Hookův zákon. [13]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (4)$$

kde E - Modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa]; σ - Napětí materiálu [MPa]; ε - Poměrné prodloužení vzorku [-].



Obrázek 15 Ukázka tahové diagramu

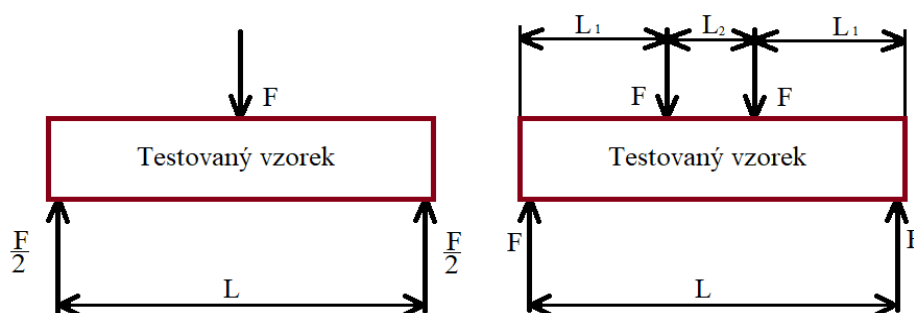
Ten říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu. Oblast Hookova zákonu je ohraničena horní hranicí která se nazývá mez úměrnosti (viz bod 1 Obrázek 15, hodnota uvedena větší než ve skutečnosti pro názornost). Za mezí úměrnosti se těsně před místem zakřivení tahového diagramu nalézá mez pružnosti (viz bod 2 Obrázek 15). Tato mez je hraniční pro vratné deformace, jakmile dojde k překročení napětí nastává výše zmiňovaná mez kluzu s limitami. Horní mez kluzu (viz bod 3 Obrázek 15) nastává v okamžiku, kdy hodnota napětí začne klesat a dolní mez kluzu (viz bod 4 Obrázek 15) je hodnotou, kdy se charakteristika opět začne růst až do meze přetržení (viz bod 5 Obrázek 15).

Takovýto průběh charakteristiky můžeme čekat u semikrystalických polymerů zatímco

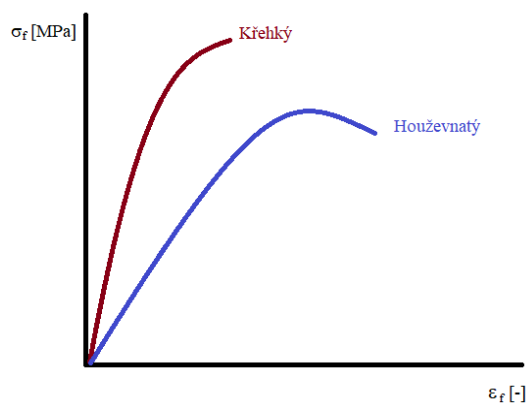
u křehkých nastává přetržení hned za mezí pružnosti.

4.1.2. Ohybová zkouška

Smyslem ohybové zkoušky, která je popsána normou ČSN EN ISO 178, je zjistit pevnost v ohybu a maximální ohybový moment daného materiálu. Dále touto zkouškou stanovujeme, zda-li se materiál řadí k houževnatým nebo křehkým polymerům. Je-li materiál houževnatý tak jako první dojde k ohybu a následně může dojít k prasknutí, pokud je-li křehký tak praskne bez prohnutí. Vzorek má tvar hranolu, položeného na dvou podporách vzdálených v předepsané vzdálenosti. Podle působící síly, která je aplikována z vrchu na střed hranolu rozdělujeme zkoušku na tříbodovou a čtyřbodovou (viz *Obrázek 16*). [14]



Obrázek 16 Schéma zatěžování ohybem, vlevo tříbodový, vpravo čtyřbodový způsob [14]



Obrázek 17 Diagram zatížení ohybu [14]

Výpočet momentu pro tříbodovou zkoušku je popsán rovnicí (5), pro čtyřbodovou zkoušku rovnicí (6). Rovnicí (7) je popsán výpočet průřezového modulu jednoduché plochy v ohybu pro hranol s šířkou b a výškou h . Výslednou pevnost v ohybu vypočítáme z maximálního ohybového momentu a výše zmíněného průřezového modulu dle rovnice (8). [14]

$$M_{OMAX} = \frac{F_{MAX} \cdot L}{4} [N \cdot mm] \quad (5)$$

$$M_{OMAX} = F_{MAX} \cdot L_2 [N \cdot mm] \quad (6)$$

$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{6} [mm^3] \quad (7)$$

$$\sigma_{fm} = \frac{M_{OMAX}}{W_0} [MPa] \quad (8)$$

kde M_{OMAX} - Maximální ohybový moment [N]; F_{MAX} - Maximální naměřená síla [N]; L - Vzdálenost podpor [mm]; L_2 - Vzdálenost mezi působícími silami [mm]; W_0 - Průřezový modul ohybu jednoduché plochy hranolu [mm³]; b - šířka hranolu [mm]; h - výška hranolu [mm]; σ_{fm} - Mez pevnosti v ohybu [MPa].

4.1.3. Zkouška tvrdosti

Další důležitou statickou zkouškou je zkouška tvrdosti. Ta určuje odpor měřeného materiálu na povrchu vůči proniknutí cizího tvrdšího materiálu. Měření probíhá vtlačováním cizího tělesa, tzv. indentoru, ve tvaru kuličky nebo kužele definovanou silou po stanovenou dobu. Měří se tedy hloubka vniku indentoru do zkušebního tělesa po určité době a při určitém zatížení protože po ukončení zkoušky dojde v materiálu k elastickému zotavení a nelze měřit. Tím se liší od zkoušky tvrdosti u kovů, kde se měřené hodnoty odečtou až po odlehčení měřeného tělesa díky absenci pružné deformace. [15]

Používané metody se liší podle potřeb tvaru indentoru, materiálu indentoru nebo podle velikosti a doby zatížení.

Metoda vtlačování kuličky

Metoda vtlačování kuličky neboli metoda Brinell je prováděna na měřeném vzorku, který by měl mít minimální šířku 15 mm a tloušťku 4 mm a to proto, aby výsledek zkoušky nebyl ovlivněn okrajovými efekty. Vnikajícím tělesem pak je kulička z leštěné tvrzené oceli s definovaným průměrem vtlačovaná normovaným zatížením. *“Při reálném průběhu vtlačení kuličky do vzorku dojde k vytlačení okolního materiálu kolem kuličky a při hodnocení se tento jev zahrnuje. Po odtížení kuličky zůstane část měřené látky ireverzibilně deformována. Hloubku h pak můžeme rozložit do dvou složek, a to na složku reverzibilní h_1 a složku ireverzibilní h_2 . Deformační část reverzibilní, která je elastického nebo viskoelastického charakteru souvisí přímo s Youngovým modulem E a Poissonovou konstantou μ .”* [16]

Výsledná tvrdost se pak vypočítá jako síla závislá na hloubce důlku (9).

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_{1,2}^2} \right)} [-] \quad (9)$$

kde HB - Hardness Brinell - tvrdost podle Brinella [-]; F - zatížení působící na měřící kuličku [N]; $d_{1,2}$ - aritmetický průměr průměru důlku [mm]; D - průměr ocelové kuličky [mm]. [16]

Metoda podle Rockwella (R, L, M, E)

Tato metoda je také založena na vtláčování kuličky do zkušební tělesa, ovšem hloubku vtisku změříme 15 vteřin po odlehčení zatěžovaného prvku, jinými slovy, po elastickém zotavení. Indentor lze v tomto případě volit z několika dostupných průměrů ($R=12,7$ mm; $L=M=6,35$ mm; $E=3,175$ mm). Na počátku měření se těleso zatíží 98 N na 10 vteřin čímž dojde ke stanovenému kontaktu mezi kuličkou a vzorkem. Následuje přidání zatížení o hodnotě 588,4 N pro stupnice R a L , pro stupnice M a E se přidá 980,7 N po dobu 15 sekund. Po odstranění zatížení se odečte hloubka vtisku h , ze které se vypočítá tvrdost podle rovnice (10). [15]

$$HR = 130 - \frac{h}{0,002} [-] \quad (10)$$

kde HR - Hardness Rockwell - tvrdost podle Rockwella [-]; h - hloubka vtisku [mm].

Metoda Shore

Metoda Shore se rozděluje na dva typy, metodu A pro měkčí se silou 8,05 N a metodu D pro tvrdší polymery se silou 44,45 N. Obě metody jsou založené na přiložení zkušebního zařízení a následnému vtláčování definovaného hrotu pružinou uvnitř měřidla pro onu metodu do vzorku o minimálních rozměrech v tloušťce 4 mm (pro splnění lze složit z více tenčích ale nutno počítat s faktem, že se výsledky mohou odlišovat) a šířce 9 mm každým směrem od místa kontaktu. Na zkušební tělísko se co nejrychleji bez nárazu zatlačí opěrná patka měřidla. Ze stupnice se pak odečte buď po 1 vteřině počáteční hodnota tvrdosti nebo po 15 vteřinách hodnota maximální. [17]

4.1.4. Rázová zkouška - Charpyho kladivo

Rázové zkoušky se řadí do kategorie dynamického namáhání, kde narozdíl oproti statickým, u kterých se testovacích vzorky naruší až za použití větší síly a relativně velké deformace, poruší díky rychlosti namáhání už při nízkých hodnotách deformace. Rázové zkoušky se sami o sobě dělí na rázové zkoušky v tahu, tlaku, ohybu a v krutu při čemž nejdůležitější je zkouška v ohybu. [19]

Rázovou houževnatostí se rozumí, jak rychle dokáže materiál absorbovat energii, respektive kolik energie dokáže přerušit testované těleso. Při tomto druhu testu může dojít ke

dvěma druhům porušení, buď křehkým nebo houževnatým lomem. Křehký lom nastává u plastů, které mají teplotu skelného přechodu vyšší než standardní teplotu okolí která je stanovena na 23 °C. Houževnatý lom naopak nastává u materiálu s teplotou skelného přechodu nižší než 23 °C. U takovýchto materiálů musí být do vzorku poznamenám vrub pro snazší přerušení, v takovém případě se jedná o vrubové houževnatosti. [18]

Rázová zkouška Charpyho kladivem, popsaná normou ČSN EN ISO 179-1, spočívá v přeražení testovaného vzorku ve tvaru hranolu o tloušťce h a šířce b za využitím kinetické energie kladiva se závažím. Testovaný vzorek se zapře o dvě podpory mezi kterými je dráha pádu Charpyho kladiva. To dopadá na měřené těleso s rychlostí podle hmotnosti kladiva a výšky ze které bylo upuštěno. U starších verzí Charpyho kladiva se zaznamenávali výšky průletu kladiva bez vzorku a průletu kladiva po zasažení vzorku ze kterých se potom manuálně počítala kinetická energie kladiva. U moderních strojů energii vypočítá software uvnitř a následně zbývá pouze dosadit do vzorce na houževnatost (11). [18]

$$a_{cU} = \frac{m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}{b \cdot h} \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (11)$$

kde a_{cU} - Rázová houževnatost [kJ/m²]; m - hmotnost kladiva [kg];

g - gravitační zrychlení = 9,81 m/s²; h_1 - výška dopadu kladiva bez vzorku [m]; h_2 - výška dopadu kladiva po přerušení vzorku [m]; b - šířka měřeného vzorku [m]; h - tloušťka měřeného vzorku [m].

4.2. Postup měření

Před zahájením tahové zkoušky je nejprve nutné změřit celkovou délku, tloušťku a šířku vzorku v požadovaném místě přetržení. Tyto parametry se byly zadány do programu od firmy LaborTech, který byl součástí trhačího zařízení LabTest 3.100 do 10 kN s uzavíratelným krytem pro regulaci teploty. Z tloušťky a šířky byla softwarem vypočtena plocha vzorku v místě přetržení, která byla použita pro automatizovaný výpočet poměrného prodloužení a pevnosti v tahu. Po zadání parametrů byl vzorek vložen do čelistí trhačího zařízení, které od sebe byli vzdálené 50 mm.

V dalším kroku se v softwaru nastavila hodnota předpětí na 100 N. Předpětí je taková hodnota síly, od které začíná měření. Tato síla se nastavuje aby se eliminoval vliv chyb měření při zakousávání čelistí do vzorku.

Rychlost tahové zkoušky byla nastavena na 5 mm/s a pokles síly indikující přetržení vzorku, respektive konec zkoušky byl nastaven na 80 %.

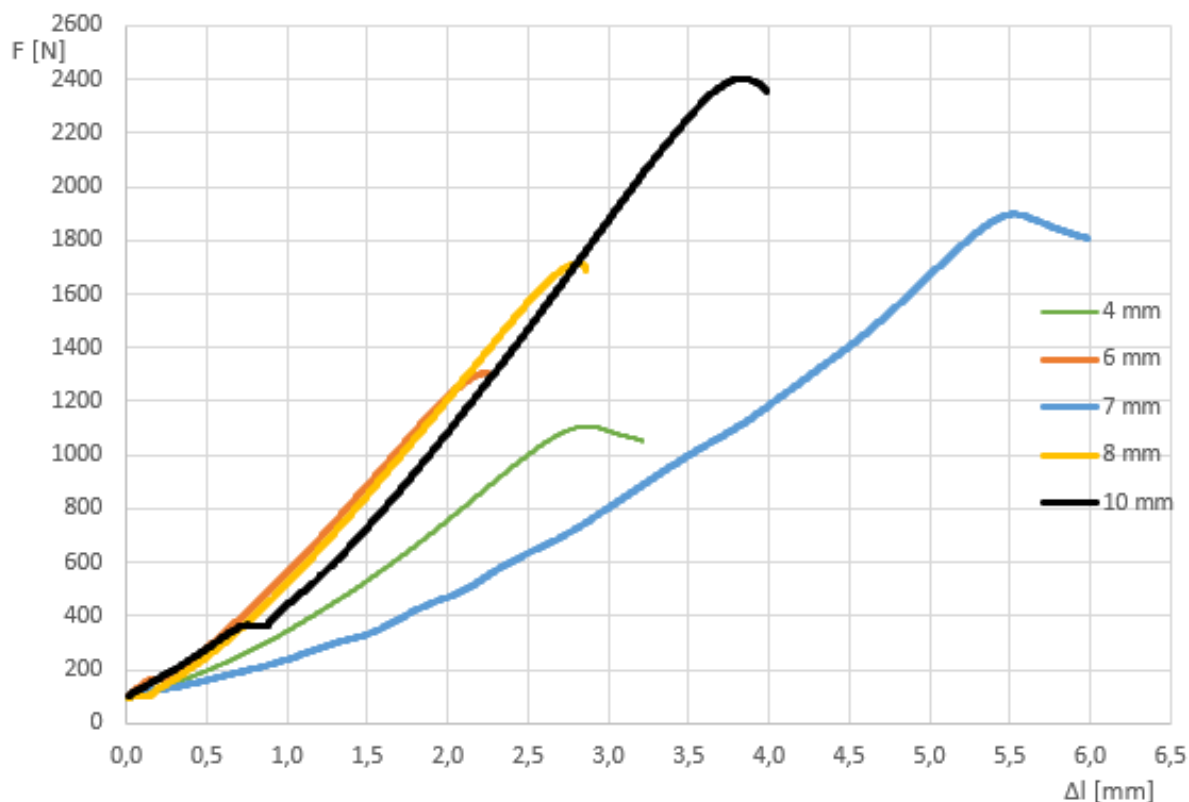
Pro stanovení rovnocenných podmínek jednotlivých měřených těles, byly výše uvedené

parametry vloženy do programu stejné pro všechny měřené vzorky. Následovalo vynulování aktuální síly a aktuálního naměřeného posuvu dráhy a byla spuštěna zkouška.

4.3. Hodnoty získané měřením

4.3.1. Optimalizační měření

Optimalizační měření týkající se výběru výšky vzorků bylo provedeno na vzorcích z materiálu PLA s hustotou 50 % s přímočarým vzorem se třemi perimetry. Z výsledných grafů bylo zjištěno, že vzorek o výšce 7 mm se překvapivě přetrhl při větší síle než vzorek 8 mm. Díky této skutečnosti byl vybrán k dalšímu prozkoumání. Charakteristiky vzorků 4 a 7 mm neodpovídají stejné lineární závislosti jako u ostatních vzorků i přes fakt, že jsou ze stejného materiálu a jejich směrnice by měla být téměř ne-li naprosto totožná.



Graf 1 Tahový diagram optimalizačního měření

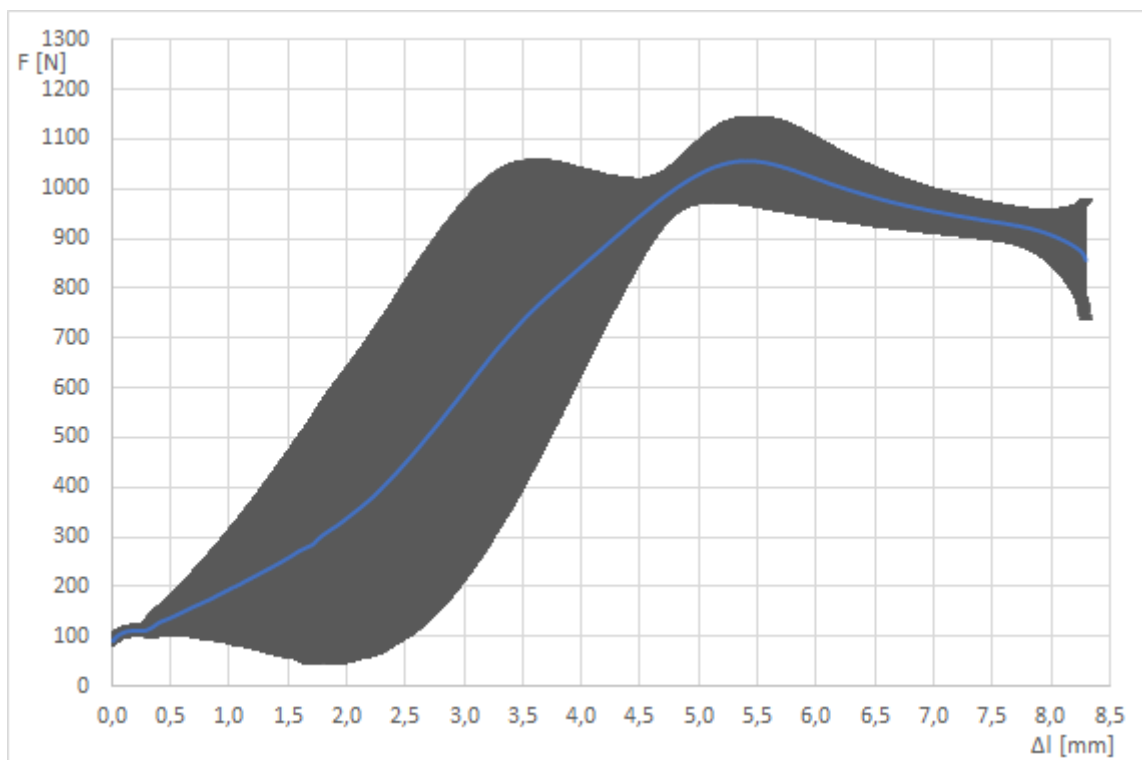
4.3.2. ABS-T

U materiálu ABS-T, jak měření ukázalo, se nevyplatí šetřit s materiálem je-li třeba dosáhnout co nejvyšší hodnoty maximálního zatížení. Pro všechny vzory a hustoty výplně byly vytisknuty 3 vzorky, které byly po změření zprůměrovány. Nejvyšší hodnotu pevnosti vůči plné výplni, jak můžeme pozorovat v *Tabulka 4*, byl materiál schopen dosáhnout se 75 % hustoty v kubickém vzoru a i přesto se maximální síly lišily zhruba o 300 N což je pro lepší představu ekvivalentem váhy 30 kg.

V *Graf 2 Graf 1* je vyobrazena nejpevnější výplň, tedy plná s 1 perimetrem. Fakt, že se u materiálu ABS nedá ušetřit na úkor pevnosti dokazuje *Obrázek 18* a *Obrázek 19*, které poukazují na vytvoření krčku u vzorků se 100 % a jejich protažení vůči ostatním vzorkům.

Tabulka 4 Naměřené zprůměrované hodnoty materiálu ABS-T

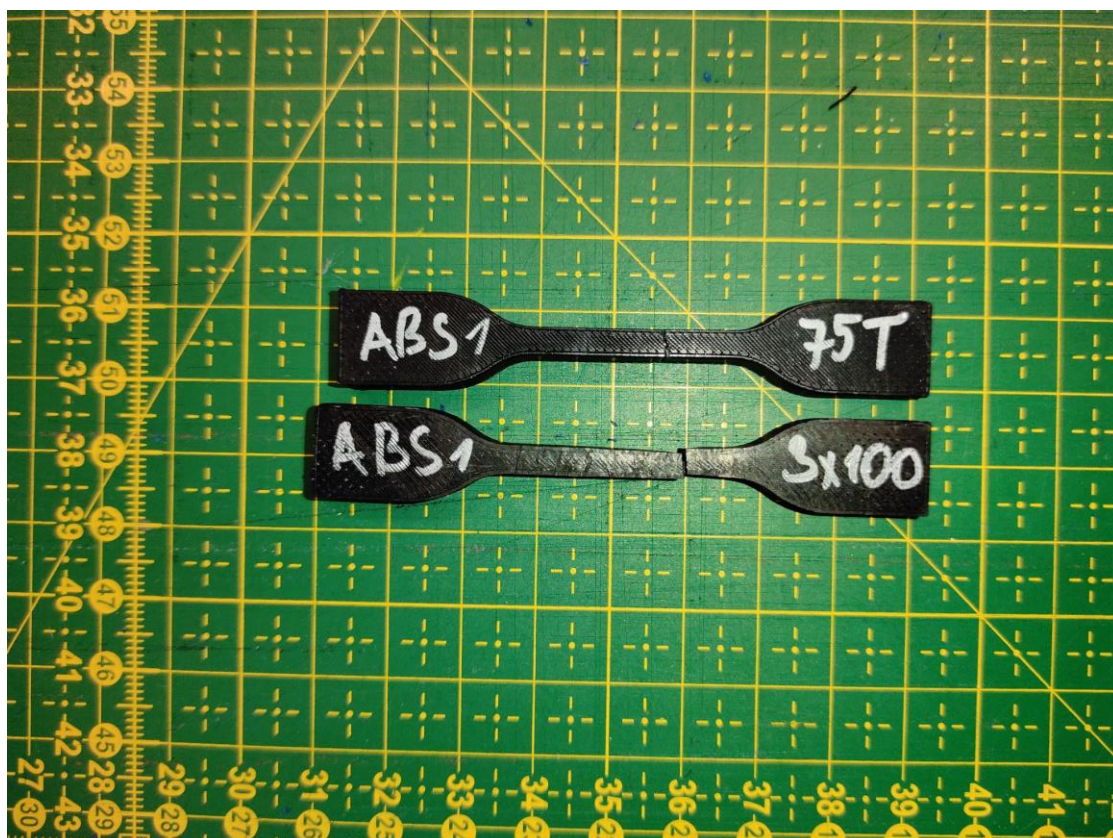
Vzor	Hustota výplně [%]	$\bar{\sigma}_{Rm}$ [MPa]	δ_{Rm} [MPa]	$\bar{\sigma}_{Fmax}$ [N]	δ_{Fmax} [N]	A_b [%]
Plný	100-1per	40,33	0,45	1107,01	8,43	9,41
Přímočarý	25	19,19	0,23	526,98	5,41	3,89
	50	19,35	0,29	535,15	7,80	4,23
	75	27,29	0,66	773,48	11,44	3,46
Gyroid	25	20,45	0,40	574,51	8,22	5,34
	50	25,05	0,42	700,37	11,33	4,52
	75	26,24	0,65	756,51	11,12	4,07
Kubický	25	17,69	0,34	490,68	3,19	3,00
	50	22,65	0,30	644,45	12,88	3,98
	75	27,67	0,42	769,03	2,65	3,64



Graf 2 Tahový diagram materiálu ABS-T s plnou výplní a směrodatnou odchylkou



Obrázek 18 Viditelné vytvoření krčku u vzorků ABS-T se 100 % výplní



Obrázek 19 Viditelné prodloužení vzorku ABS-T s plnou výplní vůči přímočarému 75 %



Obrázek 20 Detail nepřetrhaných vzorků ABS-T s plnou výplní



Obrázek 21 Detail přetrhaných vzorků ABS-T s plnou výplní

4.3.3. PC Blend

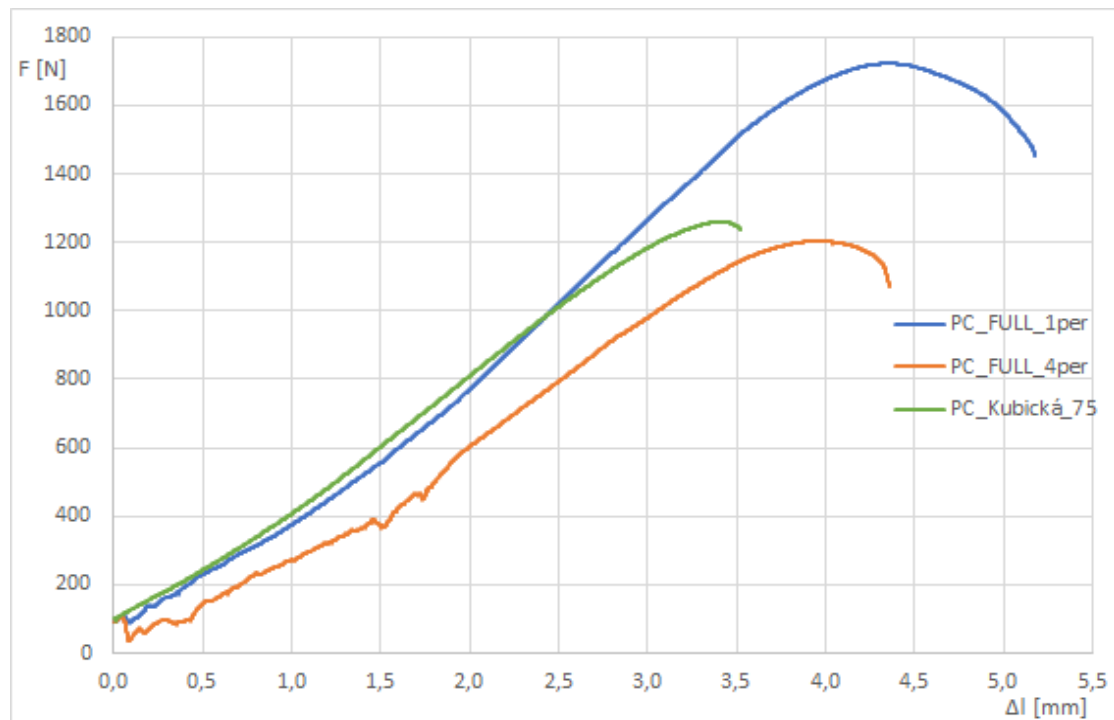
Materiál PC Blend již dosahuje relativně slušných hodnot co se týče pevnosti, ale ani zde nelze porovnávat plnou výplň s jejími prázdnějšími variantami. Pro všechny vzory a hustoty výplně byly vytisknuty 3 vzorky, které byly po změření zprůměrovány. Pro tento materiál byla ze zajímavosti vytisknuta sada s 50 % výplně ale se 4 perimetry. Mez pevnosti v tahu vyšla podle očekávání vyšší než se stejnou hodnotou výplně u ostatních vzorů.

V Graf 3 je znázorněno, jak moc plná výplně převyšuje ostatní vzory v hodnotách maximální síly, pro lepší porovnání mezi jednotlivými výplněmi je zanedbáno vykreslení směrové odchylky.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty materiálu PC Blend

Vzor	Hustota výplně [%]	$\bar{\sigma}_{Rm}$ [MPa]	δ_{Rm} [MPa]	\bar{F}_{max} [N]	δ_{Fmax} [N]	A_b [%]
Plný	100-1per	62,24	0,43	1729,17	16,12	5,18
	100-4per	41,56	0,41	1187,55	14,14	4,22
Přímočarý	25	28,77	0,54	770,83	10,16	4,82
	50	29,96	0,48	812,75	11,31	3,65
	75	43,91	0,12	1215,88	7,96	4,07
Gyroid	25	30,63	0,39	822,83	6,60	4,25
	50	37,58	1,18	1034,42	27,96	5,16
	75	40,67	1,10	1141,18	21,77	4,12

Kubický	25	30,42	0,43	829,19	6,40	3,86
	50	38,71	0,45	1072,73	11,68	4,75
	75	45,53	0,46	1264,48	10,65	3,76



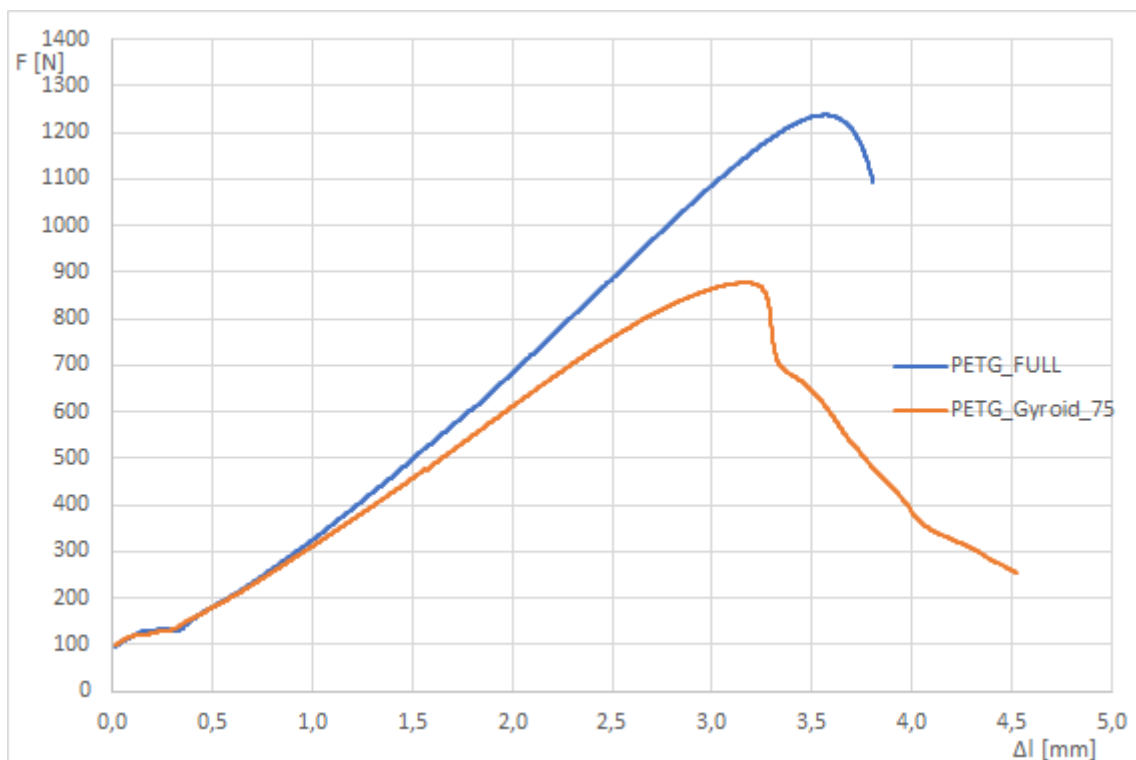
Graf 3 Tahový diagram materiálu PC Blend, srovnání výplně bez směrodatné odchylky

4.3.4. PET-G

Materiál PET-G podle očekávání nedosahuje vysokých pevnostních hodnot ale rovná se materiálu ABS. Pro všechny vzory a hustoty výplně byly vytisknuty 3 vzorky, které byly po změření zprůměrovány. U vzorků s hustotou výplně menší než je 100 %, si můžeme povšimnout v *Graf 4* nedokonalého vytvoření krčku, pro lepší porovnání mezi jednotlivými výplněmi je zanedbáno vykreslení směrové odchylky. U většiny vzorků došlo totiž k pomalému přetržení což značí i roztřepená místa přerušení jak můžeme pozorovat na *Obrázek 22* a *Obrázek 23* v příloze A.

Tabulka 6 Naměřené hodnoty materiálu PET-G

Vzor	Hustota výplně [%]	σ_{Rm} [MPa]	δ_{Rm} [MPa]	σ_{Fmax} [N]	δ_{Fmax} [N]	A_b [%]
Plný	100-1per	44,57	0,15	1237,42	1,46	3,77
Přímočarý	25	19,20	0,13	527,50	3,67	5,60
	50	19,85	0,12	549,58	4,32	4,89
	75	28,04	0,29	786,22	5,61	3,73
Gyroid	25	23,43	0,36	647,73	8,83	7,39
	50	29,14	0,55	807,12	3,19	5,27
	75	30,92	0,26	877,80	4,89	4,50
Kubický	25	21,91	0,62	607,52	15,86	6,01
	50	27,51	0,16	771,26	9,76	5,17
	75	32,31	0,42	919,61	12,34	4,13



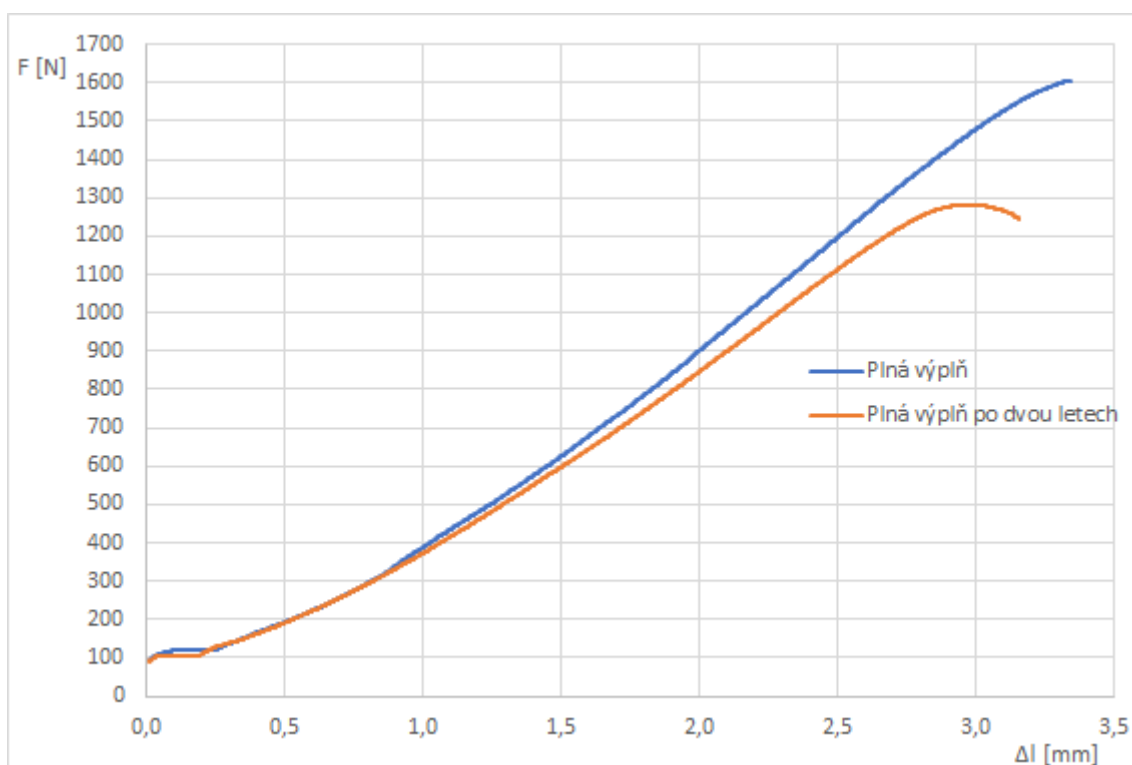
Graf 4 Tahový diagram materiálu PET-G, srovnání výplní bez směrodatné odchylky

4.3.5. PLA

Jak můžeme vidět z *Graf 5*, materiál PLA potvrzuje svůj původ a projevuje se jako velmi křehký polymer bez možnosti většího prodloužení. Pro všechny vzory a hustoty výplně byly vytisknuty 3 vzorky, které byly po změření zprůměrovány. Ze zajímavosti byly vytisknuty i vzorky z filamentu, který ležel dva roky bez ochrany proti vlhkosti. Jak můžeme vidět, materiál do sebe nasál okolní vlhkost a tím si zhoršil své pevnostní parametry. Co stojí za povšimnutí je hodnota 75 % přímočaré výplně kde se materiál PLA pevnostně přibližuje na úroveň plné výplně.

Tabulka 7 Naměřené hodnoty materiálu PLA

Vzor	Hustota výplně [%]	$\bar{\sigma}_{Rm}$ [MPa]	δ_{Rm} [MPa]	\bar{F}_{max} [N]	δ_{Fmax} [N]	A_b [%]
Plný	100	53,00	2,22	1584,85	42,65	3,39
	100-2yo	47,25	1,92	1308,84	48,92	3,20
Přímocárý	25	32,50	0,32	939,98	8,31	3,25
	50	32,02	0,63	967,47	15,72	3,26
	75	47,09	0,37	1470,35	17,04	3,56
Gyroid	25	31,88	0,71	960,99	14,44	3,30
	50	38,55	0,73	1159,00	5,57	3,23
	75	44,19	0,65	1333,04	8,09	3,55
Kubický	25	24,68	0,45	703,02	11,74	2,92
	50	31,98	0,22	906,98	5,76	4,63
	75	37,06	0,80	1053,21	18,10	3,31



Graf 5 Tahový diagram materiálu PLA, srovnání navlhčeného materiálu s nově vybaleným, bez směrodatných odchylek

4.4. Srovnání materiálů

Pokud vyzdvihneme nejpevnější výplně jednotlivých materiálů, kterými vyšly bez pochyb plné výplně, a srovnáme je mezi sebou v *Tabulka 8*, vyjde nám jako jednoznačně nejpevnější materiál PC Blend. Relativně blízko hodnotám PC Blendu je velmi rozšířený materiál PLA.

V případě pomnutí plné výplně lze pozorovat v *Tabulka 9*, že u většiny materiálů převažuje výplň kubická co se týče meze pevnosti, ovšem její hodnota není nejvyšší. Tou je přímočará výplň u materiálu PLA a s přihlédnutím k cenové relaci materiálu PC Blend, pak PLA vychází jako atraktivnější materiál.

Lehce zarážející hodnotou je mez pevnosti PC Blendu se čtyřmi perimetry která vyšla navzdory očekáváním nižší než PC Blend s plnou výplní a pouze jedním perimetrem.

Tabulka 8 Porovnání nejpevnějších vzorů jednotlivých materiálů

Materiál	Vzor	Hustota výplně [%]	σR_m [MPa]	σF_{max} [N]	A_b [%]
PC Blend	Plný	100-1per	62,24	1729,17	5,18
ABS-T	Plný	100	40,33	1107,01	9,41
PET-G	Plný	100	44,57	1237,42	3,77
PLA	Plný	100	53,00	1584,85	3,39

Tabulka 9 Porovnání nejpevnějších vzorů bez plné výplně

Materiál	Vzor	Hustota výplně [%]	σR_m [MPa]	σF_{max} [N]	A_b [%]
PC	Kubický	75	45,53	1264,48	3,76
ABS-T	Kubický	75	27,67	769,03	3,64
PET-G	Kubický	75	32,31	919,61	4,13
PLA	Přímočarý	75	47,09	1470,35	3,56

Závěr

Byly prostudovány možnosti tisku různých druhů polymerů pro tiskárny typu FFF/FDM, které jsou jedněmi z nejpoblárnějších a nejdostupnějších tiskáren na trhu. Byl proveden výzkum v oblasti mechanických pevnostních zkoušek materiálů, na jehož základě byla vybrána zkouška v tahu pro zjištění pevnostních hodnot materiálů.

Pro jednotlivé materiály byly navrhnutý různé výplně, u kterých se vyhodnocoval vliv na pevnost vzorku.

Tahovou zkouškou bylo zjištěno, že při plné výplni vykazuje nejlepší pevnostní vlastnosti materiál PC Blend následovaný materiálem PLA a jako nejhorší byl zjištěn materiál ABS-T. Po pominutí plné výplně a soustředění se na úsporu materiálu vyšlo najevo, že při použití nižší hustoty výplně se nejpevnější vlastností v tahu představuje materiál PLA s vnitřní výplní 75 % ve tvaru přímočarý následovaný materiálem PC Blend s kubickou výplní a jako nejméně pevný materiál v tahu se jeví materiál ABS-T.

Dalším směrem zkoumání dané problematiky by mohlo být provedení zkoušek ohybové, rázové a zkoušky tvrdosti, které by poskytly pokročilejší náhled na pevnostní vlastnosti jednotlivých materiálů. Dále také navržený vlastních vnitřních vzorů a větší důraz na vliv perimetrů a výšky vrstvy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] STRÍTESKÝ, Ondřej. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. Prusa Research, 2019.
- [2] Tiskové struny - filamenty [online]. <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/>. cit. 27.4.2021
- [3] Prusament - materiály [online]. <https://prusament.com/cs/materials/>. cit. 28.4.2021.
- [4] Prusa Knowledge Base - Flexibilní materiály [online]. https://help.prusa3d.com/cs/article/flexibilni-materialy_2057. cit. 20.5.2021
- [5] Prusa Knowledge Base - Kompozitní materiály [online]. https://help.prusa3d.com/cs/article/kompozitni-materialy-plnene-drevenym-ci-kovovym-praskem_166863. cit. 20.5.2021
- [6] Prusa Knowledge Base - Vodou rozpustné [online]. https://help.prusa3d.com/cs/article/vodou-rozpustne-bvoh-pva_167012. cit 20.5.2021
- [7] Prusa Research [online] <https://shop.prusa3d.com/cs/upgrady/183-original-prusa-i3-mk25s-mk3s-multi-material-2s-upgrade-kit-mmu2s.html>. cit. 20.5.2021
- [8] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 7 s, Třídící znak 64 0604.
- [9] Prusa Knowledge Base - Vrstvy a perimetry [online]. https://help.prusa3d.com/cs/article/vrstvy-a-perimetry_1748/. cit 21.5.2021
- [10] PrusaPrinters Blog - Vše co potřebujete znát o tiskových výplních [online]. https://blog.prusaprinters.org/cs/vse-co-potrebuje-znat-o-tiskovych-vyplnich_43579/. cit. 22.5.2021
- [11] 3D Metal Forge - Gyroid infills for 3D printing [online]. <https://3dmetalforge.com/en/gyroid-infills-for-3d-printing-2/>. cit. 22.5.2021
- [12] *Hilbertova křivka* [online], poslední aktualizace 11.6.2020. Wikipedie, dostupné z:

https://cs.wikipedia.org/wiki/Hilbertova_křivka. cit. 22.5.2021

- [13] BĚHÁLEK, Luboš, *Polymery [online]*, kapitola 9.1-Tahové vlastnosti polymerů, <https://publi.cz/books/180/09.html>. cit. 22.05.2021
- [14] BĚHÁLEK, Luboš, *Polymery [online]*, kapitola 9.3-Ohybové vlastnosti polymerů, <https://publi.cz/books/180/09.html>. cit. 23.5.2021
- [15] BĚHÁLEK, Luboš, *Polymery [online]*, kapitola 9.5-Tvrдость polymerů, <https://publi.cz/books/180/09.html>. cit. 23.5.2021
- [16] MARTINEK, Michal, *Měření tvrdosti polymerů [online]*, Zlín, 2010, Bakalářská práce, strana 15, kapitola 1.3.1, https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11092/martinek_2010_bp.pdf. cit. 24.5.2021
- [17] MARTINEK, Michal, *Měření tvrdosti polymerů [online]*, Zlín, 2010, Bakalářská práce, strana 29, kapitola 1.6, https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11092/martinek_2010_bp.pdf. cit. 24.5.2021
- [18] BĚHÁLEK, Luboš, *Polymery [online]*, kapitola 11-Mechanické vlastnosti polymerů - dynamické rázové namáhání, <https://publi.cz/books/180/11.html>. cit. 24.5.2021
- [19] ŠEMORA, Jaroslav, *Mechanické vlastnosti syntetických polymerů [online]*, Zlín, 2014, Bakalářská práce, strana 28, kapitola 4.3, https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/29882/šemora_2014_dp.pdf. cit. 24.5.2021
- [20] 3D Printer Bee [online], 3D Printing Infill | Patterns, Density, Strength, Stability, <https://the3dprinterbee.com/3d-printing-infill/>. cit. 26.5.2021
- [21] Prusa Knowledge Base [online], Infill patterns, https://help.prusa3d.com/cs/article/inifill-patterns_177130. cit. 26.5.2021

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obrázky

OBRÁZEK 1 TISK JEDNOTLIVÝCH VRSTEV TECHNOLOGIÍ FDM /FFF [1]	12
OBRÁZEK 2 ORIGINAL PRUSA I3 MK3S MMU2S [7]	14
OBRÁZEK 3 ROZMĚRY ZKUŠEBNÍHO VZORKU [8]	18
OBRÁZEK 4 MĚŘENÝ VZOREK VE SLICERU	18
OBRÁZEK 5 POSTUPNÉ VRSTVENÍ VZORU 3D PLÁSTVE, HUSTOTA 50 %	20
OBRÁZEK 6 VZOR GYROID, HUSTOTA 50 %	20
OBRÁZEK 7 PŘÍMOČARÝ VZOR, HUSTOTA 70%	21
OBRÁZEK 8 VZOR ČÁRA, HUSTOTA 50 %	21
OBRÁZEK 9 KUBICKÝ VZOR, HUSTOTA 50 %	21
OBRÁZEK 10 VZOR KUBICKÝ ADAPTIVNÍ, HUSTOTA 50 %	22
OBRÁZEK 11 VZOR MŘÍŽKA, HUSTOTA 50 %	22
OBRÁZEK 12 TROJÚHELNÍKOVÝ VZOR, HUSTOTA 50 %	23
OBRÁZEK 13 POSTUPNÉ VRSTVENÍ VZORU PLÁSTVE, HUSTOTA 50 %	23
OBRÁZEK 14 VZOR HILBERTOVA KŘIVKA, HUSTOTA 50 %	23
OBRÁZEK 15 UKÁZKA TAHOVÉ DIAGRAMU	25
OBRÁZEK 16 SCHÉMA ZATĚŽOVÁNÍ OHYBEM, VLEVO TŘÍBODOVÝ, VPRAVO ČTYŘBODOVÝ ZPŮSOB [14]	26
OBRÁZEK 17 DIAGRAM ZATÍŽENÍ OHYBU [14]	26
OBRÁZEK 18 VIDITELNÉ VYTVOŘENÍ KRČKU U VZORKŮ ABS-T SE 100 % VÝPLNÍ	32
OBRÁZEK 19 VIDITELNÉ PRODLOUŽENÍ VZORKU ABS-T S PLNOU VÝPLNÍ VŮČI PŘÍMOČARÉMU 75 %	33
OBRÁZEK 20 DETAIL NEPŘETRHANÝCH VZORKŮ ABS-T S PLNOU VÝPLNÍ	33
OBRÁZEK 21 DETAIL PŘETRHANÝCH VZORKŮ ABS-T S PLNOU VÝPLNÍ	34
OBRÁZEK 22 FOTO ROZTŘEPENÉHO PET-G	1
OBRÁZEK 23 FOTO ROZTŘEPENÉHO NEPŘERUŠENÉHO PET-G	1
OBRÁZEK 24 NEPŘETRHANÁ SADA VZORKŮ MATERIÁLU ABS-T	2
OBRÁZEK 25 PŘETRHANÉ VZORKY MATERIÁLU ABS-T	2
OBRÁZEK 26 NEPŘETRHANÉ SADA VZORKŮ MATERIÁLU PET-G	3
OBRÁZEK 27 PŘETRHANÁ SADA VZORKŮ MATERIÁLU PET-G	3

Grafy

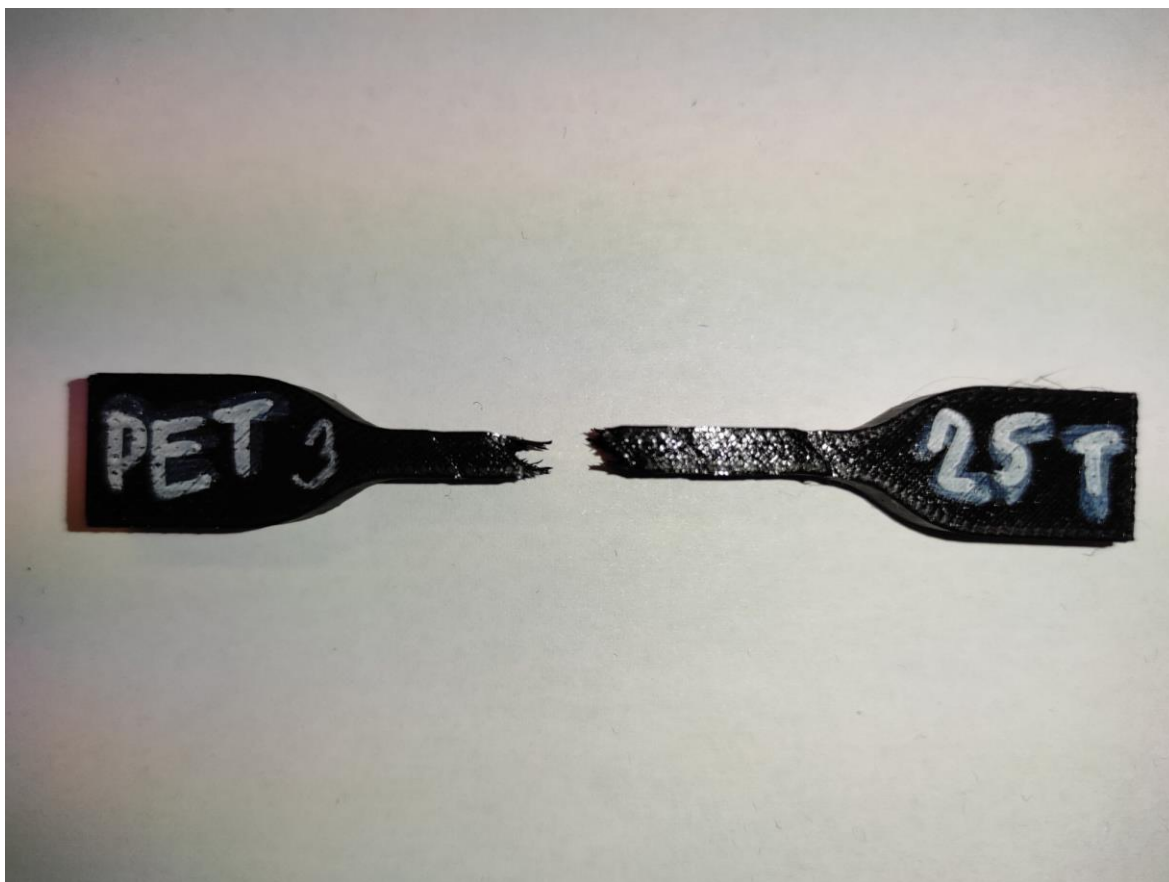
GRAF 1 TAHOVÝ DIAGRAM OPTIMALIZAČNÍHO MĚŘENÍ	30
GRAF 2 TAHOVÝ DIAGRAM MATERIÁLU ABS-T S PLNOU VÝPLNÍ A SMĚRODATNOU ODCHYLKOU	32
GRAF 3 TAHOVÝ DIAGRAM MATERIÁLU PC BLEND, SROVNÁNÍ VÝPLNÍ BEZ SMĚRODATNÉ ODCHYLKY	35
GRAF 4 TAHOVÝ DIAGRAM MATERIÁLU PET-G, SROVNÁNÍ VÝPLNÍ BEZ SMĚRODATNÉ ODCHYLKY	36
GRAF 5 TAHOVÝ DIAGRAM MATERIÁLU PLA, SROVNÁNÍ NAVLHLÉHO MATERIÁLU S NOVĚ VYBALENÝM, BEZ SMĚRODATNÝCH ODCHYLEK	38

Tabulky

TABULKA 1 TEPLoty TISKU	17
TABULKA 2 DRUHY VÝPLNÍ POUŽITÉ V OPTIMALIZAČNÍM MĚŘENÍ	19
TABULKA 3 POUŽITÍ MATERIÁLU A RYCHLOST TISKU PŘI OPTIMALIZAČNÍM MĚŘENÍ (VZOREK 5A, HUSTOTA 50 %)	19
TABULKA 4 NAMĚŘENÉ ZPRŮMĚROVANÉ HODNOTY MATERIÁLU ABS-T	31
TABULKA 5 NAMĚŘENÉ HODNOTY MATERIÁLU PC BLEND	34
TABULKA 6 NAMĚŘENÉ HODNOTY MATERIÁLU PET-G	36
TABULKA 7 NAMĚŘENÉ HODNOTY MATERIÁLU PLA	37
TABULKA 8 POROVNÁNÍ NEJPEVNĚJŠÍCH VZORŮ JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ	39
TABULKA 9 POROVNÁNÍ NEJPEVNĚJŠÍCH VZORŮ BEZ PLNÉ VÝPLNĚ	39

Přílohy

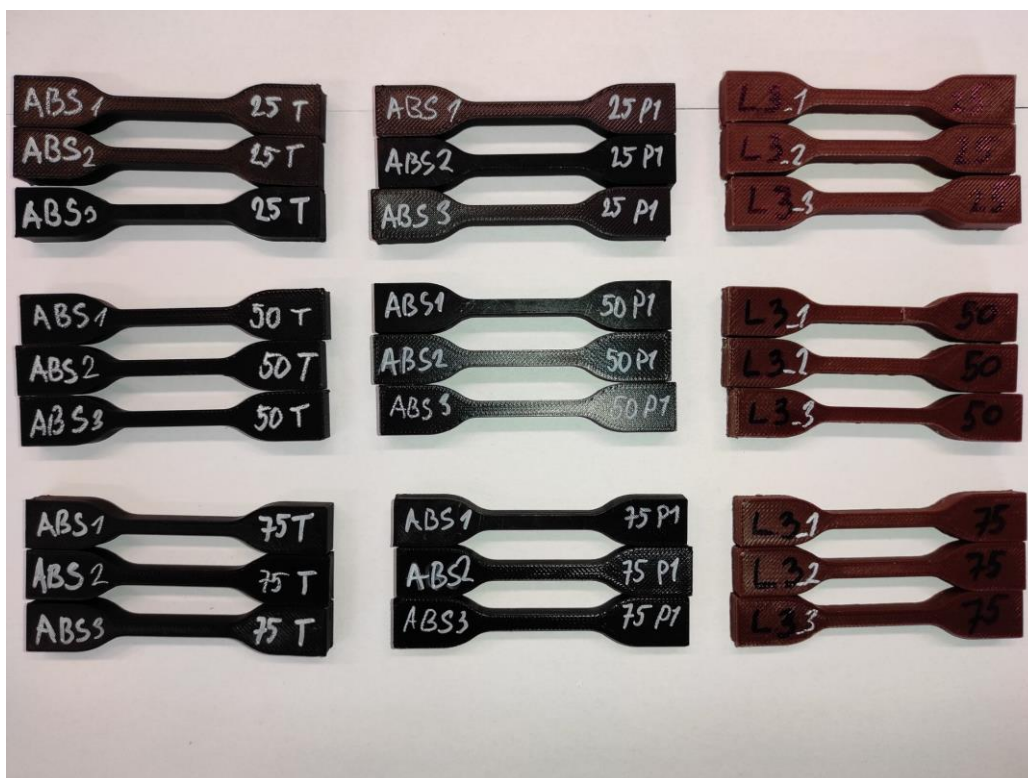
Příloha A - Fotky vzorků



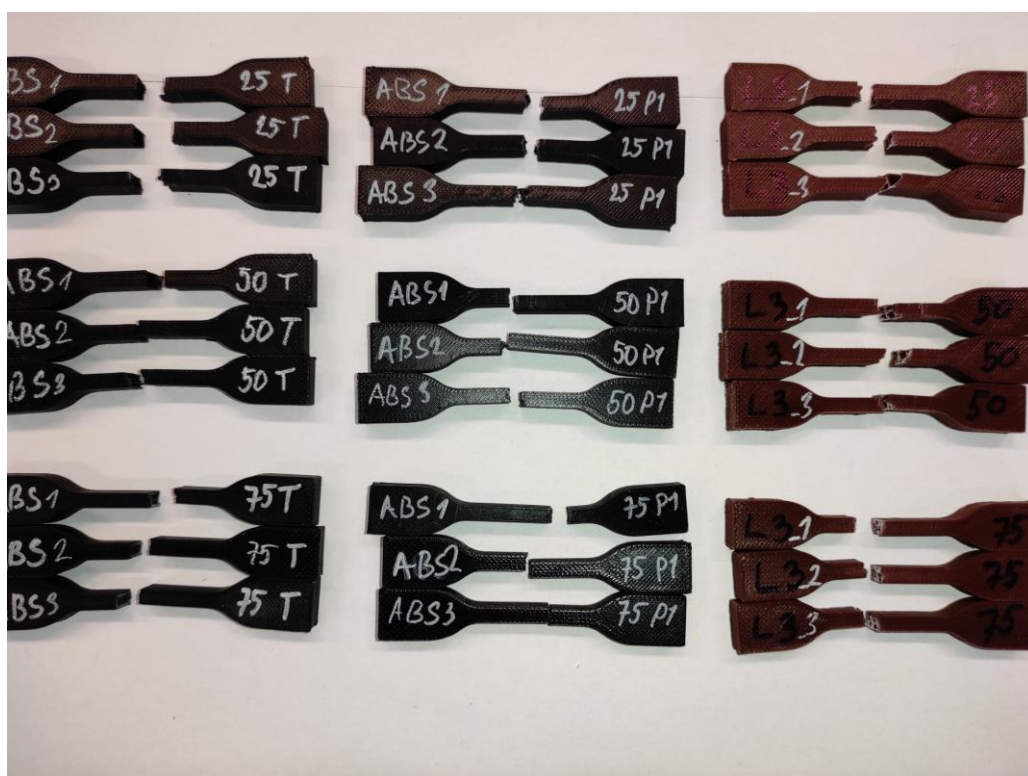
Obrázek 22 Foto roztřepeného PET-G



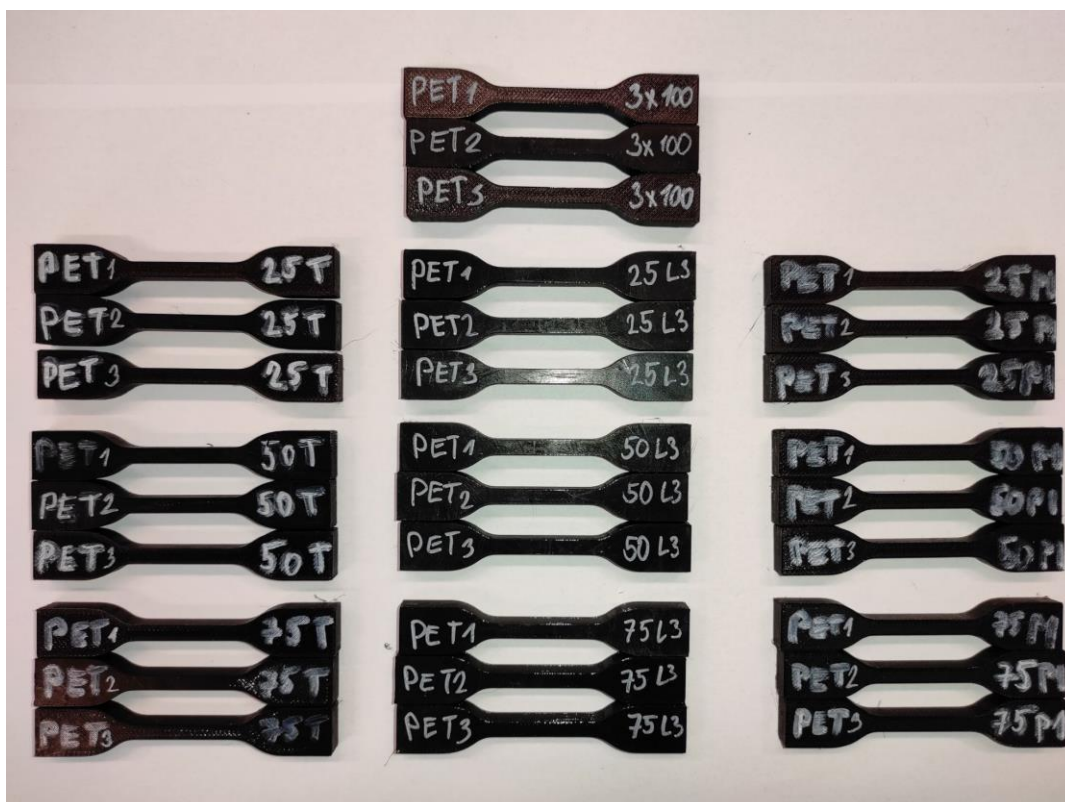
Obrázek 23 Foto roztřepeného nepřerušného PET-G



Obrázek 24 Nepřetrhaná sada vzorků materiálu ABS-T



Obrázek 25 Přetrhané vzorky materiálu ABS-T



Obrázek 26 Nepřetrhaná sada vzorků materiálu PET-G



Obrázek 27 Přetrhaná sada vzorků materiálu PET-G