



Možnosti recyklace materiálu při 3D tisku

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Tomáš Reichelt

Vedoucí práce:

Ing. Petr Zelený, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace

Oponent práce:

Ing. Jakub Macháček





Zadání bakalářské práce

Možnosti recyklace materiálu při 3D tisku

Jméno a příjmení: **Tomáš Reichelt**
Osobní číslo: S18000356
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra výrobních systémů a automatizace
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

Hlavním cílem této práce je provést rešerši stávajících možností recyklace materiálu při 3D tisku a stavu výzkumu v této oblasti. Dalším cílem je experimentálně ověřit kvalitu tisku dílů metodou FFF z recyklovaných materiálů

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s technologiemi 3D tisku a zařízeními v laboratořích TUL.
2. Provést analýzu současného stavu možností recyklace materiálu při 3D tisku.
3. Provést studii stavu výzkumu v této oblasti.
4. Vypracovat přehled dostupných recyklovaných materiálů pro technologii FFF, porovnat různé materiály od různých výrobců z pohledu ceny a uváděných parametrů.
5. Otestovat vybrané recyklované materiály z pohledu zpracovatelnosti na zvolené 3D tiskárně, porovnat kvalitu tisku na vhodně zvoleném tištěném dílu.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
40 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2016. ISBN 9781498714785.
2. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-40-1.
3. *Wohlers report 2019: 3D printing and additive manufacturing : state of the industry*. Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates, [2019]. ISBN 978-0-9913332-5-7.
4. ZHANG, Jing a Yeon-Gil JUNG, ed. *Additive manufacturing: materials, processes, quantifications and applications*. Oxford: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, [2018]. ISBN 978-0-12-812155-9.
5. JAYAKUMAR, Thinesh Kumar. *Testing of FLM 3D Printer*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2018. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Petr Keller.
6. FRIŠ, Daniel. *Vliv procesních parametrů na kvalitu a přesnost 3D tisku technologií FDM*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2018. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Radomír Mendřický.
7. VAŠATA, Josef. *Konstrukce a výroba zařízení pro extrudaci ABS a jiných materiálů pro 3D tiskárny*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jiří Šafka.

Vedoucí práce:

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Oponent práce:

Ing. Jakub Macháček

Datum zadání práce:

1. února 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

1. srpna 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. února 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

27. června 2021

Tomáš Reichelt

Poděkování

Chtěl bych poděkovat ing. Petru Zelenému, Ph.D. především za vedení mé bakalářské práce, přínosné rady a konzultace. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mě podporují v dobách mého studia a zejména své ženě Lence a rodičům.

Možnost recyklace materiálu při 3D tisku

Anotace

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši stávajících možností recyklace materiálu při 3D tisku a stavu výzkumu v této oblasti. Dalším cílem je experimentálně ověřit kvalitu tisku dílů metodou FFF z recyklovaných materiálů s materiály, které nejsou recyklované.

Klíčová slova: 3D tisk, Fused fabrication filament, fused deposition modeling, filament, recyklované materiály

Possibility of material recycling during 3D printing

Annotation

This bachelor's thesis aims to search the existing possibilities of material recycling in 3D printing and the state of research in this area. Another goal is to experimentally verify the print quality of FFF parts from recycled materials with non-recycled materials.

Keywords: 3D printing, Fused fabrication filament, fused deposition modelling, filament, recycled materials

1 Obsah

2	Seznam zkratek a symbolů	10
3	Úvod	11
4	Cíl Práce	11
5	Zařízení pro 3D tisk v laboratořích katedry	12
5.1	FDM/FFF/FFM – Fused deposition modeling	12
5.2	SLM – Selective laser melting	14
5.3	Multi Jet Fusion	15
5.4	Polyjet Matrix	17
6	Další technologie zmíněné v této práci	19
6.1	SLS – Selective laser sintering	19
6.2	Filabot – zařízení pro recyklaci 3D strun	20
6.2.1	Cenový rozbor jednotlivých sestav systému filabot	21
6.3	3D tisk pomocí pera Renegade	22
6.4	Výzkum u technologie FDM	24
6.5	Druhy materiálů pro FDM/FFF technologii	26
6.6	PLA (Polylactid)	26
6.7	PET (Polyethyltereftalát)	27
6.8	PETG (Polyethyltereftalát s glykolem)	27
6.9	ABS (Akronitril butadien styren)	28
6.10	NYLON PA6 (Polyamid)	28
6.11	TPU (Termoplastický polyuretan)	29
6.12	TPE (Termoplastický elastomer)	29
7	Testování vybraných recyklovaných materiálů z pohledu tisknutelnosti na vybrané 3D tiskárně	30
7.1	Testované materiály	30
7.1.1	PrintIT PLA	30
7.1.2	EKO MB rPLA	30
7.1.3	Fiberlogy HD-PLA	30
7.1.4	Fiberlogy EASY PETG	30
7.1.5	EKO MB rPETG	30
7.1.6	EKO MB rPET	30
7.2	Testovací modely	31
7.2.1	Testovací teplotní věž	31
7.2.2	Retrakční test	32

7.2.3	Test přemostění.....	32
7.2.4	Test tisku tenkých stěn.....	33
7.2.5	Testovací lodička 3D Benchy	33
7.3	Testovací tiskárna a parametry tisku.....	34
8	Celkové shrnutí testů u jednotlivých materiálů	39
8.1	Fotodokumentace provedených testů	39
8.2	Zhodnocení testů.....	39
8.3	Celkové hodnocení kvality tisku	42
8.3.1	Teplotní věž	42
8.3.2	Test přemostění.....	42
8.3.3	Retrakční test.....	42
8.3.4	Test tisku tenkých stěn	42
8.3.5	Testovací lodička 3D Benchy	43
8.3.6	Celkový součet bodů u jednotlivých materiálů	43
8.3.7	Graf kvality tisku jednotlivých materiálů.....	43
9	Závěr.....	44
10	Seznam obrázků	45
11	Seznam tabulek	46
12	Seznam grafů.....	46
13	Seznam příloh.....	46
14	Seznam použitých zdrojů.....	47

2 Seznam zkratek a symbolů

AM – Additive manufacturing (Aditivní technologie)

3D – Tří rozměrný

FDM – Fused Deposition Material

FFM – Fused filament modeling

FFF – Fused filament Fabrication

SLM – Selective Laser Sintering

MJF – Multi Jet Fusion

SLS – Selective laser sintering

PTFE – Polytetrafluorethylen

PLA – Polyactid

rPLA - Recyklovaný polyactid

HD – PLA – Hight density polyactid

PET - Polyethylenteraftalát

rPET - Recyklovaný polyethylenteraftalát

PETG – Polyethylenteraftalát + glykol

rPETG - Recyklovaný polyethylenteraftalát + glykol

PA - Polyamid

Voxel – Trojrozměrný prostor

ABS – Akronitril butadien styren

TPE – Termoplastický elastomer

TPU – Termoplastický polyuretan

PC – Polykarbonát

PVA – Polyvinylalcohol

PVC – Polyvinylchlorid

HIPS – Hight impact polystyrene

ULTEM – Polyetherimide

UV – ultrafialové

CAD – Computer aided design

CMYK - Cyan, Magenta, Yellow, and Key

DLP – Digital Light Processing

Heatblock - blok pro vedení tepla

Heatbreak - přerušení vedení tepla

Hotend - sestava komponentů FDM pro vytlačení materiálu

Dpi - dot per inch

Kč – Koruna Česká

\$ - Dolar

3 Úvod

3D technologie neodmyslitelně patří k modernímu strojírenství. Nicméně tato technologie vznikla již v 80. letech minulého století a dosud se těší velkému rozmachu a oblibě.

3D tisk lze dnes využívat nejen v průmyslu, ale i v domácnosti. Pomocí této technologie jsme schopni vyrobit v podstatě jakýkoliv díl jakéhokoliv tvaru a díky širokému spektru materiálu jsme schopni vyrábět součástky s poměrně dobrými mechanickými vlastnostmi. Tyto součásti můžeme využívat například, když potřebujeme opravit nějaký spotřebič, vyrobit něco užitečného a hlavně můžeme vyrábět prototypy výrobků.

Mezi nejvíce využívané aditivní technologie ve světě je FFF/FDM technologie, která je cenově dostupná pro domácnosti. Vše to započalo open-source projektem s názvem RepRap. Tento projekt má za úkol šířit tento koncept tiskárny zdarma komukoliv, kdo se o to zajímá. Je to především pro nadšence a nejen techniky.

Moderní 3D tiskárny se samozřejmě nalézají i na TUL v Liberci a v této práci se jimi budu také zabývat. 3D tisk byl vyvinut prvotně za účelem tisku prototypů, ale nyní proniknul i například do sériové výroby. Velkým fenoménem dnešní doby je téma recyklace, proto jsem se rozhodl zaměřit hlavně na tuto problematiku. V této práci rozeberu jednotlivé recyklovatelné materiály související s 3D tiskem. Tyto materiály testuji z hlediska tisknutelnosti a porovnávám je s materiály nerecyklovanými.

V práci jsem popsal stručně vybrané výzkumy recyklace jednotlivých materiálů, které lze v dnešní době využít.

4 Cíl Práce

Cílem práce je provést rešerši stávajících možností recyklace materiálu a vyhodnotit tisknutelnost z recyklovaných filamentů za pomoci technologií FFF (Fused Fabrication Filament) a otestovat vybrané recyklované materiály z pohledu zpracovatelnosti na zvolené 3D tiskárně, porovnat kvalitu tisku na vhodně zvoleném tištěném dílu.

5 Zařízení pro 3D tisk v laboratořích katedry

5.1 FDM/FFF/FFM – Fused deposition modeling

Principem této technologie je protahování plastové struny neboli filamentu ohřivanou tryskou topným tělesem. Tento ohřev je závislý na typu materiálu. Natavený materiál je poté nanášen do jednotlivých pozic souřadnic na tiskovou podložku, která musí být nahřátá na určitou teplotu. Materiál se díky vyhřívání podložce neodlepí, a pokud ano, tak využíváme k fixaci buď lak určený k 3D tisku, anebo lepící tyčinku.

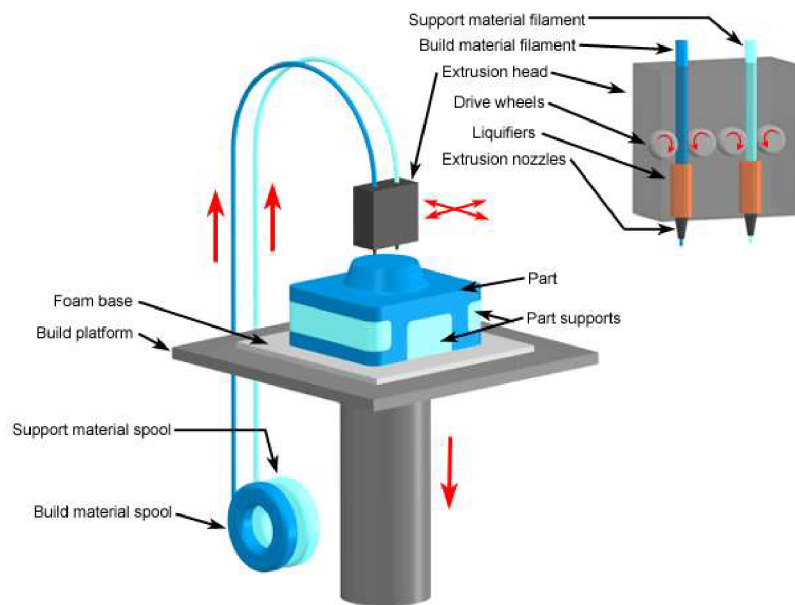
Jednotlivé pozice, kam se má materiál nanést jsou dány G kódem vygenerovaným ve sliceru. Model je nutné načíst ve sliceru ve formátu sítě s příponou stl. Slicer je program, který generuje G kódy dle daného modelu. Je to programovací jazyk CNC strojů.

Pro tisk touto metodou je důležitá poloha součástí umístěných na tiskové podložce. Důvodem je, že každá součást má po vytištění v každém směru jiné mechanické vlastnosti. [3] Pokud tiskneme složité geometrické tvary, tak musíme myslet na podpěry modelu. Tyto podpěry mohou být z jiného materiálu a jejich tvar je takový, aby se mohly jednoduše odstranit. [4]

Na tiskárnu můžeme nasadit různé typy extruderů, které mají vliv na tisknutelnost materiálů. Můžeme dělit na direct extruder a bowden extruder. U typu bowden neboli vedení PTFE trubičkou nejsme schopni tisknout elastické materiály typu TPE, TPU. [4]

Rozlišení u FFF, FDM tiskáren je dáno výškou tisknuté vrstvy, tuto výšku můžeme měnit s velikostí trysky. Platí zde úměra, že čím větší průměr trysky, tím je kratší doba tisku. Další věc, která má vliv na kvalitu jsou vodící šrouby a především dostatečně tuhý rám, proto se na 3D tiskárny montují rámy ocelové konstrukce. [2]

Velikost filamentu se volí dle typu tiskárny, a to 1,75 mm nebo 2,85 mm a vlákna nelze zaměňovat. Tato technologie využívá nejvíce materiálů ABS, PLA, PET, Nylon, TPE, ale i další pomocné materiály jako je HIPS nebo PVA. [2] Dále lze využít k tisku například PETG, kde je přítomná složka glykolu. Jedná se o modifikovaný plast a díky této složce lze oproti PET lépe tisknout z PETG. [5]



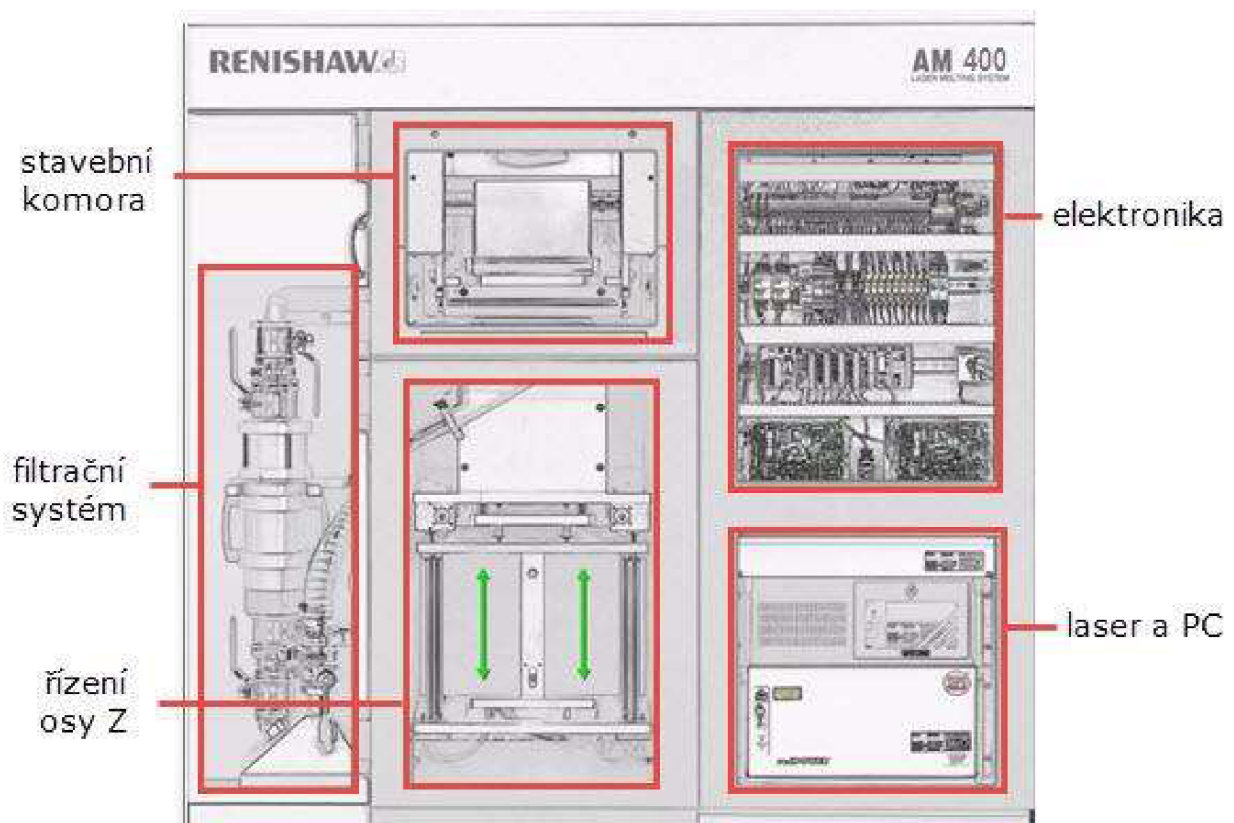
Obrázek 1. Fused deposition modeling [6]



Obrázek 2. CXI tul 3D tiskárna Fortus 450mc

5.2 SLM – Selective laser melting

Principem této technologie je soustředění paprsku laseru (CO_2), za pomoci kterého dojde k tavení jednotlivých částic kovového prášku. Tento prášek je rovnoměrně rozprostřen na základní tiskové desce, kde dochází k tavení vrstvy a posunu základní desky. Tento proces se opakuje, dokud nedojde k vytištění součásti. Kvalita tisku je spojena s výškou vrstvy. U této technologie se to pohybuje v rozmezí od 20 do 100 mikrometrů a volíme ji podle použitého práškového kovu. Například pro korozivzdornou ocel je tato výška vrstvy okolo 50 mikrometrů. Abychom zajistili kvalitu tisku, tak musíme tisknout v ochranné atmosféře. Před zahájením procesu je prostor tiskárny uveden do vakua. Následně je prostor zaplněn argonem nebo dusíkem. Plyn volíme na základě zpracovávaného materiálu, kde tento plyn vytlačuje zbytkový kyslík v komoře. Zařízení jako u každé jiné technologie je nutno před tiskem seřídit. Myšlena je především kalibrace základní desky. Po vytištění součásti je nutnost odstranit přebytečný prášek, který se smete vnitřním vedením do nádob určených pro manipulaci s práškem. Přebytečný prášek se musí z tiskového prostoru vysát speciálním vysavačem s mokrým odlučovačem. Speciální vysavač je zapotřebí z důvodu rizika vdechnutí kovového prášku. Navíc u některých kovů je další riziko vznícení, proto obsluha při práci musí s tímto práškem manipulovat opatrně. Po dokončení tisku je součást pevně spojena s deskou, proto ji musíme později oddělit od této desky. Oddělení probíhá například za pomoci pásové pily. Lze zvolit i jiný způsob oddělení. Použitý kovový prášek lze přesít v prosévacím zařízení a znovu použít. Metoda tisku SLM nám umožňuje vyrobit součásti složitých tvarů, kterých bychom konvenčním způsobem nedocílili. Mohou to být například korunky zubů, tenké zubní implantáty. [7,8]



Obrázek 3. Schéma zařízení Renishaw AM400 [8]



Obrázek 4. Generativní laserové tavicí zařízení SLM 280HL

5.3 Multi Jet Fusion

Tato technologie využívá nanášení teplotosné černé barvy na tiskový prášek, který je umístěn uvnitř tiskového prostoru. Prášek se v přítomnosti této barvy za použití infračerveného paprsku zahřívá. Dochází ke spékání jednotlivých vrstev materiálu. Jednou z výhod této tiskárny je, že se jedná o poměrně rychlou technologii. Přičemž při tisku je každou sekundu vystřeleno okolo 300 milionů mikronu kapek tavicí látky. Kromě tavicích činidel můžeme využívat činidla určena k přeměně vlastností v jednotlivých voxelích. Díky těmto voxelům jsme schopni tisknout barevně, a to například s činidly obsahující azurové, purpurové, žluté nebo černé (CMYK) barvivo. Bohužel tiskárnu, která může tisknout barevně TUL v Liberci nevlastní. Na univerzitě je tiskárna, která se zaměřuje na mechanické vlastnosti a produktivitu. Jedná se o profesionální tiskárnu HP 3D 4200. [9,10]

Velkou výhodou této technologie je, že po vytištění je objekt izotropní. Pevnost součástí není závislá na směru. Jedná se o jednu z nejrychlejších aditivních technologií, kde lze tisknout více než 3 cm za hodinu. Například u metody SLS se pohybujeme rychlostmi okolo 1 cm za hodinu. Rozlišení tisku v ose X-Y je kolem 1200 dpi. [9,10]

Za pomoci této technologie jsme schopni tisknout například materiály PA11 (Nylon), PA12, PA12 GB (Polyamid Glass bead), Estane 3D TPU M95A, TPA. [9,10]

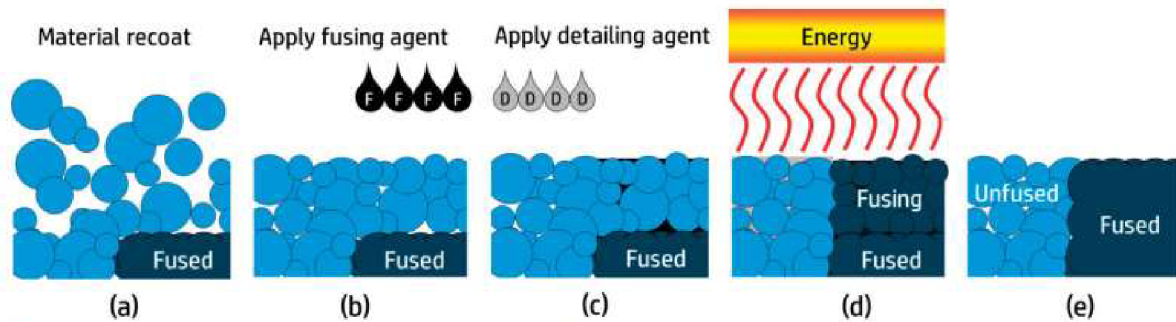
Na TUL v Liberci se tiskne pouze z prášku PA12. Je to dáno tím, že kdyby se měnil materiál za jiný, tak by se muselo cca 40 Kg prášku vyhodit, a to z důvodu čištění jednotlivých dopravních cest prášku a prvotního míchání. Jednoduše by to bylo cenově náročné. Proto, když chceme tisknout z více typů materiálu, bylo by dobré disponovat více procesními stanicemi (tiskárnami). Bylo by to levnější. Tiskárna se musí po každé výměně materiálu kalibrovat a řádně očistit od předchozího materiálu.

Výhody

- Velká přesnost
- Možnost režimu rychlého tisku
- Izotropní materiál
- Dobré mechanické vlastnosti vytištěného dílů [10]

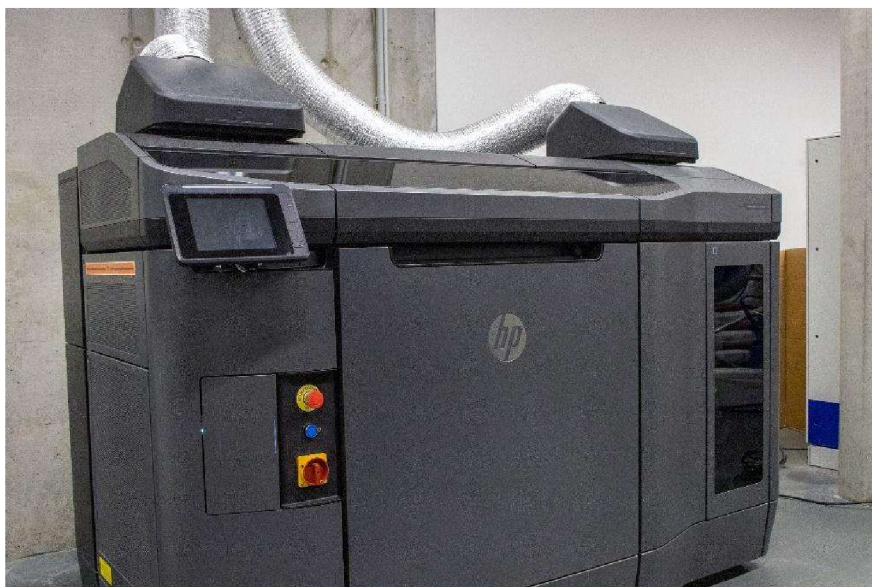
Nevýhody

- Počáteční investice [10]



- Materiál se znovu nanáší přes celou pracovní oblast.
- Tam, kde má dojít ke ztavení částic, je selektivně aplikováno tavní činidlo (F).
- Tam, kde se má zredukovat nebo zesílit tavení, je selektivně použito činidlo pro povrchovou úpravu (D). V tomto příkladu činidlo pro povrchovou úpravu sníží tavení na hranici, aby vznikl díl s ostrými a hladkými hranami.
- Pracovní oblast je vystavena tavní energii.
- Díl nyní tvoří ztavené a neztavené oblasti.

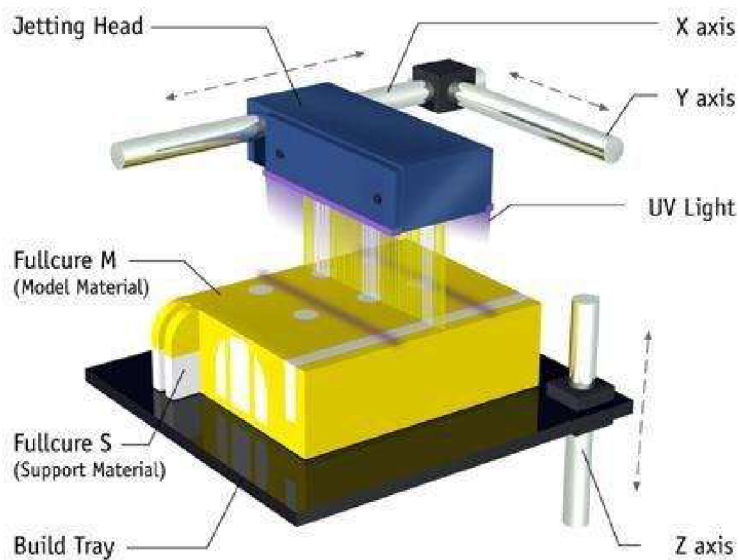
Obrázek 5. Multi Jet Fusion – princip [10]



Obrázek 6. 3D tiskárna HP MJF 4200

5.4 Polyjet Matrix

Jedná se o technologii, která byla původně patentována izraelskou firmou Objet Geometries LTD. Od roku 2012 je tato značka pod firmou Stratasys. Je to technologie, která využívá k tiskovému procesu resiny. Resin je kapalina, kterou převádíme do pevného skupenství za pomoci UV záření. Tento způsob využívá nanášení jednotlivých vrstev resinu do tiskového prostoru, kde jak již bylo zmíněno je tento resin okamžitě vytvrzen pomocí UV záření. Můžeme tisknout z různých typů resinů, které mají odlišně mechanické a celkově fyzikální vlastnosti. Lze tisknout barevné, čiré, pružné nebo pevné materiály. Tato technologie vyniká výbornou tiskovou kvalitou. Má velké využití například v lékařství, módě, filmovém průmyslu, ale i ve strojírenství. [11,12,25]



The Objet PolyJet Process

Obrázek 7. PolyJet Matrix [11]



Obrázek 8. 3D tiskárna Object 500 Connex



Obrázek 9. 3D tiskárna J750

6 Další technologie zmíněné v této práci

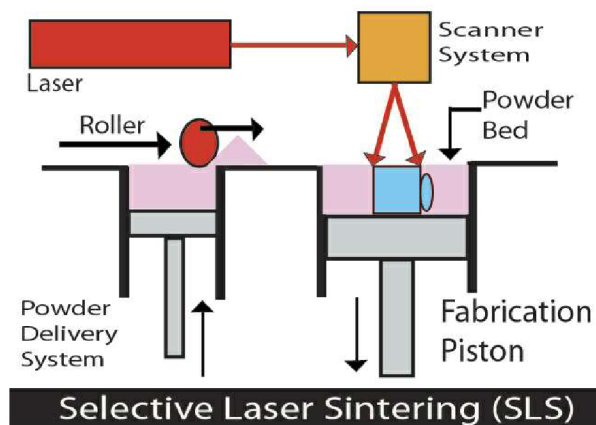
6.1 SLS – Selective laser sintering

Chtěl bych zde uvést další technologii 3D tisku, která patří mezi jednu z nejvíce využívanou na světě. Jedná se o technologii SLS neboli Selective laser sintering (SLS). Vedle technologie MJF je tato technologie hodně nasazována v průmyslu. Je to dokonalý nástroj pro prototypování výrobků, kde jsme schopni vyrobit poměrně přesný tvar součásti s podobnými mechanickými vlastnostmi jako později u výrobku vyrobeného metodou vstřikování. [13]

U této technologie lze k tisku využívat polymerů, kovů, keramiky a různých kompozitů. Materiál je dodáván ve formě prášku přímo do tiskárny, kde je tento prášek v jednotlivých vrstvách pomocí CO_2 laserového paprsku spékán. Na základě CAD dat se zde vytváří tvar požadované součástky. Výška nanášených vrstev je okolo 0,12 mm. [13,14]

Principem této technologie, jak již bylo naznačeno, je distribuce plastového prášku za pomoci válečku ze zásobníku do natavované komory s pohybujiícím se pístem. Tento váleček srovná materiál do roviny, ve které je prášek za vysokých teplot natavován pomocí laseru, který soustředí paprsky do jednoho místa v X-Y souřadnicích. Pohybujiící se píst zajišťuje vytváření geometrie v Z souřadnici. Po dokončení tisku musíme součástku očistit od prášku a případně povrchově upravit. [15,16]

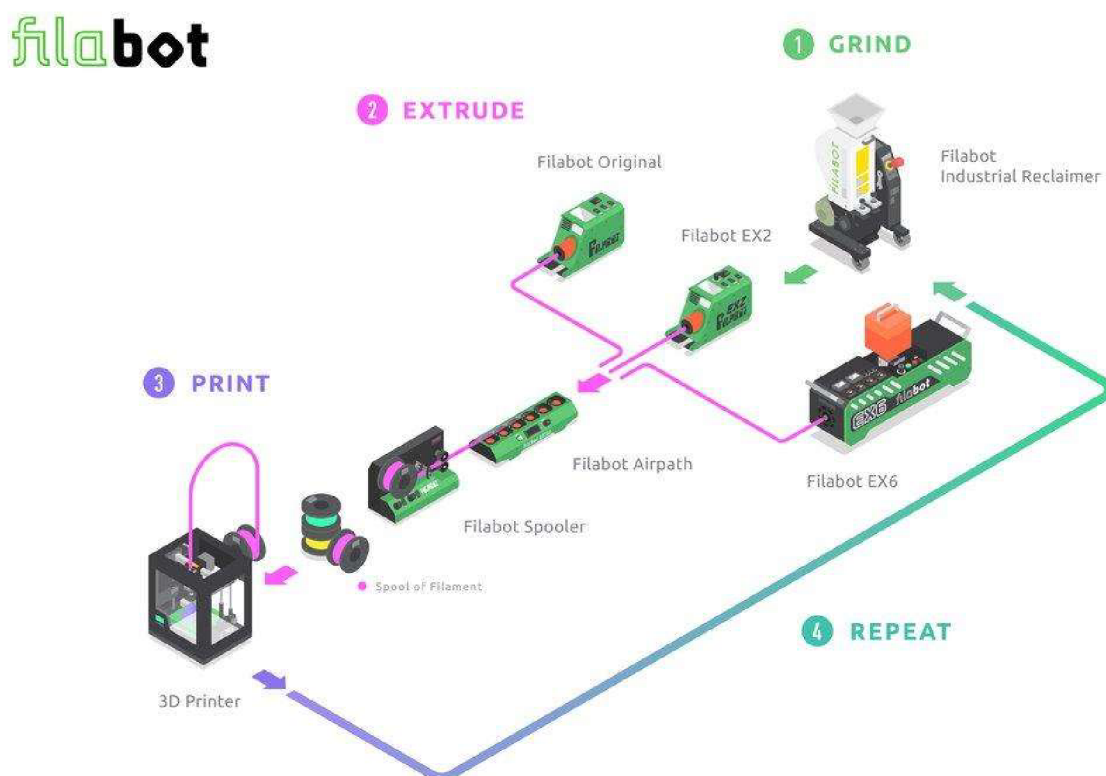
Plastový prášek u této technologie by měl být správně použit pouze jednou, ale kvůli úspoře tiskového materiálu tento prášek recyklujeme. [16]



Obrázek 10. Selective Laser Sintering [17]

6.2 Filabot – zařízení pro recyklaci 3D strun

Jedná se o systém, za pomoci kterého jsme schopni vyrábět tiskovou strunu, a to z granulátu nebo rozdrčeného plastového materiálu v jakémkoliv drtiči. Pokud se rozhodneme materiál recyklovat, tak je nutné zajistit jeho čistotu. Jako vstup používáme částice, které by podle výrobce neměly být průměrem větší než 3 mm. Pro extruder typu Filabot EX2 jsou pro extruzi doporučené materiály PLA, ABS, HIPS, ULTEM, PC a naopak je zakázáno používat materiál PVC. Pro každý typ plastu jsou doporučené teploty extruze, které můžeme najít v příloženém návodu Filabotu. Tento extruder má spotřebu okolo 400-600 W a lze na něm vyrábět filamentsy o průměru 3 mm, 2.85 mm a 1.75 mm. Vyrobitelné průřezy jsou dány tryskou extruderu, kterou lze dle potřeby měnit. Filabot je systémem, který využívají významné společnosti jako například NASA, DU PONT, XEROX, LEGO, Intel a další. [26,27]



Obrázek 11. Filabot system [26]

6.2.1 Cenový rozbor jednotlivých sestav systému filabot

Typ	Rychlost výroby [Kg/h]	Cena [USD]	Cena [Kč]
EX2 Extruder setup	0.91 Kg/h	\$5 826	125 626 Kč
EX6 Extruder setup	4.5 Kg/h	\$13 926	300 286 Kč
Kurz ke dni 22. 6. 2021 - 21,56 Kč za \$1			

Tabulka 1. Cenový rozbor výroby materiálu [29,30,60,61]



Obrázek 12. Filabot EX2 Extruder Setup [29]



Obrázek 13. Filabot EX6 Extruder Setup [30]

6.3 3D tisk pomocí pera Renegade

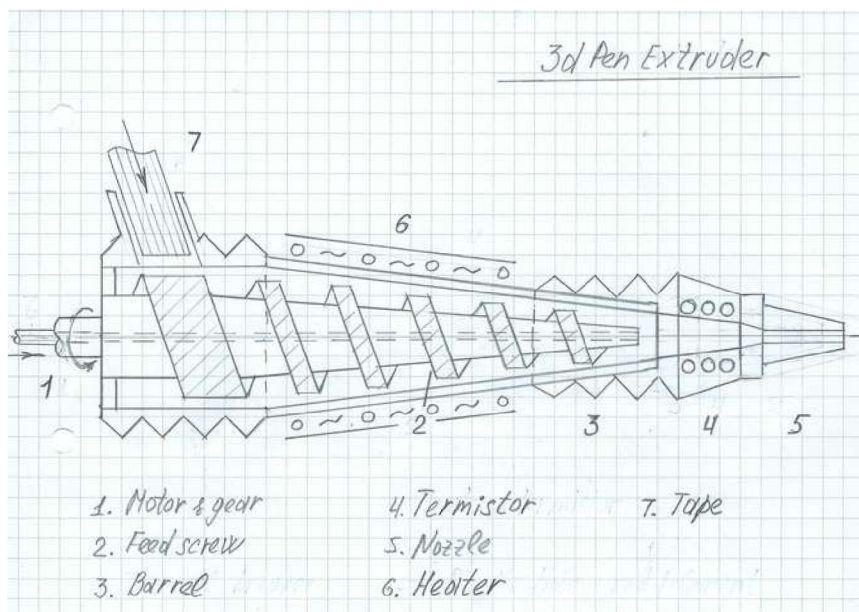
Jedná se o metodu 3D tisku za pomoci pera, které je plněno odříznutým pásem z PET lahvi. Plastový pás by měl mít konstantní šířku, kterou zajistíme za pomoci jednoduchého řezacího zařízení ChupaCut, který umožňuje dělat pásy o šířce 3,6,9 a 12 mm. Do pera lze vložit pásek o šířce v rozmezí 5 – 7 mm a tloušťce od 0,14 do 0,35 mm. Dále do pera můžeme jako náplně použít filament o průměru 1,75mm. Vhodné materiály, které lze použít do Renegade jsou PLA, ABS, Nylon, TPE, HIPS, Wood, ale i další. Pero Renegade využívá výkonného elektromotoru, převodovky a šneku. Tyto komponenty zajišťují konstantní vytlačování. Samozřejmě je nastavitelná rychlost a teplota vytlačování, která se pohybuje v rozmezí okolo od 50°C do 320°C. [31]

Tento systém byl vyvinut v roce 2016, kdy se autor rozhodl tento projekt zahájit na základě toho, že nebyl spokojen s cenou filamentu v té době. Dle autora byla dříve cena filamentu okolo \$200 - \$250 v přepočtu se jedná o částku kolem 4300 – 5400 Kč za kg. Dnes se cena filamentu pohybuje okolo 350 Kč za kg. Cena tohoto pera, za kterou byl tento autor pero ochotný prodat, byla okolo \$100 v přepočtu 2156,3Kč. Další z příslušenství, které pero nabízí je stojan a navíjecí cívky na plastový pás pro lepší dávkování. [31]

Dnes si však můžeme pořídit pera od různých výrobců, a to mnohem levněji. Může tomu být kupříkladu pero od značky Makerfactory, u kterého lze tisknout z PLA, ABS, PCL. Dále stojí za zmínku 3D pera z Číny od neznámé značky, které lze pořídit ještě levněji než pero od Makerfactory, tato pera jsou většinou schopny tisknout pouze z PLA. Bohužel tyto pera nejsou konstruované na recyklovaný pás z PET lahvi. Materiál musí být vždy filament o průměru 1,75 mm. Samozřejmě lze použít recyklovaný filament. Cenový rozbor jednotlivých variant můžeme vidět v tabulce č. 2. [62,63]

Výrobce	Materiály náplní	Cena
Renegade	PLA, ABS, Nylon, TPE, HIPS, Wood	2156,3 Kč
Makerfactory	PLA, ABS, PCL	1290 Kč
Čínské pero	PLA	215,63 Kč
Kurz ke dni 22. 6. 2021 - 21,56 Kč za \$1		

Tabulka 2. Cenový rozbor 3D Per [31,62,63]



Obrázek 14. Princip 3D pera Renegade [31]



Obrázek 15. Tisk pomocí 3D pera Renegade [31]



Obrázek 16. 3D pero Makerfactory [62]

6.4 Výzkum u technologie FDM/FFF

Co se týče recyklace materiálu, tak u těchto technologií je velké spektrum materiálů, které lze recyklovat. Materiály jdou přeměnit na tiskovou strunu do tiskáren, které jsou schopny tisknout z filamentu. Důkazem může být například firma Canon, která se zabývá recyklací PC-ABS a HIPS ze starých zařízení, a to především kopírek a tiskáren. Přičemž PC-ABS je materiál, který vyniká odolností proti teplu a má dobré mechanické vlastnosti. Dalším zmíněným materiálem je HI-PS (High Impact Polystyrene sheet), který je vhodný na tisk podpěr. [18]

Další ze společností, o které bych se rád zmínil, je společnost RECREUS (RECYCLE CREATE USE). Tato společnost se zabývá výrobou recyklovaného materiálu TPU, který je získán z obuvi. Jako u jiných metod recyklace je nutné zajistit čistotu materiálu a před samotnou recyklací odstranit z materiálu nečistoty (výrobce píše především o kovech). Následně je materiál rozdrčen a přetvořen na filament. Doporučené tiskové nastavení tohoto materiálu je 220°C-235°C teplota trysky, 50°C-60°C teplota tiskové podložky s rychlostí tisku okolo 20-60mm/s. [19]



Obrázek 17. RECREUS Filament [19]

Další ze skupiny výrobců recyklovaného materiálu je firma EKO MB s.r.o., od které zároveň testuji materiál rPET. Tento materiál je vyráběn z PET lahví, kde je dbáno na čistotu vstupního materiálu. Materiál je následně rozdrčen a přetvořen na filament na extruzní lince, kde kromě rPET vyrábí i rPETG a rPLA. Recyklovanými filamenti se zabývají i jiní výrobci, a to například společnost Fiberlogy. [20,21]

U společnosti Fiberlogy lze koupit samostatně filament bez cívky, který lze upevnit na vytištěnou cívku Masterspool (obrázek č. 18). Jsou zde i jiné alternativy, které se dají zdarma stáhnout například na portálu <https://www.thingiverse.com/> (obrázek č. 19). Je to řešením, kde odřízneme jednu stranu cívky společnosti Fiberlogy a nalisujeme na oba protikusy cívky vytištěné závitové vložky. [22]



Obrázek 18. Masterspool [23]



Obrázek 19. Závítová vložka na cívce Fiberlogy [24]

6.5 Druhy materiálů pro FDM/FFF technologii



Obrázek 20. Druhy materiálů pro FDM včetně povrchových úprav [38]

6.6 PLA (Polyacid)

Jedná se o materiál s velkým využitím u technologií FDM/FFF. Je to biologicky odbouratelný a rozložitelný sacharid o velké pevnosti. Tisk probíhá za poměrně nízkých teplot. Teplota trysky tisku tohoto materiálu je okolo 175°C (může být vyšší). Při teplotách nad 60°C výtisky začínají ztrácet mechanické vlastnosti a nejsou vhodné pro venkovní využití, interiér automobilu v létě, atp.. Velká výhoda tohoto materiálu je, že na rozdíl od reaktoplastu zde nedochází k tak velké degradaci materiálu, proto lze tento materiál opakovaně zahřívat. Navzdory tomu, že je tento plast zdravotně nezávadný, tak není doporučeno vyrábět produkty, pomocí kterých se lidé stravují. Mezi výhody spojené s tímto materiálem patří poměrně snadný tisk s dobrou kvalitou drobných detailů, vhodný na tisk velkých modelů, tvrdý, houževnatý a nedeformuje se. [32,33,34]

U dílů vytištěných z tohoto materiálu můžeme dále dělat povrchové úpravy. Je doporučeno mokré broušení pod vodou, aby se materiál vlivem tření nenatavil. Materiál je nutno uskladňovat v suchém prostředí, protože mezi vlastnosti tohoto materiálu patří absorpce vlhka.[34]

Materiál PLA lze recyklovat. Touto recyklací se zabývá firma EKO MB s.r.o., Fiberlogy, FormFutura a 3DJake. [35,36,37]

6.7 PET (Polyethyltereftalát)

Tento materiál byl prakticky nahrazen za materiál PETG, který se díky této složce výrazně lépe tiskne a má podobné vlastnosti jako je PET. Jedná se o materiál, který se dnes už skoro nepoužívá, protože tisk z tohoto materiálu je velmi obtížný. Je to dáno především jeho navlhavostí. Z důvodu vysoké navlhavosti tohoto materiálu musí být materiál před tiskem vysušen a nejlépe skladován v suchém prostředí. Kdyby nebyl PET vysušen, tak se nám při tisku mohou objevovat při vytlačování struny bublinky na tisknutém modelu. Je to dáno odpařováním vody z vlhkého filamentu. Jednou z variant skladování PET je v uzavřeném boxu, a to za přítomnosti silicagelu. Tento materiál lze tisknout jen na určitých nebo upravených tiskárnách. Šance najít obchodníka, který nerecyklovaný PET v podobě filamentu prodává, je minimální. Teplota trysky, aby bylo možné materiál tisknout, se pohybuje okolo 230°C (u každého výrobce je udávána jiná teplota). Mezi značky PET filamentu se řadí například Verbatim, MadeSolid, Innofil (dnes nejsou tyto filamenty skoro k dostání). Cena tohoto filamentu od značky Verbatim za doby, kdy se ještě dal jednoduše koupit, se pohybovala okolo 4000 Kč. Momentálně ke dni 24. 6. 2021 lze zakoupit v pakistánském e-shopu za 2200 Kč. [40,41,43]

Materiál PET je známý především díky výrobě PET lahví. Na základě toho, že tohoto materiálu je kolem nás hodně, se firma EKO MB s.r.o. rozhodla tento materiál recyklovat. V podobě filamentu distribuovat do komunity 3D tiskařů. Při výrobě recyklovaného filamentu je důležitá čistota plastů, aby výrobek měl zaručené mechanické vlastnosti, které jsou podobné novému PET materiálu. Tisková teplota trysky recyklátu rPET od této značky se pohybuje okolo 270°C. [35,44]

Proces recyklace v bodech:

- 1) Výkup plastů
- 2) Třídění a dekontaminace
- 3) Drcení (zpracování)
- 4) Následná výroba filamentu [35]

6.8 PETG (Polyethyltereftalát s glykolem)

Oproti klasickému PET je tento materiál s obsahem glykolu, který se přidává do PET během výrobního procesu. Díky tomu materiál vykazuje menší křehkost a je snadnější pro tisk. [40]

Nízká tepelná roztažnost zajišťuje při tisku větších modelů, že se objekt nekrotí a snadno se sundává po vychladnutí vyhřívané podložky. PETG je houževnatý materiál, tak akorát pružný. Při namáhání se častokrát dočasně prohne a nepraskne. Shrnuto, že materiál má vysokou teplotní odolnost, je snadný pro tisk, má malou smršťivost a je mechanicky odolný. Využívá se pro tisk mechanicky namáhaných součástí. Materiál bohužel stringuje, zanechává na modelu jemná vlákna a pro tisk mostů se spíše nedoporučuje. Dnes je tento materiál náhradou za klasický PET. Je to jeden z oblíbenějších materiálů. [38,41]

Materiál lze recyklovat, kde se touto recyklací zabývá více výrobců. Mezi ně se řadí například EKO MB s.r.o., 3DJake, Filamentive, Re-Pet3D, ale i další. [39,45,46,47]

6.9 ABS (Akronitril butadien styren)

Materiál s výbornými mechanickými vlastnostmi, a to díky obsahu syntetického kaučuku, kdy je vhodný pro vnitřní i venkovní použití. Jedná se o termoplast, který může být opakovaně roztaven, aniž by došlo k znehodnocení materiálu. Tento materiál má vyšší teplotu tavení a je odolnější proti chabnutí při vystavení slunci např.: v autě. Výtisky nevykazují známky deformace až do 98°C. Materiál je odolný proti opotřebení a nárazům. [48]

Mezi nevýhody tohoto materiálu patří například nepříjemný zápach při tisku, proto je důležité, aby místnost, ve které tiskneme, byla odvětrávaná. Dále má velkou tepelnou roztažnost, proto je to materiál, který komplikuje tisk. Vytištěná součást se může kroutit, proto je dobré tiskárnu zakrytovat. [48]

Na tomto materiálu lze provádět povrchové úpravy jako například vyhlazení acetonovými parami, které vytištěnou součástku vyhladí, tak že nejsou vidět jednotlivé vrstvy tisku. [48]

Recyklací tohoto materiálu se minulosti zabývala holandská společnost ReFil, která vyráběla ABS filament z použitých přístrojových desek aut. V současné době se tento materiál již neprodává. [49,50,51]

Mimo jiné můžeme nalézt jedince, kteří tento materiál recyklují z tiskového odpadu. Materiál nejdříve roztřídí, nadrtí, za pomoci extruzní linky vytvoří filament, který namotávají na cívku. [52]

6.10 NYLON PA6 (Polyamid)

Jedná se o materiál, který má velice dobré mechanické vlastnosti s dobrou chemickou odolností. Nevýhodou tohoto materiálu je, že se musí tisknout při vysokých teplotách extruderu 250 – 280°C a teplotě tiskové podložky 80-100°C. Rychlost tisknutí by se měla pohybovat okolo 40-70mm/s. Tento materiál je vhodný pro tisk mechanicky namáhaných součástí, jako jsou například ozubená kola, různé přípravky, atp. Polský výrobce Spectrum Group Sp. z o.o. prodává tento produkt za přibližnou cenu 1040 Kč za 1 Kg. [53,54]

Recyklací tohoto materiálu se zabývá společnost Fishy Filaments, která recykluje použité rybářské sítě, kde životnost právě těchto sítí je okolo 3-6 měsíců. Nylon určený pro recyklaci může být trochu slaný a obsahovat kousky mořských řas. Nejedná se tak o úplně čistý materiál. [54]



Obrázek 21. Druhy materiálů pro FDM včetně povrchových úprav [54]

6.11 TPU (Termoplastický polyuretan)

Jedná se o materiál, který je pružný a má je soudržný v jednotlivých vrstvách. Má dobrou přilnavost k tiskové podložce. Vzhledem k vlastnostem materiálu tiskneme na texturovanou podložku nebo za použití separační vrstvy (tyčinkové lepidlo). U tisku jakýchkoliv pružných materiálů musíme mít tiskárnu, která je schopna tisknout tyto materiály. Jedná se zpravidla o tiskárny, které mají direct drive extruder. Materiál je odolný proti otěru, s vysokou chemickou odolností, minimální smrštitvosti a kroucení. Z tohoto materiálu se tisknou RC pneumatiky, části bot, tisková razítka. Rychlost tisku je doporučena okolo 30-40 mm/s. Teplotu tisku je potřeba nastavit okolo 220-240°C, podložky 50-60°C. [57]

Jak již bylo v práci zmíněno recyklací TPU se zabývá společnost Recreus, ale i například Reciflex. Jedná se o recyklaci materiálu z vyřazené obuvi. [19,55]

6.12 TPE (Termoplastický elastomer)

Stejně jako TPU se jedná o pružný materiál, který je těžký pro tisk, vhodný pro zkušenější tiskaře. Tento filament nám umožňuje tisknout pružné díly. Jedna ze společností, která tento filament vyrábí je Fillamentum. Jedná se o materiál, který má při tisku s dobrou přilnavost jednotlivých vrstev, je odolný proti otěru, s vysokou pevností v tahu a hlavně jak již bylo řečeno je to pružný materiál. Oproti TPU je tento materiál měkčí. Teplota tisku se pohybuje kolem 210°C-260°C, podložky od nenahřáté - 110°C. Tisková rychlost by se měla pohybovat okolo 5-30 mm/s. [56,57,59]

Recyklací tohoto materiálu se zabývá společnost TreedFilaments, která recykluje automobilové pneumatiky. Z jedné pneumatiky lze získat okolo 500g filamentu. Recyklace probíhá klasickým procesem, a to drcením, extruzí na extruzní lince spolu s namotáním na cívku. [58]

7 Testování vybraných recyklovaných materiálů z pohledu tisknutelnosti na vybrané 3D tiskárně

7.1 Testované materiály

7.1.1 PrintIT PLA

Materiál jsem vybral, protože se jedná o materiál, který je obecně oblíbený a využívaný v komunitě tiskařů. Tento materiál má podle výrobce odchylku průřezu do $\pm 0,02$ mm a hlavně je precizně navinut na cívku. Je vhodný pro tisk větších modelů, protože má nízkou míru smrštivosti. [64]

Doporučená teplota trysky $215^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ a teplota podložky $50^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. [64]

7.1.2 EKO MB rPLA

Materiál je vyráběn českou společností Eko MB s.r.o. a jedná se o materiál, který má dle výrobce odchylku v průměru $1,75 \text{ mm} \pm 0,05$ mm. Dle výrobce by se měl materiál před tištěním vysušit v troubě při teplotě 55°C po dobu 3 hodin. Skelný přechod materiálu je 65°C a teplota tání 180°C . [65]

Doporučená teplota trysky $195\text{-}215^{\circ}\text{C}$ a teplota podložky $0\text{-}60^{\circ}\text{C}$. [65]

7.1.3 Fiberlogy HD-PLA

Materiál, který lze použít za náhradu za ABS. Vytisknutý model lze vyžít v troubě čímž získá teplotní odolnost jako ABS. Materiál se žihá za teploty 80°C po dobu 15 min. Dle výrobce má tento materiál toleranci průměru $\pm 0,02$ mm a kruhovitosti $\pm 0,01$ mm. Doporučená hodnota sušení před tiskem 50°C po dobu 4 hodiny. [66]

Doporučená teplota trysky $200\text{-}230^{\circ}\text{C}$ a teplota podložky $50\text{-}70^{\circ}\text{C}$. [66]

7.1.4 Fiberlogy EASY PETG

Materiál je mechanicky, chemicky odolný. Glykol zajišťuje, aby materiál tolik nestrigoval. Dle výrobce má tento materiál toleranci průměru $\pm 0,02$ mm a kruhovitosti $\pm 0,01$ mm. Doporučená hodnota sušení před tiskem 60°C po dobu 4 hodiny [28]

Doporučená teplota trysky $230\text{-}250^{\circ}\text{C}$ a teplota podložky 90°C . [28]

7.1.5 EKO MB rPETG

Jedná se o materiál, který má dle výrobce odchylku v průměru $1,75 \text{ mm} \pm 0,05$ mm. Vyrobený z recyklátu PET-G, kdy se jedná o upravenou verzi PET, kde dochází k přidání modifikovaného glykolu. Materiál je chemicky odolný a lze jej znovu recyklovat. [39]

Doporučená teplota trysky $225\text{-}245^{\circ}\text{C}$ a teplota podložky $70\text{-}100^{\circ}\text{C}$. [39]

7.1.6 EKO MB rPET

Materiál, který má dle výrobce odchylku v průměru $1,75 \text{ mm} \pm 0,05$ mm. Je vhodný pro zkušené tiskaře, protože je velmi náročný na tisk. Má velmi dobré mechanické vlastnosti, odolává křivu a je dlouhodobě použitelný do 100°C , krátkodobě do 130°C , odolává účinkům kyselin a zásad vyjma silných hydroxidů, výborná rozměrová stálost, bohužel náchylný na absorpci vlhkosti. [68]

Doporučená teplota trysky $250\text{-}270^{\circ}\text{C}$ a teplota podložky $70\text{-}100^{\circ}\text{C}$. [68]

Materiál	Cena [Kč/Kg]
PrintIT PLA	559
EKO MB rPLA	449
Fiberlogy HD-PLA	1021,2
Fiberlogy EASY PETG	602,35
EKO MB rPETG	439
EKO MB rPET	349

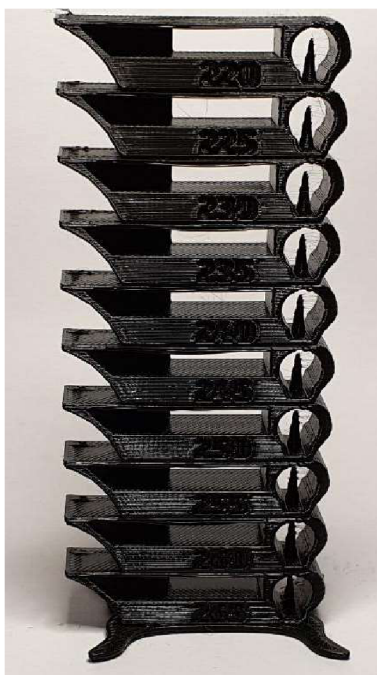
Tabulka 3. Cenový rozbor jednotlivých filamentů [39,64,65,67,68,70]

7.2 Testovací modely

Pro testování jsem zvolil 5 základních testů pro porovnání zpracovatelnosti materiálů na 3D tiskárně a především pro porovnání tisknutelnosti, na které se můžeme podívat v příloze č. 1.

7.2.1 Testovací teplotní věž

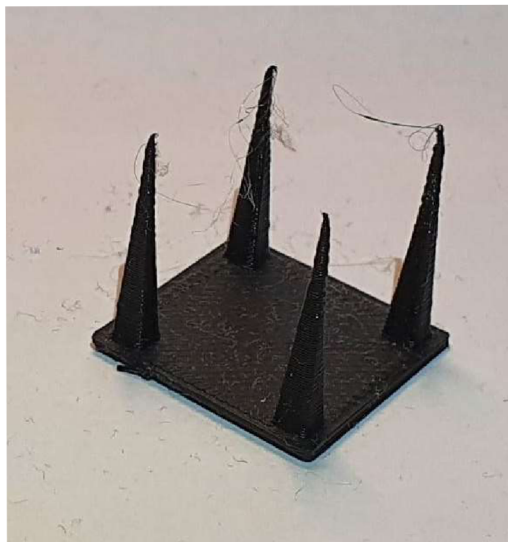
U tohoto testu porovnáváme vliv teploty tisku na přemostění, stringování, tisk pod úhlem a oblouků. Je to test, u kterého zjišťujeme nejvhodnější tiskovou teplotu. Zvolenou teplotu volím i pro ostatní testování. Rozměry této teplotní věže jsou 47,7x28,2x62 mm pro PET, 47,7x28,2x101,4 mm pro PETG a 47,7x28,2x101,4 mm pro PLA.



Obrázek 22. Testovací věž

7.2.2 Retrakční test

U tohoto testu porovnááme vliv teploty, rychlosti, vzdálenosti retrakce a detrakce. Protože je důležité, aby materiál nevytékal z trysky. Vytékáním materiálu z trysky nám způsobuje chlupatost modelu, materiál stringuje. Je to nežádoucí jev. Jedná se o jeden z nejdůležitějších testů. Velikost testovacího modelu je 20x20x20 mm.



Obrázek 23. Retrakční test

7.2.3 Test přemostění

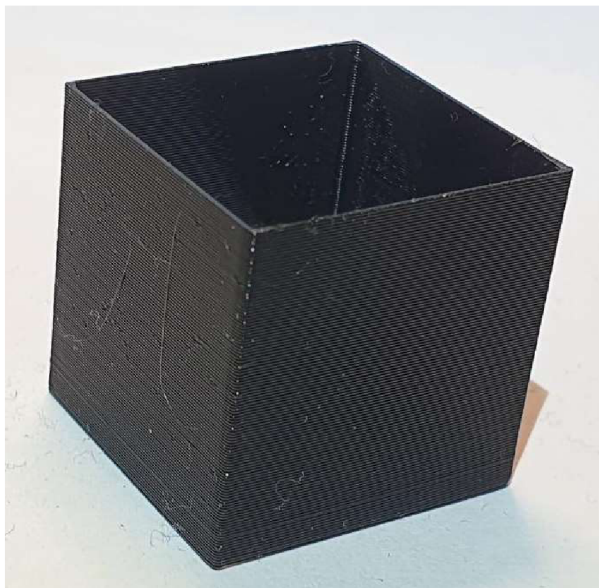
U tohoto testu sledujeme, na jakou vzdálenost o dvou podporách jsme schopni tisknout most v rovině. Pro tento účel jsem využil modelu, který má za úkol vyzkoušet přemostění od 20 mm do 160 mm.



Obrázek 24. Test přemostění

7.2.4 Test tisku tenkých stěn

Úkolem tohoto testu je porovnat soudržnost jednotlivých vrstev materiálu u tisku tenkostěnných modelů. Model byl vygenerován v Prusasliceru. Jedná se o kostku o velikosti strany 22,5 mm bez horní a spodní vrstvy s 0% výplní, pouze s 1 perimetrem stěny.



Obrázek 25. Test tisku tenkých stěn – 1 perimetr

7.2.5 Testovací lodička 3D Benchy

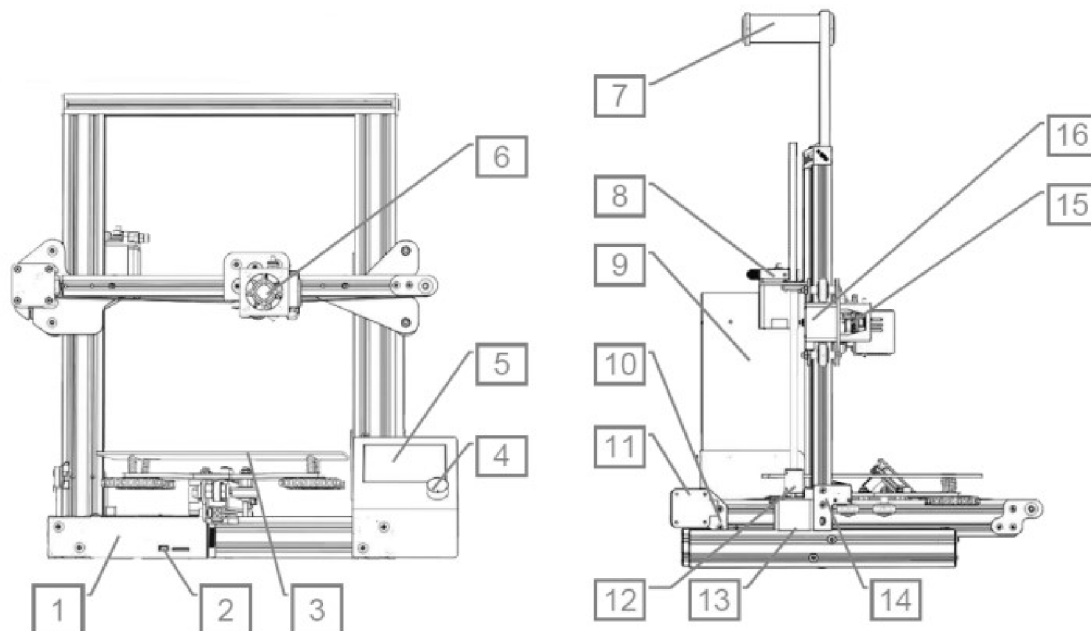
Tato lodička byla vyvinuta pro první tisk na tiskárně. Jedná se o kalibrační model, který znázorňuje, zda máme dobře nastavenou tiskárnu. Tento model může být použit i pro porovnávání různých materiálů. U této lodičky budeme pozorovat především optickou kvalitu tisku. Velikost lodičky je 60x31x48 mm.



Obrázek 26. Testovací lodička 3D Benchy

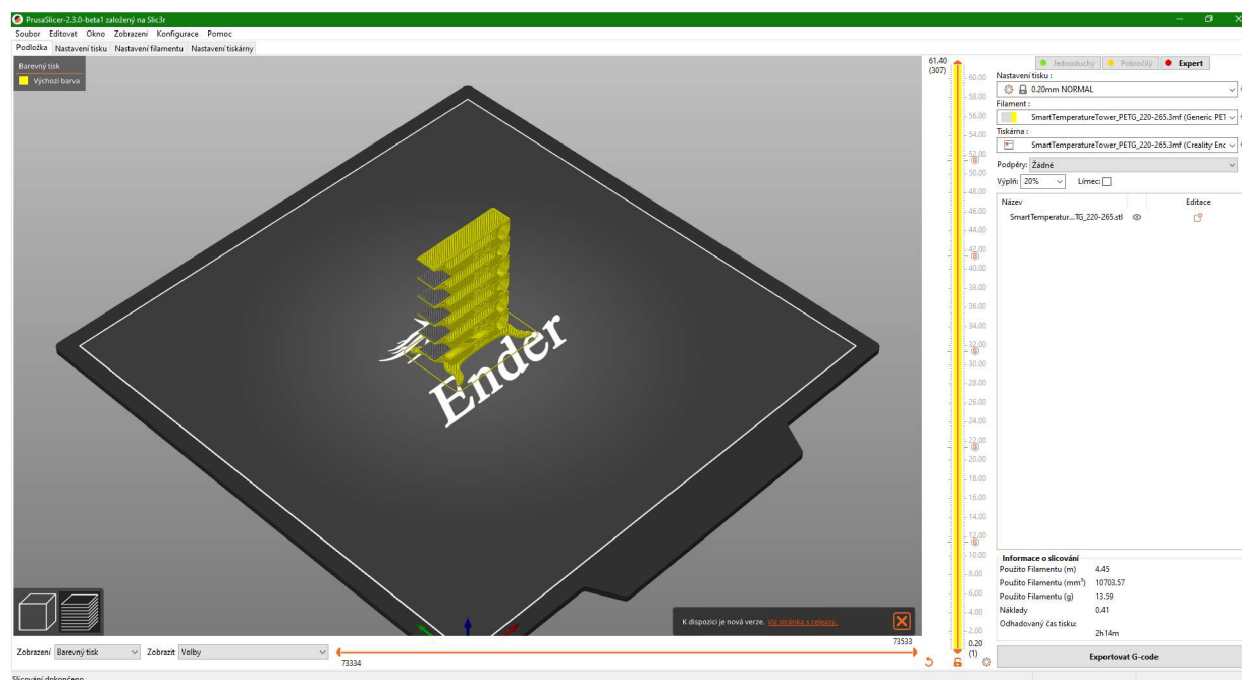
7.3 Testovací tiskárna a parametry tisku

Pro testování jsem si zvolil tiskárnu Ender 3 Pro, kterou jsem si pro tyto účely testování zakoupil. Pro tisk využívám programu Prusaslicer, který programuje a převádí jednotlivé kroky na G-code, jedná se o programovací jazyk tiskárny. Na obrázku č. 26 můžete vidět popis této tiskárny a na obrázku č. 27 Prusaslicer.



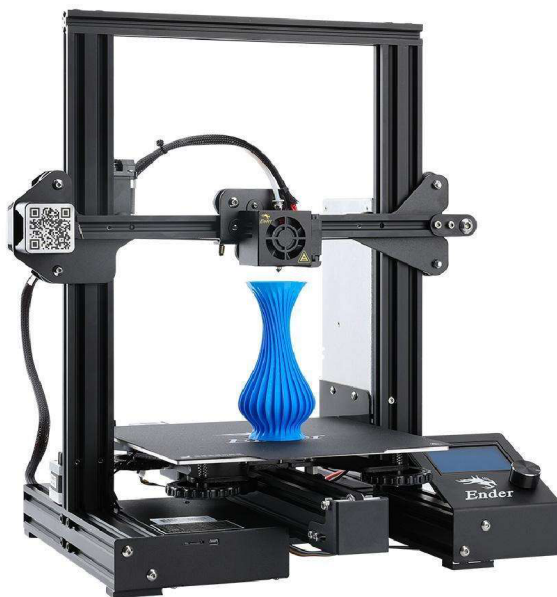
- | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 1. Řídicí jednotka | 5. Displej | 9. Napájení | 13. Z motor |
| 2. SD a USB Port | 6. Hotend | 10. Y endstop | 14. Z endstop |
| 3. Tisková plocha | 7. Držák filamentu | 11. Y motor | 15. X endstop |
| 4. Ovládání | 8. Motor extruderu | 12. Spojení Z tyče | 16. X motor |

Obrázek 27. Popis 3D tiskárny Ender 3 pro [41]



Obrázek 28. Program Prusaslicer

Při tisku prvních vzorků s touto tiskárnou jsem zjistil, že tato tiskárna tiskne dobře materiály PLA, PETG i rPET. U tisku s hotendem typu MK8, který je v základu s tiskárnou Ender 3 Pro a u materiálů, kde je potřeba vyšší teploty tisku trysky se časem nalepoval materiál na vnitřní stěnu PTFE trubičky. Docházelo tak k občasnému ucpávání hotendu, a to mělo za důvod nekvalitu tisku z pohledu občasného vynechávání extruze. Je tedy potřeba tuto trubičku čas od času zkracovat. Neupravenou tiskárnu s bowdenovým vedením, které zajišťuje PTFE trubička, můžete vidět na obrázku č. 29. Bowden má délku různou, avšak může to být kolem 40 cm. Ještě před samotným testováním jsem zkoušel tisknout rPET s neupravenou tiskárnou. U tiskárny jsem pro tisk nastavil maximální teplotu trysky a zvolil v Prusasliceru nastavení tisku pro PETG. Byl jsem až překvapen, jak skvělý výtisk se povedl (obrázek č. 29). Oproti tisku s Direct drive extruderem, který rozebírám níže, byl tisk mnohem tišší. Tato tiskárna nemá v základu zpřevodovaný extruder.

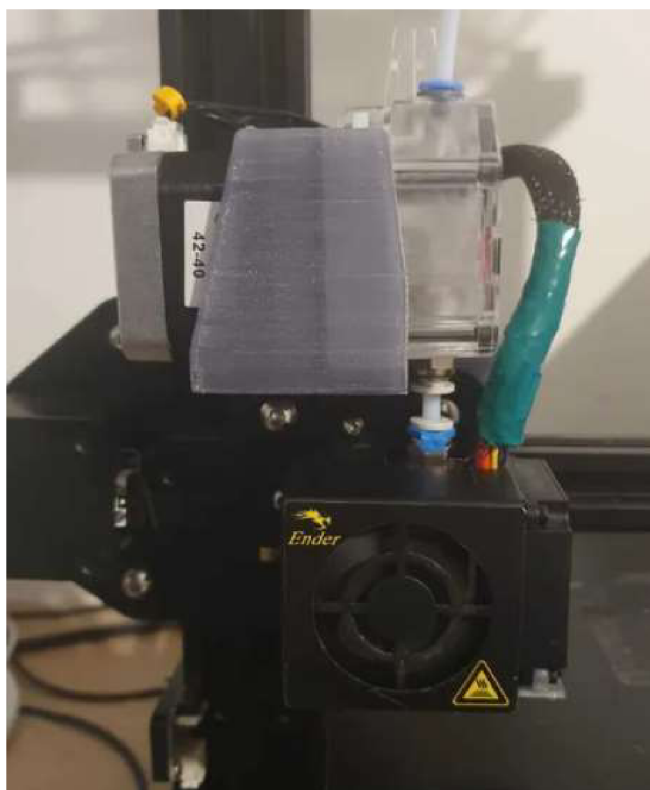


Obrázek 29. Creality Ender 3 PRO [70]



Obrázek 30. Vytiskněný model na neupravené tiskárně

U tiskárny není v základu dobře vyřešený extruder filamentu. Občas se stávalo, že materiál z důvodu malého přitlaku na filament v extruderu prokluzoval, proto jsem tiskárnu osadil Dual drive extruderem (obrázek č. 31), který dostatečný přitlak na filament zajišťuje. Dual extruder jsem nainstaloval přímo nad hotend MK8. Jednalo se o úpravu direct drive. U tohoto řešení jsem testoval optimální nastavení retrakce pro materiály HD-PLA a rPET (příloha č. 1). V této příloze můžeme pozorovat, jak jednotlivé parametry ovlivňují samotný tisk z hlediska stringování. Materiál rPET je tisknutelný hůře a je vhodný pro zkušenější tiskaře. U každého z těchto dvou materiálů zkoumáme rychlost, vzdálenost retrakce a detrakce. Při stejně nastavených hodnotách pro rPET při tisku z HD-PLA docházelo k odtržení materiálu v hotendu, tzn. materiál nereaguje na retrakci, projevuje se stringováním.

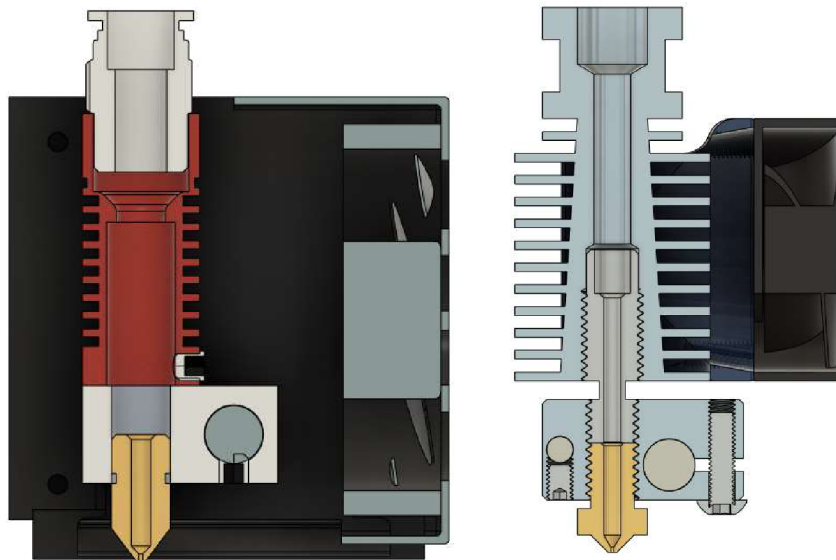


Obrázek 31. Direct dual drive extruder verze 1

Tiskárnu jsem se nakonec rozhodl vylepšit hotendem V6 (obrázek č. 32) s vylepšeným chlazením hotendu a trysky. Lepší chlazení trysky má za následek kvalitnější tisk mostů a menší stringování. Nevýhodou je hlučnější tiskárna. Hotend V6 jsem vsadil do klonu BMG dual drive extruderu. K hotendu V6 jsem dokoupil lepší teplotní senzor NTC 100k termistor ATC Semitec 104GT-2/104NT-4-R025H42G, který zajišťuje přesnější měření teploty v heatblocku. Původní 100kΩ senzor nebyl tak přesný. Tento typ tiskové hlavy můžeme pozorovat u tiskárny značky Průša typu MK3S. Rozhodl jsem se při testování vycházet v nastavení z hodnot retrakce pro tiskárnu MK3S. Jedná se především o přenastavení rychlosti retrakce na 35 mm/s, vzdálenosti vtažení materiálu do hotendu 0,8mm pro PLA a 1,4 pro PETG. Toto nastavení bylo na základě zkušeností vyvinuto firmou Prusa Research a.s.. Rozdíly mezi hotendy MK8 a V6 jsou na obrázku č. 32. Dalším z upgradu tiskárny senzor pro snímání rovinnosti podložky 3DTouch.

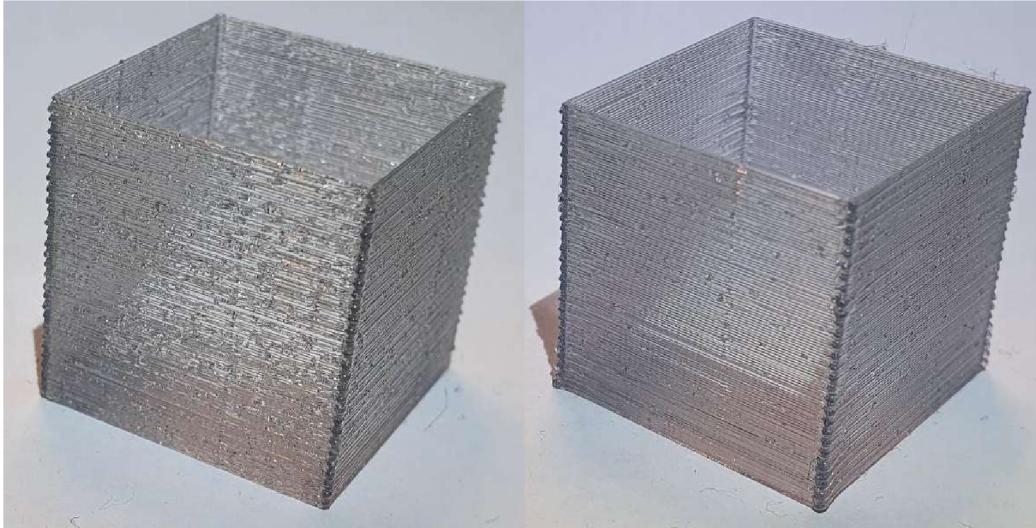


Obrázek 32. Hotend V6 na tiskárně Ender 3 Pro



Obrázek 33. Vlevo hotend MK8 a vpravo hotend V6

Z důvodu navlhavosti jednotlivých materiálů je nutné materiály tisknout vysušené. Vlhkost, kterou absorbují časem ze vzduchu, se může při tisku v důsledku vysokých teplot tisku v hotendu odpařovat. Toto způsobuje tisk modelu, kde se objevují jednotlivé bublinky (obrázek č. 34) a vytištěný model se tak stává křehkým. Proto každý z výrobců doporučuje materiál vysušit. Pro tyto účely nám může posloužit například horkovzdušná trouba, sušička ovoce nebo k tomu speciálně určené zařízení. Materiál doporučuji skladovat v suchu. Pro mé účely posloužily boxy se silikagelem (obrázek č. 35).



Obrázek 34. Vlevo vlhký rPET, vpravo vysušený rPET



Obrázek 35. Skladovací box se silikagelem

8 Celkové shrnutí testů u jednotlivých materiálů

8.1 Fotodokumentace provedených testů

V příloze č. 2 si lze prohlédnout detailní fotografie všech testů.

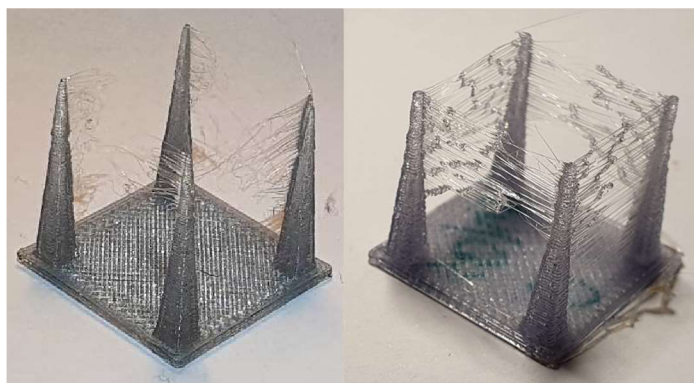
8.2 Zhodnocení testů

U filamentu HD – PLA značky Fiberlogy můžeme pozorovat na obrázku č. 36, že tento materiál má dobré vlastnosti tisku při celém doporučeném teplotním rozsahu výrobce 200 - 225°C (hodnota 230°C byla vynechána z měření). Pro teploty pod 200°C je vidět na modelu teplotní věže, že jednotlivé vrstvy filamentu se nepropojují a dochází tak k tištění křehkého modelu. S poklesem teploty se materiál dostatečně netaví a dochází k ucpání hotendu.



Obrázek 36. HD-PLA teplotní věž

U testů můžeme také pozorovat jemná vlákna (stringování), kde tento jev může způsobovat buď špatně vysušený filament, vysoká teplota tisku, anebo to ovlivňuje nastavení retrakčních hodnot. Nejvíce se tento jev objevoval u materiálu rPET. Na obrázku č. 37 můžeme tyto jemná vlákna pozorovat, kde v levé části jsou retrakční hodnoty nastaveny tak, aby materiál vytékal co nejméně. Naopak pravá část obrázku nám ukazuje odlišný extrém, kde hodnoty pro retrakce jsou špatně nastavené.



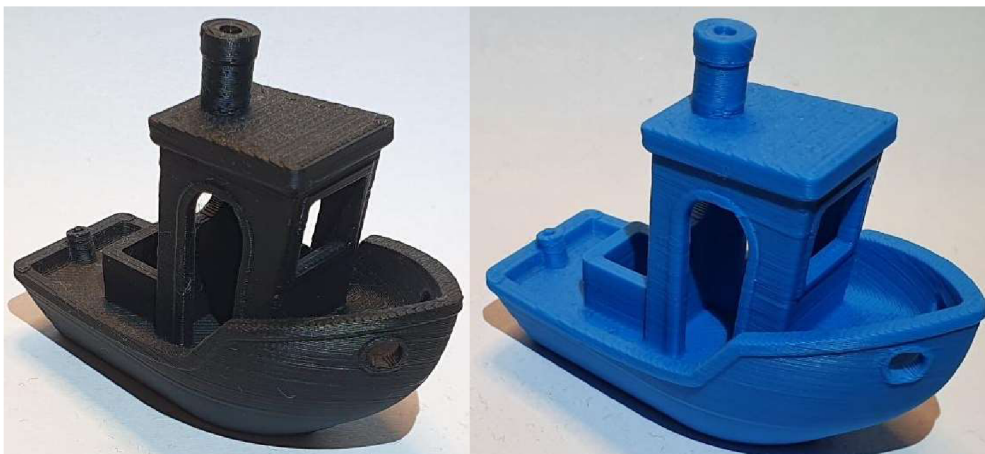
Obrázek 37. Vytékání materiálu z trysky (stringování) - rPET

Filament byl skladován v místnosti s vlhkostí vzduchu 45% a teplotou 25°C (měřeno bimetalovým teploměrem obr. č. 38).



Obrázek 38. Bimetalový teploměr (ilustrační foto)

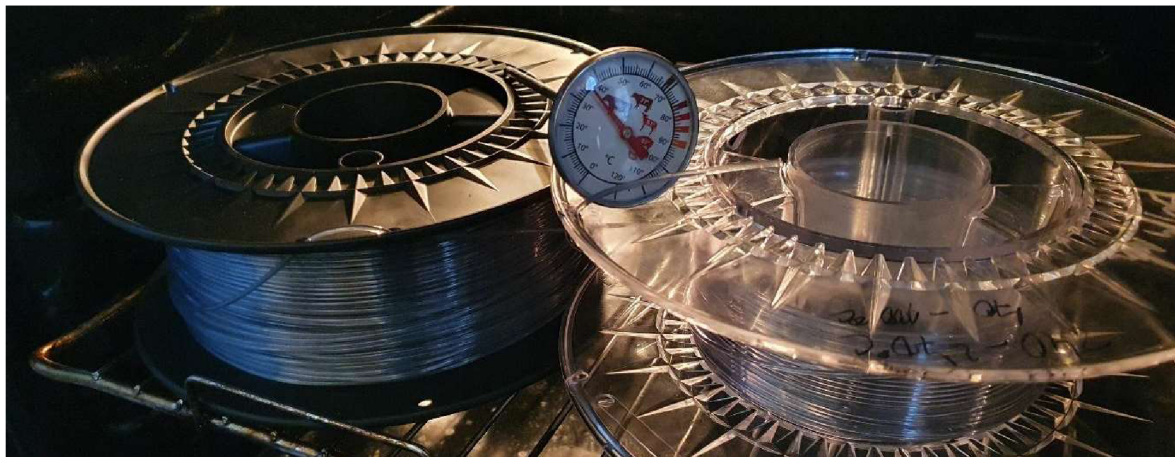
Při tisku jednotlivých testovacích modelů bylo zjištěno, že všechny materiály PLA mají velmi podobné až stejné tiskové vlastnosti. Hodně velkým překvapením byl materiál od EKO MB, který byl lepší v testech přemostění a na retrakce. Při tisku přemostění se u rPLA neoddělovaly perimetry od modelu jako tomu bylo v případě PLA a materiál skoro vůbec nestringoval. Při tisku testovacích lodiček je u materiálu PLA od PRINT IT, Fiberlogy je vidět oproti rPLA na modelu mezi jednotlivými vrstvy jednodušší povrch. Dle mého názoru je to způsobené lepší výrobní tolerancí v průřezu filamentu, kde výrobce PRINT IT udává $\pm 0,02$ oproti rPLA $\pm 0,05$. Tisk tenkých stěn dopadl srovnatelně.



Obrázek 39. Vlevo PLA, vpravo rPLA - 3D Benchy

Materiály PETG a rPETG od značek Fiberlogy a EKO MB měly srovnatelné vlastnosti ve všech disciplínách. Při tisku u stejného nastavení ve sliceru se chovaly stejně.

Materiál rPET od značky EKO MB oproti PETG a rPETG se musel tisknout při vyšší teplotách, retrakčních rychlostech a větší retrakční vzdálenosti, a to z důvodu zmenšení stringování. Je však nutné říci, že pro tento materiál musíme mít vhodně upravený hotend, aby materiál šel vůbec tisknout. Extruder při zvolených hodnotách retrakce, a to rychlosti 50/40 mm/s a vzdálenosti 5 mm byl trochu hlučnější. Tyto hodnoty jsem zvolil na základě svých zkušeností a poznatků z původní verze dual drive extruderu. Na stringování bohužel nepomohlo ani vysušení materiálu, kdy jsem se snažil zmenšit rychlost a vzdálenost retrakce. Ačkoliv jsem materiál sušil v troubě při 50°C po dobu 8 hodin (obrázek č. 40). Je možné, že to bylo málo. Materiál rPET nedoporučuji pro tisk na takto upravené tiskárně. Věřím však, že na jiných typech tiskáren lze z tohoto materiálu tisknout bez problémů.



Obrázek 40. Sušící proces materiálu

8.3 Celkové hodnocení kvality tisku

Protože se jedná o testy kvality tisku, tak mnou hodnocené testy jsou bodovány od 1 do 10 bodů. V následujícím grafu je posuzována tisknutelnost k finančnímu aspektu materiálu.

8.3.1 Teplotní věž

Teplotní věž	
Materiál	Získané body
PrintIT PLA	8
EKO MB rPLA	8
Fiberlogy HD-PLA	9
Fiberlogy EASY PETG	7
EKO MB rPETG	7
EKO MB rPET	6

Tabulka 4. Vyhodnocení teplotní věž

8.3.2 Test přemostění

Test přemostění	
Materiál	Získané body
PrintIT PLA	7
EKO MB rPLA	8
Fiberlogy HD-PLA	8
Fiberlogy EASY PETG	2
EKO MB rPETG	2
EKO MB rPET	1

Tabulka 5. Vyhodnocení test přemostění

8.3.3 Retrakční test

Retrakční test	
Materiál	Získané body
PrintIT PLA	9
EKO MB rPLA	10
Fiberlogy HD-PLA	9
Fiberlogy EASY PETG	6
EKO MB rPETG	7
EKO MB rPET	7

Tabulka 6. Vyhodnocení retrakční test

8.3.4 Test tisku tenkých stěn

Test tisku tenkých stěn	
Materiál	Získané body
PrintIT PLA	10
EKO MB rPLA	10
Fiberlogy HD-PLA	10
Fiberlogy EASY PETG	9
EKO MB rPETG	8
EKO MB rPET	7

Tabulka 7. Vyhodnocení test tisknu tenkých stěn

8.3.5 Testovací lodička 3D Benchy

Testovací lodička 3D Benchy	
Materiál	Získané body
PrintIT PLA	9
EKO MB rPLA	7
Fiberlogy HD-PLA	9
Fiberlogy EASY PETG	10
EKO MB rPETG	10
EKO MB rPET	3

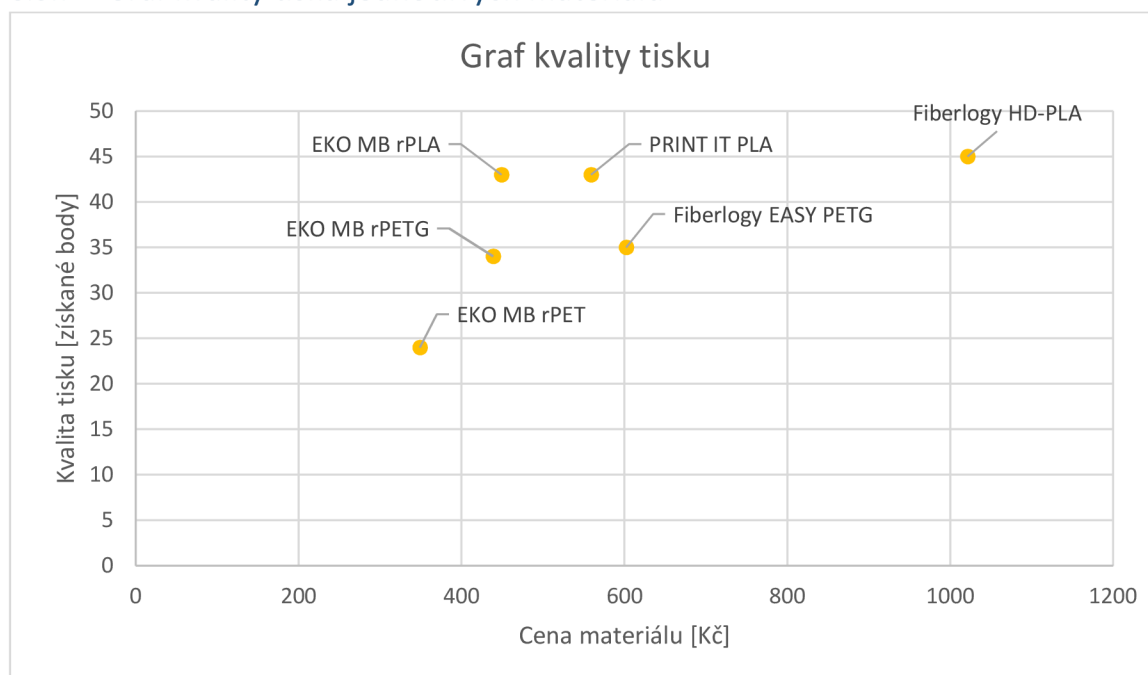
Tabulka 8. Vyhodnocení testovací lodička 3D Benchy

8.3.6 Celkový součet bodů u jednotlivých materiálů

Výsledek testu tisknutelnosti	
Materiál	Získané body celkem
PrintIT PLA	43
EKO MB rPLA	43
Fiberlogy HD-PLA	45
Fiberlogy EASY PETG	35
EKO MB rPETG	34
EKO MB rPET	24

Tabulka 9. Celkové vyhodnocení

8.3.7 Graf kvality tisku jednotlivých materiálů



Graf 1. Graf kvality tisku vztahující k ceně materiálu

V tomto grafu lze vidět, že recyklované materiály jsou srovnatelné kvalitou tisku s materiály novými. Použitím recyklovaných filamentů při větších tiskových objemech, tak dokážeme znatelně snížit náklady na tisk.

9 Závěr

Jedním z úkolů této bakalářské práce bylo provést rešerši stávajících možností recyklace materiálů pro účely 3D tisku. Po důkladném zkoumání jsem zjistil, že možnosti recyklace tady jsou. Existují různé společnosti, které jsou schopni recyklovat velké objemy všech možných materiálů, jako jsou například PLA, PETG, PET, ABS, NYLON, TPU a TPE. Pro účely recyklace se využívají extruzní linky, a protože zde existují linky, které nejsou drahé, tak se jedná o dostupné zařízení. Jsme tedy schopni vyrábět vlastní recyklovaný filament v podstatě i doma, a to z jakéhokoliv materiálu, který lze na extruzní lince vyrábět. Pokud disponujeme materiálem, který lze pro účely 3D tisku recyklovat, tak se jedná o ekologické řešení, díky kterému jsme schopni snížit náklady tisku.

Dalším úkolem této práce bylo experimentálně ověřit kvalitu tisku recyklovaných materiálů na tiskárně FFF. Pro tento účel byla zvolena tiskárna Ender 3 Pro, kterou jsem pro tisk upravil. Jednalo se především o úpravy, které zajistily tisknutelnost recyklátu rPET, který má doporučené vyšší teploty tisku. Zjištěním těchto testů bylo, že pokud je filament z recyklovaných materiálů kvalitně vyrobený, tak lze tisknout ve stejné kvalitě jako s materiály nerecyklovanými. Materiály rPLA a rPETG, měly srovnatelné výsledky s PLA, HD-PLA a PETG. Filament od EKO MB rPET, jsem bohužel nemohl srovnávat s nerecyklátem, protože filament z PET byl dnes kvůli obtížnosti tisknutelnosti nahrazen materiálem PETG. Mohu jen potvrdit, že z rPET se netisklo úplně nejlépe. Překvapilo mě však, že před úpravou tiskárny se při prvotní zkoušce tisku modelu, který sloužil mým účelům v domácnosti, materiál u bowdenové tiskárny tiskl lépe než u tiskárny s direct drive úpravou. Důvodem mohlo být buď mnou špatně nastavené tiskové hodnoty ve Sliceru, anebo již zmiňovaný zpřevodovaný extruder. Ačkoliv rPET nemá nejlepší vlastnosti pro tisk, tak musíme brát v potaz, že tento materiál má také své přednosti. Když budeme potřebovat tisknout předmět, který by svými vlastnostmi měl být chemicky, teplotně a mechanicky odolný, tak bych zvolil tisk právě z tohoto materiálu. Pro tisk z rPET bych však volil jinou tiskárnu, která se s tímto materiálem lépe vypořádá.

Shrnutím této bakalářské práce je, že tiskovou kvalitu nám ovlivňuje především tiskárna, kterou vlastníme a jednotlivé tiskové parametry ve sliceru. Při stejných podmínkách se tiskovou kvalitou recyklované filamenty rPLA a rPETG od již jmenovaného výrobce EKO MB výrazně nelišily od nerecyklátů.

Pokud je recyklovaný materiál vyroben kvalitně a na kvalitní extruzní lince a za předpokladu zajištění čistoty materiálu. Tak můžeme materiál bez obav k tisku používat.

Tato práce může být hodnotná pro ty, kteří využívají FFF technologii, protože se dozví o možnostech recyklace materiálů pro účely 3D tisku. Tyto možnosti mohou následně implementovat například do své výroby. Tato bakalářská práce by mohla navazovat na zpracování jiných materiálů pro účely tisku na vlastní extruzní lince, které nemají dosud žádné využití a následně otestovat, zda jsou tisknutelné.

10 Seznam obrázků

Obrázek 1. Fused deposition modeling [6]	13
Obrázek 2. CXI tul 3D tiskárna Fortus 450mc	13
Obrázek 3. Schéma zařízení Renishaw AM400 [8]	14
Obrázek 4. Generativní laserové tavicí zařízení SLM 280HL.....	15
Obrázek 5. Multi Jet Fusion – princip [10].....	16
Obrázek 6. 3D tiskárna HP MJF 4200.....	16
Obrázek 7. PolyJet Matrix [11]	17
Obrázek 8. 3D tiskárna Object 500 Connex.....	18
Obrázek 9. 3D tiskárna J750	18
Obrázek 10. Selective Laser Sintering [17]	19
Obrázek 11. Filabot system [26].....	20
Obrázek 12. Filabot EX2 Extruder Setup [29]	21
Obrázek 13. Filabot EX6 Extruder Setup [30]	21
Obrázek 14. Princip 3D pera Renegade [31]	23
Obrázek 15. Tisk pomocí 3D pera Renegade [31]	23
Obrázek 16. 3D pero Makerfactory [62]	23
Obrázek 17. RECREUS Filament [19]	24
Obrázek 18. Masterspool [23].....	25
Obrázek 19. Závitová vložka na cívce Fiberlogy [24].....	25
Obrázek 20. Druhy materiálů pro FDM včetně povrchových úprav [38]	26
Obrázek 21. Druhy materiálů pro FDM včetně povrchových úprav [54]	28
Obrázek 22. Testovací věž	31
Obrázek 23. Retrakční test	32
Obrázek 24. Test přemostění	32
Obrázek 25. Test tisku tenkých stěn – 1 perimetr.....	33
Obrázek 26. Testovací lodička 3D Benchy.....	33
Obrázek 27. Popis 3D tiskárny Ender 3 pro [41].....	34
Obrázek 28. Program Prusaslicer	34
Obrázek 29. Creality Ender 3 PRO [70].....	35
Obrázek 30. Vytisknutý model na neupravené tiskárně	35
Obrázek 31. Direct dual drive extruder verze 1	36
Obrázek 32. Hotend V6 na tiskárně Ender 3 Pro.....	37
Obrázek 33. Vlevo hotend MK8 a vpravo hotend V6.....	37
Obrázek 34. Vlevo vlhký rPET, vpravo vysušený rPET	38
Obrázek 35. Skladovací box se silikagelem.....	38
Obrázek 36. HD-PLA teplotní věž	39
Obrázek 37. Vytékání materiálu z trysky (stringování) - rPET	39
Obrázek 38. Bimetalový teploměr.....	40
Obrázek 39. Vlevo PLA, vpravo rPLA - 3D Benchy	40
Obrázek 40. Sušící proces materiálu	41

11 Seznam tabulek

Tabulka 1. Cenový rozbor výroby materiálu [29,30,60,61]	21
Tabulka 2. Cenový rozbor 3D Per [31,62,63]	22
Tabulka 3. Cenový rozbor jednotlivých filamentů [39,64,65,67,68,70]	31
Tabulka 4. Vyhodnocení teplotní věž	42
Tabulka 5. Vyhodnocení test přemostění	42
Tabulka 6. Vyhodnocení retrakční test.....	42
Tabulka 7. Vyhodnocení test tisknu tenkých stěn.....	42
Tabulka 8. Vyhodnocení testovací lodička 3D Benchy	43
Tabulka 9. Celkové vyhodnocení	43

12 Seznam grafů

Graf 1. Graf kvality tisku vztažený k ceně materiálu	43
--	----

13 Seznam příloh

Příloha č. 1. Retrakční testy první varianty Dual extruderu (celkem 2 listy)

Příloha č. 2. Fotodokumentace jednotlivých testů (celkem 18 listů)

14 Seznam použitých zdrojů

- [1] FDM 3D PRINTING TECHNOLOGY IN MANUFACTURING COMPOSITE ELEMENTS. *Archives of metallurgy and materials* [online]. 2013, **2013**(58), 4 [cit. 2020-07-17]. DOI: 10.2478/amm-2013-0186. Dostupné z: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-09aa96d2-9dc4-4cae-bd09-e57b2cc16e66/content/partContents/545e2abd-98ef-3f79-8999-4f5bf37c6fdc>
- [2] WALLACH, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [3] *TECHNICKÝ LIST: Prusament PLA od Prusa Polymers*. Prusa Pol, JersS Praha a S eskh repuglika, 2018 [cit. 2020-08-01], 2 s. Dostupné také z: https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA_TechSheet_CZE.pdf
- [4] The concept of the material supply system in 3D printer using a wear FDM material. *Mechanik* [online]. 2018, **91**(7) [cit. 2020-07-21]. DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.78>. Dostupné z: http://www.mechanik.media.pl/pliki/do_pobrania/artykuly/22/2018_07_s0543_eng.pdf
- [5] PRUSA POLYMERS. *Prusament PETG*. Praha, 2021. Dostupné také z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [6] *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. Scottsdale, Arizona: CustomPartNet, 2008 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [7] BEDNÁR, Petr. ZPRACOVÁNÍ PODKLADŮ PRO NÁVRH OBJEMOVÝCH A PLOŠNÝCH STRUKTUR. *Faculty of Mechanical Engineering* [online]. Brno University of Technology, 2013, , 2 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69391#:~:text=Za%20C5%99%C3%ADzen%C3%AD%20vyu%C5%BE%C3%ADvaj%C3%ADc%C3%AD%20metodu%20SLM%20dok%C3%A1%C5%BEou,zubn%C3%ADch%20implant%C3%A1t%C5%AF%20nebo%20korunek%20zub%C5%AF.
- [8] PLAGÁČ, Marek. *Začínáme s 3D tiskem kovů #2:: Technologie 3D tisku kovů (SLM)* [online]. Výstaviště 405/1, 603 00 Brno: Vydavatelství Nová média, 23. 11. 2016 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/> [9] HP Multi Jet Fusion. In: *3 Faktur* [online]. Moritz-von-Rohr Str. 1A, Jena: 3Faktur, 2020 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://3faktor.com/en/3d-printing-materials-technologies/hp-multi-jet-fusion-technology-overview/>
- [10] *Uživatelská příručka: Tiskové řešení HP Jet Fusion 4200 3D* [online]. In: . [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <http://h10032.www1.hp.com/ctg/Manual/c05671706.pdf>
- [11] MANTADA, Phaneendra, Radomir MEDRICKY a Jiri SAFKA. PARAMETERS INFLUENCING THE PRECISION OF VARIOUS 3D PRINTING TECHNOLOGIES. *MM Science Journal* [online]. 2017, (5), 2004-2012 [cit. 2020-09-01]. DOI: 10.17973/MMSJ.2017_12_201776. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/december-2017/articles/parameters-influencing-the-precision-of-various-3d-printing-technologies>

- [12] *What is PolyJet 3D Printing Technology | Smooth, Multi-Material Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Cz7pKRcuTgs&t=1s&ab_channel=Proto3000
- [13] *Laser Sintering* [online]. Materialise [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/laser-sintering?gclid=CjwKCAjw9MuCBhBUEiwAbDZ-7hmljQVTUETkYqAUCJFEuyk2ZXmA5PDSHt-O784XKOIsVsBj-AxtTxoCzJ0QAvD BwE>
- [14] KRUTH, J.P., X. WANG, T. LAOUI a L. FROYEN. Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation* [online]. 2003, (23) [cit. 2020-07-17]. ISSN 0144-5154. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/01445150310698652>
- [15] *Přehled technologií 3D tisku* [online]. In: . 2018 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologii-3d-tisku>
- [16] KELLENS, Karel, Renaldi RENALDI, Wim DEWULF, Jean-pierre KRUTH a Joost R. DUFLOU. Environmental impact modeling of selective laser sintering processes. *Rapid Prototyping Journal* [online]. Emerald Group Publishing Limited Copyright © 2014, Emerald Group Publishing Limited, 2014, 20(6), 459-470 [cit. 2020-07-29]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-02-2013-0018/full/pdf?title=environmental-impact-modeling-of-selective-laser-sintering-processes>
- [17] *Selective laser sintering (SLS)* [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.3dprinting-service.com/technology/sls-3d-printing/>
- [18] *3D Printing Filaments Materials Sustainability Canon Ecology Industry makes 100% recycled 3D printing filament from used equipment* [online]. Davide Sher: 3D printing media network, 2020 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/canon-makes-recycled-3d-printing-filament/>
- [19] SERTOGLU, Kubi. *RECREUS PROMOTES 3D PRINTING SUSTAINABILITY WITH NEW 100% RECYCLED TPU FILAMENT* [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/recreus-promotes-3d-printing-sustainability-with-new-100-recycled-tpu-filament-184698/>
- [20] *Recyklace* [online]. EKO MB [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.ekomb.cz/recyklace/>
- [21] *100% recycled PLA* [online]. Fiberlogy [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://fiberlogy.com/en/fiberlogy-filaments/r-pla/> [22] <https://fiberlogy.com/en/fiberlogy-filaments/refill/>
- [23] STRINGER, Avril. *Masterspool for refills* [online]. 2018 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.myminifactory.com/object/3d-print-masterspool-61595>
- [24] ROBERTBBA. *FIBERLOGY MasterSpool* [online]. 2019 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:3642791>
- [25] *Stratasys - Objet Geometries* [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.crunchbase.com/organization/objet-geometrics>

- [26] *PRESS INFORMATION* [online]. Filabot [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.filabot.com/pages/press-1>
- [27] *Filabot Original and Filabot EX2: Operation manual* [online]. A Triex® LLC Barre, Vermont 05641 USA 18025056772: Filabot Original, 2016 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://gato-docs.its.txstate.edu/jcr:7e5368db-155f-4ff3-88f2-733091e4634d/Filabot%20Extruder%20Manual.pdf>
- [28] *EASY PET-G* [online]. Fiberlogy, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://fiberlogy.com/en/fiberlogy-filaments/easy-pet-g/>
- [29] *FILABOT EX2 EXTRUDER SETUP* [online]. 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.filabot.com/products/ex2-bundle>
- [30] *FILABOT EX6 EXTRUDER SETUP* [online]. Filabot original, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.filabot.com/products/ex6-bundle>
- [31] *Renegade: The First 3D Pen to Run on Plastic Bags & Bottles* [online]. London, UK: Daniel Edwards, 2017 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/danieledwards/renegade-the-first-3d-pen-to-run-on-plastic-bags-a>
- [32] WALLACH, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [33] *PRŮVODCE MATERIÁLY* [online]. Praha: Prusa Research, 2020 [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [34] *TECHNICKÝ LIST: Prusament PLA od Prusa Polymers*. Prusa Pol, JersS PraùaS ±eská repuglika, 2018 [cit. 2020-08-01], 2 s. Dostupné také z: https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA_TechSheet_CZE.pdf
- [35] EKO MB S.R.O. *Recyklace*. Praha, 2020 [cit. 2020-07-27]. Dostupné také z: <https://www.ekomb.cz/recyklace/>
- [36] *ReForm - rPLA White* [online]. 3DJake, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.3djake.com/formfutura/reform-tm-rpla-white?sai=8799&ctry=CZ>
- [37] *RPLA Silver* [online]. 3DJake, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.3djake.com/3djake/rpla-silver?sai=7999&ctry=CZ>
- [38] *PRŮVODCE MATERIÁLY* [online]. Praha: Prusa Research, 2020 [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [39] *RECYKLOVANÝ FILAMENT Z PET-G – KANÁRKOVÁ ŽLUTÁ, 1 KG* [online]. EKO MB, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.ekomb.cz/produkt/recyklovany-filament-z-pet-g-kanarkove-zluta-1-kg/>
- [40] *Best PET Filament Reviews: Best Food Safe 3D Printing Material* [online]. allthat3d, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.allthat3d.com/pet-filament/>
- [41] J, David. *PET settings?* [online]. 2016 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://reprap.org/forum/read.php?1,606281>

- [42] *Prusament PETG Jet Black 1kg* [online]. Partyzánská 188/7a 170 00 Praha: Prusa Research, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/802-prusament-petg-jet-black-1kg.html>
- [43] *VERBATIM PET FILAMENT 1.75MM 500GM- TRANSPARENT* [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://vmart.pk/product/verbatim-pet-filament-1-75mm-500gm-transparent/>
- [44] *RECYKLOVANÝ FILAMENT Z PET – ZELENÁ, 1 KG* [online]. Nerudova 3078 390 02 Tábor: EKO MB, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.ekomb.cz/produkt/recyklovany-filament-z-pet-zelena/>
- [45] *RPETG Grey* [online]. 3DJake, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.3djake.com/3djake/rpetg-grey>
- [46] *Filamentive PETg (rPETg)* [online]. Create Education, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://marketplace.createeducation.com/product/filamentive-petg-rpetg/>
- [47] *Re-pet3D: rPETG Silver* [online]. 3DJake, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/re-pet3d/rpetg-silver-1>
- [48] *Černá EasyABS tisková struna (filament) 1kg*. Praha, 2020 [cit. 2020-08-01]. Dostupné také z: <https://shop.prusa3d.com/cs/filamenty/117-cerna-easyabs-tiskova-struna-filament-1kg.html>
- [49] THINK MAKING.  *Recycled ABS from Car Dashboards - ReFil ABS - Filament Review* [online]. Youtube, 2017 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=5d1aixvpRB0&ab_channel=ThinkMaking
- [50] *Recycled ABS from Black Dashboards* [online]. 3DJake, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.3djake.com/refil/recycled-abs-from-black-dashboards>
- [51] *High quality 3d printing filament from waste* [online]. Maasboulevard 100 3063 NS, Rotterdam The Netherlands: Better Future Factory, 2015 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://betterfuturefactory.com/portfolio_page/refilament/
- [52] ALLEN, James. *Recycling ABS into usable 3D printing filament with Filastruder and a paper shredder...* [online]. Youtube, 2016 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=-yZ9crsRyws&ab_channel=JamesAllen
- [53] SPECTRUM GROUP SP. Z O.O. *Nylon PA6*. Pęcice, 2020 [cit. 2020-08-01]. Dostupné také z: <https://en.spectrumfilaments.com/Nylon-PA6-clinks-eng-145.html>
- [53] *Nylon PA6 Low Warp* [online]. Spectrum, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://en.spectrumfilaments.com/eng_m_Poliamide_Nylon-PA6-Low-Warp-1196.html
- [54] *Fishy Filaments: Recycled 3D Printer Filament* [online]. Fishy Filaments, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://fishyfilaments.com/our-filaments-are-made-from-used-fishing-nets/>
- [55] *Reciflex, the new TPU filament made out of 100% recycled material* [online]. 3Dnatives, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/reciflex-new-tpu-filament-100-percent-recycled-material-18022021/#!>

- [56] *Flexfill TPU 98A "Natural"* [online]. Filamentum, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://shop.fillamentum.com/products/flexfill-tpu-98a-natural>
- [57] *Flexibilní materiály* [online]. 2021, Prusa research a.s. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/flexibilni-materialy_2057
- [58] *Thermoplastic elastomer and reactive rubber of recycled tires* [online]. Via Messina 103 Seregno P.IVA 06046490964: TREED, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://treedfilaments.com/3d-printing-filaments/pneumatique-recycled-car-tires-3d-filament/>
- [59] *TPE vs TPU Flexible Filament: The Differences* [online]. ALL3DP, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: [https://all3dp.com/2/tpe-vs-tpu-flexible-filament-the-differences/#:~:text=TPE%20stands%20for%20thermoplastic%20elastomer,%2C%20thermoplastic%20polyamide%20\(TPA\)](https://all3dp.com/2/tpe-vs-tpu-flexible-filament-the-differences/#:~:text=TPE%20stands%20for%20thermoplastic%20elastomer,%2C%20thermoplastic%20polyamide%20(TPA))
- [60] *USD / CZK, Kurzy měn Online, Forex, Graf* [online]. Kurzy.cz, spol. s r.o., 2021 [cit. 2021-6-22]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/aktualni/CZK-USD/>
- [61] *FILABOT EX6 FILAMENT EXTRUDER* [online]. Filabot HQ 309 South Barre Rd Barre VT, 05641: Filabot original, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.filabot.com/products/filabot-ex6-filament-extruder#:~:text=Extrusion%20Rate%3A%20Over%2010%20pounds,output%20speed%20may%20be%20less.>
- [62] *MAKERFACTORY UN-400B 3D tiskové pero PCL, PLA, ABS 1.75 mm* [online]. Conrad, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.conrad.cz/p/makerfactory-un-400b-3d-tiskove-pero-pcl-pla-abs-175-mm-1716013?&vat=true&gclid=CjwKCAjwiLGGBhAqEiwAgg3q_oczZX1sibEhoVb523pXhMmxLTnBLnrGBtQsq-aPnyj08igVfiKmVhoCHnoQAvD_BwE
- [63] *3D Pen 3D DIY Drawing Pen With LCD Screen Compatible PLA Filament Toys Safe 3D Pen for Children Kids Christmas Birthdy Gift* [online]. AliiExpress, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/1005002378066909.html?spm=a2g0o.productlist.0.0_13b0405bqZgAuT&algo_pvid=98fe5953-1b77-431e-8cfd-044fa3dac6e1&algo_exp_id=98fe5953-1b77-431e-8cfd-044fa3dac6e1-0
- [64] *PRINT IT! PLA, 1 kg* [online]. Crealitystore, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/p/print-it-pla/> [65] <https://www.ekomb.cz/produkt/recyklovany-filament-rpla-pastelova-modra-1-kg/>
- [66] *HD-PLA Annealing instruction* [online]. Brzezie 387, 32-014 Brzezie: Fiberlogy, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: https://cdn-3d.niceshops.com/upload/file/HD-PLA-Fiberlogy-annealing-instruction_ENG.pdf
- [67] *Easy PETG - černá* [online]. 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.3dstruna.cz/easy-petg-cerna/>
- [68] *RECYKLOVANÝ FILAMENT Z PET – ŠEDÁ, 1 KG – LIMITOVANÁ EDICE* [online]. EKO MB, 2021 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.ekomb.cz/produkt/recyklovany-filament-z-pet-seda-limitovana-edice/>
- [69] *Ender 3 Pro 3D Printer* [online]. Creality, 2021 [cit. 2021-6-22]. Dostupné z: <https://www.creality3dofficial.com/products/creality-ender-3-pro-3d-printer>