



3D tisk z recyklovaného materiálu

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





Zadání bakalářské práce

3D tisk z recyklovaného materiálu

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: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

Hlavním cílem této práce je provést rešerši stávajícího stavu 3D tisku z recyklovaného materiálu a stavu výzkumu v této oblasti. Dále vypracovat technologii a navrhnout zařízení pro 3D tisk z recyklovaného materiálu.

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s technologií 3D tisku a zařízeními v laboratořích katedry.
2. Provést analýzu současného stavu využívání 3D tisku z recyklovaného materiálu.
3. Provést studii stavu výzkumu v této oblasti.
4. Na základě analýzy a studie navrhnout vhodnou technologii.
5. Vytvořit koncept zařízení pro realizaci v laboratořích katedry.

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

dle potřeby
40 stran textu včetně příloh
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. Additive manufacturing: innovations, advances, and applications. Boca Raton: Taylor and Francis, 2016. ISBN 9781498714785.
- [2] GEBHARDT, A. Understanding additive manufacturing: rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing. Munich: Hanser Publishers, c2011. ISBN 978-1-56990-507-4.
- [3] CHUA, Ch. K. a K. F. 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.
- [4] Wohlers Report 2016 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report. Fort Collins: Wohler Associates, 2016. ISBN 978-0-9913332-2-6.

Vedoucí práce:

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

Datum zadání práce:

20. listopadu 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

20. května 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

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.

6. ledna 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.

3D tisk z recyklovatelného materiálu

Anotace

Cílem této bakalářské práce je seznámit se s technologií 3D tisku a na základě toho provést analýzu vhodné technologie pro tisk z recyklovatelného materiálu. Z analýzy vytvořit koncept zařízení, který bude recyklovat materiál pro potřeby 3D tisku.

Záměrem bakalářské práce je také vyhodnotit výhody, nevýhody jednotlivých technologií, finanční analýzu a využití v praxi.

Klíčová slova: 3D tisk, filament, recyklovatelné

3D print from recycled material

Annotation

The aim of this bachelor thesis is to get acquainted with the technology of 3D printing and based on that to analyze the appropriate technology for printing from recyclable material. From the analysis, create a device concept that will recycle material for 3D printing.

The aim of the bachelor thesis is also to evaluate the advantages, disadvantages of individual technologies, and analysis of the financial aspect and practicality of use.

Klíčová slova: 3D print, filament, recycled

1 Obsah

2	Úvod	9
3	Cíl Práce	9
4	Technologie 3D tisku	10
5	Zařízení pro 3D tisk v laboratořích katedry	10
5.1	FDM/FFF/FFM – Fused deposition modeling	10
5.2	SLM – Selective laser melting	12
5.3	Multi Jet Fusion	13
5.4	Polyjet Matrix	14
5.5	SLA – Stereolitografie	16
6	Další zajímavé technologie 3D tisku ve světě	17
6.1	SLS – Selective laser sintering	17
6.2	LOM – Laminated object manufacturing	18
6.3	3D tisk pomocí pera Renegade	19
7	Současné využívání 3D tisku z recyklovatelného materiálu	21
7.1	Možnosti a využití tisku FDM technologie	21
7.2	Druhy materiálů pro FDM technologii	21
7.3	PLA (Polylactid)	22
7.4	ABS (Akrylnitril butadien styren)	22
7.5	PET/PETG (Polyethyltereftalát)	23
7.6	NYLON PA6 (Polyamid)	23
7.7	TPE (Termoplastický elastomer)	23
7.8	Mechanické vlastnosti nejvíce používaných materiálů	24
7.8	Možnosti a využití tisku SLS technologie	26
7.9	Možnosti a využití tisku MJF technologie	28
8	Výzkum v oblasti 3D tisku	29
8.1	Výzkum u technologie SLS	29
8.2	Výzkum u technologie FDM	29
8.3	Filabot – zařízení pro recyklaci 3D strun	29
9	Vyhodnocení a návrh vhodné technologie pro recyklaci materiálu	30
10	Vlastní koncept zařízení	31
11	Závěr	35
12	Seznam zkratk a symbolů	36
13	Seznam obrázků	37
14	Seznam tabulek	38
15	Seznam použitých zdrojů	39

2 Úvod

V dnešní době je čím dál tím více využíváno 3D technologií, konkrétně 3D tisku, který lze využívat nejen v průmyslu, ale i v domácnosti. Pomocí této technologie jsme schopni vyrobit v podstatě jakýkoliv díl jakéhokoliv tvaru a díky širokému spektru materiálů 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 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.

Právě do tiskáren technologie FDM je možnost využití recyklovaného plastu z velkoobjemových odpadů, protože recykláty podobné mechanické vlastnosti jako materiály nové, tak se možnost recyklace využívá ve velkém.

Další využívané technologie jsou metody SLS, MJF, kde tiskneme pomocí tiskových prášků a opět můžeme využít recyklace prášku.

3 Cíl Práce

Cílem bakalářské práce je vypracovat a navrhnout koncept zařízení pro 3D tisk z recyklovatelného materiálu. Pojednat o dostupných technologiích 3D tisku, které je možné využívat pro tisk z recyklátu a zároveň porovnat, zda 3D tisk z recyklovatelného materiálu bude mít podobné mechanické vlastnosti jako materiál nový. Bude se zde také zkoumat ekonomická výhodnost 3D tisku z recyklátu.

Dále se zde budou porovnávat výsledky ostatních výzkumů ve světě a využití 3D tisku v praxi.

4 Technologie 3D tisku

Díky aditivní technologii lze vyrábět relativně komplikované součástky na základě 3D geometrie vytvořené v CAD softwarech. [1]

5 Zařízení pro 3D tisk v laboratořích katedry

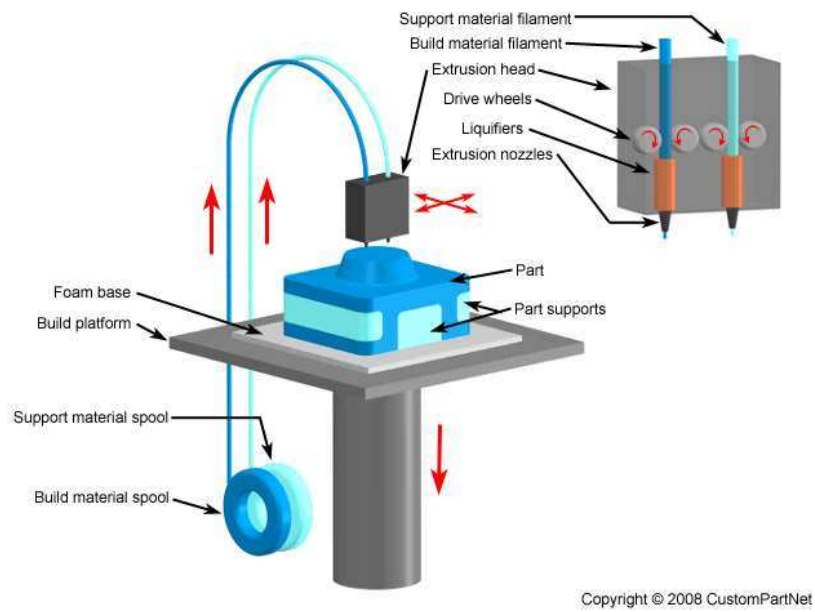
5.1 FDM/FFF/FFM – Fused deposition modeling

Principem této technologie je protahování plastové struny neboli filamentu ohřívanou tryskou (extrudérem). Extrudér se ohřívá na určitou teplotu v závislosti na materiálu. Natavený materiál je poté nanášen za pomoci krokových motorů v jednotlivých souřadnicích podle CAD dat na tiskovou desku (tisková oblast), která je stejně jako extruder předehřívána na potřebnou teplotu v závislosti na materiálu. [1,13] Pokud pro tisk zvolíme tuto metodu, tak je důležitá poloha tělesa umístěného v tiskové ploše. Důvodem je, že v každém směru má po vytištění součást jiné mechanické vlastnosti. [23]

Při tvorbě složitých součástí, protože nejsme schopni vytisknout jakoukoliv geometrii, tak je potřeba myslet na podpěry. Tyto podpěry mohou být z jiného materiálu a jejich tvar je takový, aby se mohly jednoduše odstranit. [2] Rozlišení u 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. [13]

Velikost filamentu se volí dle typu tiskárny, a to 1,75 mm nebo 2,85 mm. Vlákna nelze zaměňovat. [13]

Pro tuto technologii nejvíce využíváme materiál ABS, PLA, PET, Nylon, TPE, ale i další pomocné materiály jako je HIPS nebo PVA. [13]



Obrázek 1. Fused deposition modeling [3]



Obrázek 2. CXI tul 3D tiskárna Fortus 450mc [31]

5.2 SLM – Selective laser melting

Principem této technologie je natavování jednotlivých zrn kovového prášku, a to pomocí soustředěného paprsku laseru, kde vznikají vysoké teploty. Nenatavený materiál slouží jako podpora součástí. Kvalita tisku je okolo 20 až 100 μm v závislosti na zvoleném materiálu. Tiskárnu lze tisknout z práškových materiálů, jako jsou sloučeniny hliníku, oceli, titanu, niklu a dalších kovů. Podobně jako u tiskáren SLS nebo MJF je tento materiál nanášen do jednotlivých vrstev pomocí válce do tiskového prostoru. [34]

Při odstraňování přebytečného prášku z tiskového prostoru musíme dbát na bezpečnost. Protože se jedná o částice kovů, který je pro naše zdraví nebezpečný a musíme proto používat speciálního vybavení, mezi které patří například speciální vysavač a maska s filtrací vzduchu. Pomocí této tiskárny lze tisknout součástky pro konečné využití. [34]

Kovový prášek u této technologie lze recyklovat, ale zase je to na úkor mechanických vlastností, proto je důležité kontrolovat kvalitu. V práci J. Sůkala nebyly pozorovány žádné velké změny porozity v rámci 14 cyklů, která ovlivňuje právě zmíněné mechanické vlastnosti. [35]



Obrázek 3. Generativní laserové tavičí zařízení SLM 280HL [31]

5.3 Multi Jet Fusion

Jedná se o technologii, která je schopna konkurovat tradiční sériové výrobě. Tato technologie umožňuje tisk ve vysoké rozměrové kvalitě a ve vysokém rozlišení až 1200 dpi. Výška vrstvy je okolo 80 mikronů. Principem je nanášení černé barvy na do jednotlivých vrstev prášku materiálu, který je poté spékán infračerveným paprskem (černá barva pohlcuje více energie než bílá). [6]

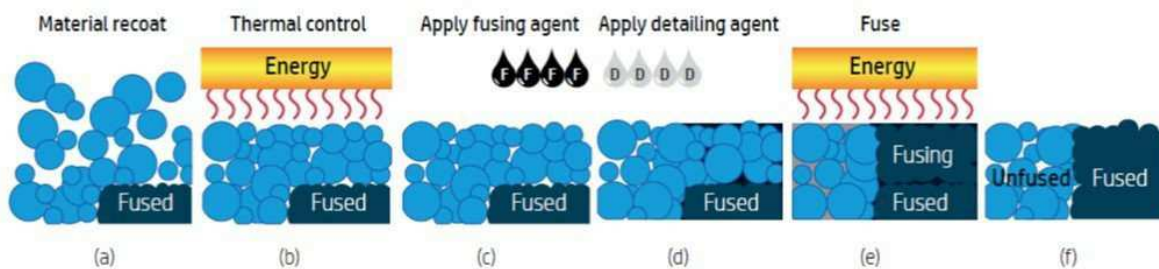
Shrnutí technologie

Výhody

- Veliká přesnost
- Izotropní materiál
- Dobré mechanické vlastnosti
- Rychlá a úsporná technologie [6]

Nevýhody

- Struktura výtisku není dokonalá, jsou zde vidět vrstvy
- Surový vytištěný díl je šedivý – lze povrchově upravit lakováním
- Můžeme využívat pouze materiál PA12 (Polyamid) [6]



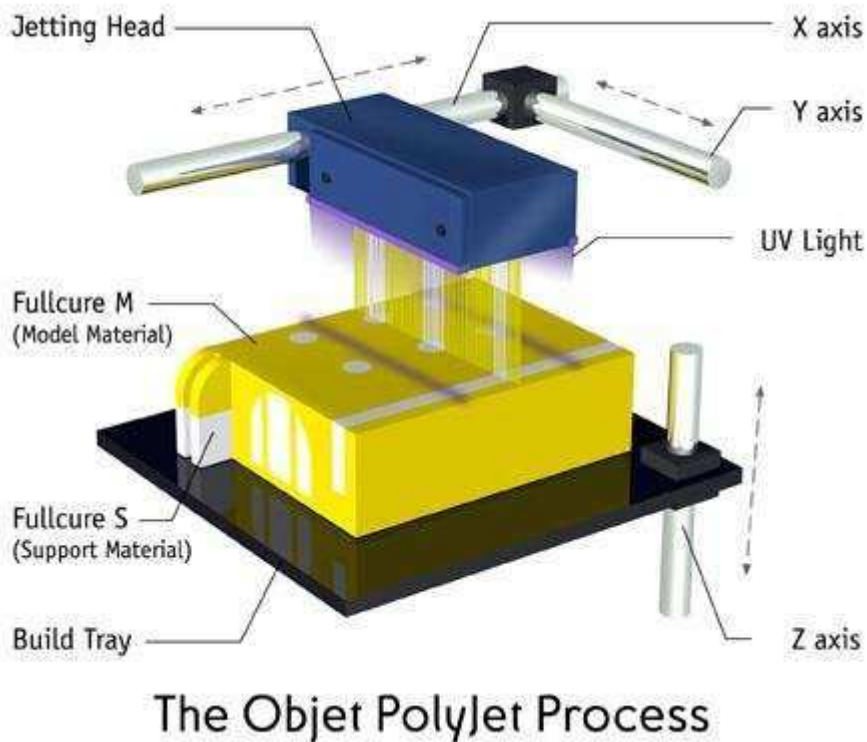
Obrázek 4. Multi Jet Fusion – princip [6]



Obrázek 5. 3D tiskárna HP JF 4200 [31]

5.4 Polyjet Matrix

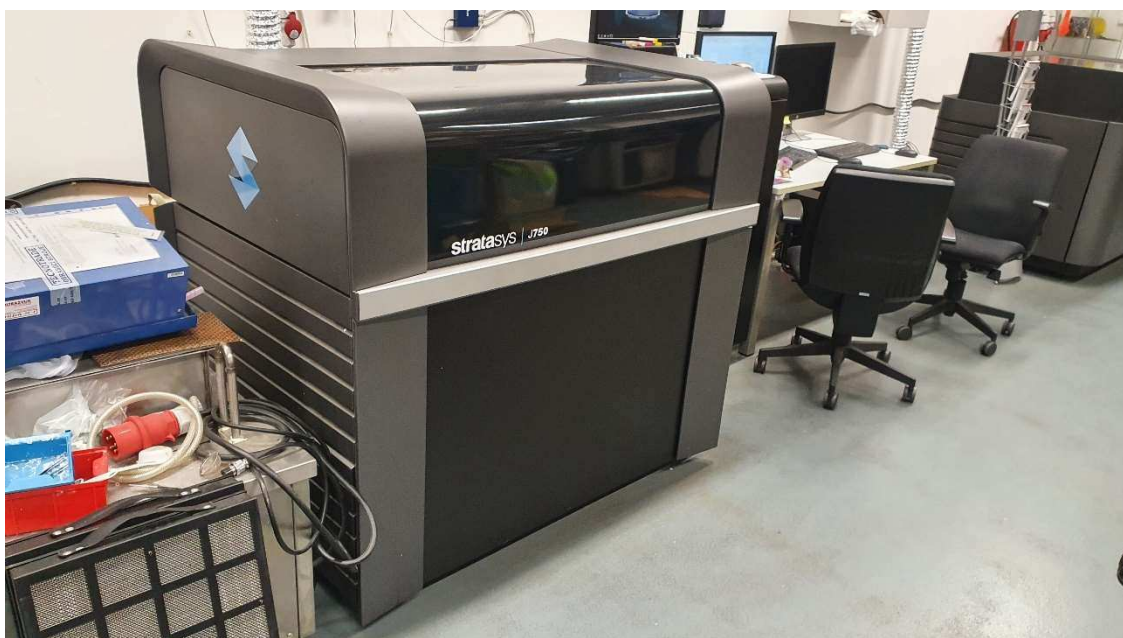
Jedná se o technologii, která byla patentována firmou dnes známou pod názvem Stratasys. Principem této technologie je nanášení materiálu v kapalném stavu do jednotlivých vrstev, které jsou vytvrzovány pomocí UV záření, materiálem je fotopolymer. Další výhodou této technologie je, že jsme schopni tisknout z více než jednoho materiálu. Jsme tedy schopni vytisknout například masku s pevnou a tuhou konstrukcí s gumou na okraji, která zajišťuje utěsnění masky. Tato tiskárna je vhodná pro prototypování výsledných produktů, které mohou mít velmi složitou geometrii. Využití je veliké, a to od textilního odvětví přes lékařství ke strojírenství. [31,32]



Obrázek 6. PolyJet Matrix [32]



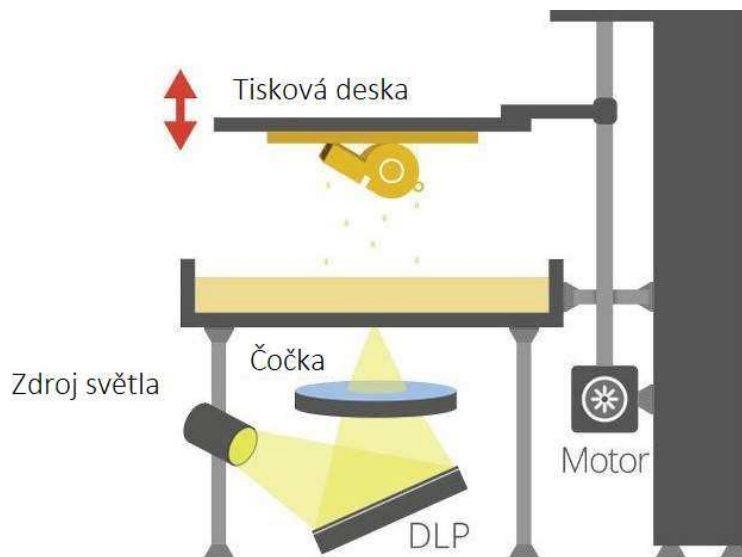
Obrázek 7. 3D tiskárna Object 500 Connex [31]



Obrázek 8. 3D tiskárna J750 [31]

5.5 SLA – Stereolitografie

Tato technologie byla vyvinuta v roce 1980 Chuckem Hullem. Principem této technologie je za využití laserů a fotopolymerových resinů. Zrcadla, která jsou umístěna pod nádobou, soustředí laserový UV paprsek skrz tuto nádobu s resinem na místa potřebného průřezu. Na tiskovou desku, která se pohybuje směrem dolů a nahoru se tvoří vrstvy vytvrzeného plastu. Nevýhodou je, že se může fotopolymer přilepovat na tiskové sklo. Výhodou této technologie je rychlý tisk, přesnost a vysoká kvalita povrchu. Práce s resinem je zdraví nebezpečná, proto je důležité dodržovat bezpečnost práce. Není obvyklé, aby se fotopolymery recyklovaly. [42],[43], [44]



Obrázek 9. Princip stereolitografie [43]



Obrázek 10. FormLabs SLA 3D printer [43]

6 Další zajímavé technologie 3D tisku ve světě

Chtěl bych zde uvést další technologie 3D tisku, které jsou využívány ve světě. Jedna z nejvíce používaných, která stojí za zmínku je technologie Selective laser sintering (SLS). Tato technologie je masivně nasazována v průmyslu. Jedná se o dokonalý nástroj pro prototypování výrobků, kde jsme schopni přiblížit přesný tvar a mechanické vlastnosti k dílu vyráběného později sériově konvenční metodou. Prášek u technologie SLS jde částečně recyklovat.

Další technologie, o které bych se chtěl zmínit je například Laminated object manufacturing (LOM), která je jedna z nejstarších. Tato technologie je jednou z průkopníků 3D tisku.

Poslední technologie je tisk pomocí 3D pera, kde lze využít filamentu obdobně jako u FDM technologie nebo odříznutých proužků, které jsou recyklovány koncovým uživatelem z PET lahví. Technologii 3D pera lze využít i například pro svařování plastů.

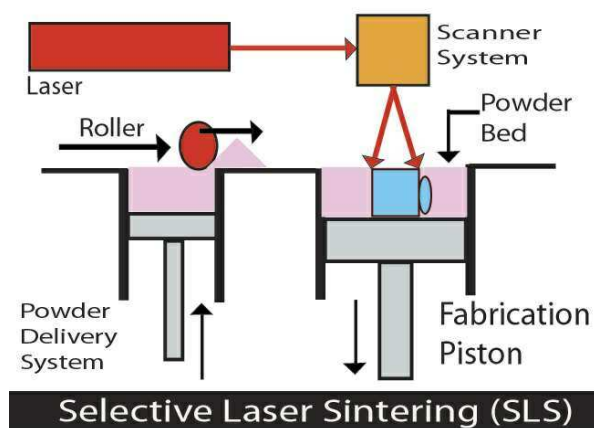
6.1 SLS – Selective laser sintering

Tato technologie je jedna z nejvíce se rozrůstajících, a to díky tomu, že ji lze použít pro 3D tisk 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. [4]

Principem této technologie, jak již bylo zmíněno, je distribuce plastového prášku s pomocí válečku ze zásobníku do natavované komory s pohybujícím 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. Pohybující se píst zajišťuje vytváření geometrie v Z souřadnici. Po dokončení tisku musíme součástku očistit od prášku a případně povrchově upravit. [5,16]

Součástky vyrobené pomocí metody SLS mají obdobné mechanické vlastnosti jako součástky vstřikované, proto tato technologie je často využívána k vývoji nových výrobků. Platí, že pokud je hustota plastové prášku větší, tak mají součástky lepší mechanické vlastnosti [16,19]

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



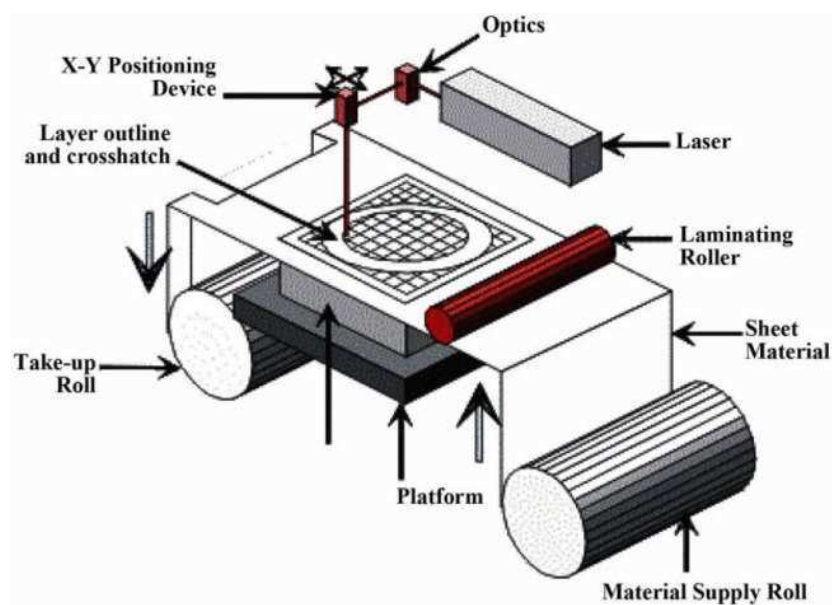
Obrázek 11. Selective Laser Sintering [5]

6.2 LOM – Laminated object manufacturing

Tato technologie disponuje poměrně velkou rychlostí tisku. Jedná se o relativně levnou variantu 3D tisku, kde lze využít různých materiálů. Jedná se o jednu z nejstarších technologií [7,21]

Základem této metody jsou role s materiálem o velikosti cca 0,2 mm. Běžně se jedná o papír, který odvíjen přes tiskovou oblast, kde laser spéká jednotlivé vrstvy na sebe, a to na základě 3D CAD dat, které jsou vytvořeny v PC. Takto je postupně tvořena geometrie součásti. Zbytek materiálu je odřezáván a odvíjen zpět na další válec. Jedná se pouze o okraje, část nenataveného materiálu je využít jako podpora součásti. Po vytištění součásti musíme podpory odstranit. [7,21]

Proces natavování je opakován, dokud nemáme vytištěnou finální geometrii. U této metody nedochází k žádným chemickým procesům. Konečný výrobek lze dále povrchově upravovat například lakováním. Nevýhodou této metody oproti metodě SLS je, že u této metody nelze vyrábět geometricky přesné tvary. Kvalita tisku je poněkud horší. [8]



Obrázek 12. Laminated object manufacturing [8]

6.3 3D tisk pomocí pera Renegade

Jedná se o myšlenku 3D tisku pomocí pera, které je plněno pásky z PET lahví. Tato metoda je výhodná v tom, že nemusíme kupovat předraženou tiskovou náplň, ale využít materiálu, který je všude kolem nás volně dostupný. Ačkoliv cena materiálu je nulová, tak musíme počítat s cenou samotného pera. Při přepočtu, kdy cena pera je \$100, tak nás celkový tisk stojí okolo \$200/Kg. Tato technologie nabízí další využití materiálu, který znečišťuje naši planetu. [11]

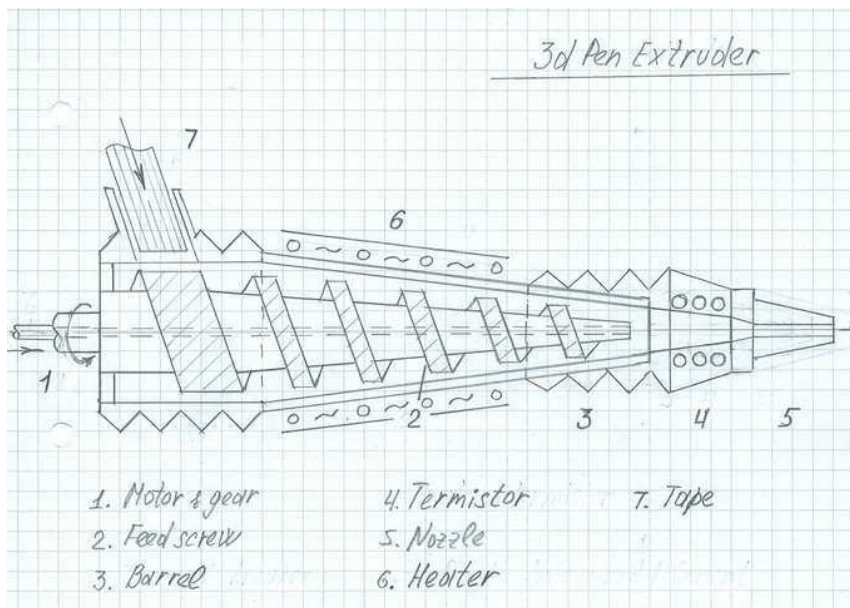
Principem této technologie je nejprve nařezání jednotlivých pásků z PET lahví a to o velikosti 5 - 7 mm o tloušťce 0,14 – 0,35 mm. Tento pásek je pak postupně dopravován za pomoci šneku do samotného pera, kde za působení tepla a mechanických sil je postupně protlačován tryskou, pomocí, které jsme schopni vytvářet požadovaný tvar tělesa. [11]

Pokud je to potřeba, tak do pera lze využít také standardně filament s průměrem 1,75 mm z materiálu PLA, ABS, nylon, TPE, HIPS, atp. [11]

Cenový rozbor materiálu [\$/Kg]		
Plastové pelety	Filament	PET plastový pás
\$0,6	\$20 - 50	\$0

Tabulka 1. Cenový rozbor materiálu [11]

Další využití 3D pera je třeba pro spojování plastových součástí, jedná se o svařování plastů. Při svařování jednotlivých součástí můžeme říct, že mechanické vlastnosti v místě svaru mají dobré mechanické vlastnosti. [12]



Obrázek 13. princip 3D pera Renegade [11]



Obrázek 14. tisk pomocí 3D pera Renegade [11]

7 Současné využívání 3D tisku z recyklovatelného materiálu

3D tisk využíváme především pro výrobu prototypů, ještě než se daný výrobek dostane do rukou koncového zákazníka. Můžeme zde zkusit optimální geometrii součásti, abychom splňovali všechny náležitosti pro daný trh.

7.1 Možnosti a využití tisku FDM technologie

3D tiskem lze tisknout i výrobky určené k okamžitému použití. V současné situaci lze zmínit tisk obličejových štítů v boji proti Covid-19, kde hrála velkou roli společnost Prusa Research a.s.. Tato firma se zabývá převážně tiskem pomocí FDM technologie, za pomoci které tiskla jednu dobu kolem 800 kusů štítů denně. Štíty od této společnosti jsou certifikované jako třída ochrany 3 ČSN EN 166:2001 a prošly CE certifikací. Zároveň tato společnost nechala volně k dispozici na jejím webu CAD data včetně návodů, aby kdokoliv, kdo má tento typ tiskárny mohl vyrábět právě tyto štíty, a to v době nedostatku ochranných pomůcek proti pandemii. [9,15]



Obrázek 15. Tisk obličejových štítů [9]

Do tiskáren typu FDM lze využít recyklovaného materiálu, který je volně dostupný na internetu. Mezi významnější firmu, které se tímto prodejem a výrobou z recyklovaných materiálů zabývá je EKO MB s.r.o.. Jejich specializací je výroba strun z PET a PLA. [14,25]

7.2 Druhy materiálů pro FDM technologii



Obrázek 16. Druhy materiálů pro FDM včetně povrchových úprav [22]

7.3 PLA (Polyactid)

Jedná se o materiál s velkým využitím pro technologii FDM, je biologicky odbouratelný a rozložitelný sacharid o velké pevnosti. Tisk probíhá za poměrně nízkých teplot. Teplota tání tohoto materiálu je okolo 175°C, proto tento materiál není vhodný pro tisk součástek, které jsou vystaveny horku za přímého slunce (např.: interiér auta). Při teplotách nad 60°C výtisky začínají ztrácet mechanické vlastnosti a nejsou vhodné pro venkovní využití. 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. [13,22,23]

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. [23]

Tento materiál lze recyklovat, jak již bylo zmíněno, ačkoliv je v ostatních zdrojích tvrzeno, že se PLA nerecykluje, tak se touto recyklací zabývá firma EKO MB s.r.o. Je to hlavně z důvodu toho, že se jedná o plast, který není vyroben pomocí ropy. Možnost recyklace zde je. [25,13]

7.4 ABS (Akronitril butadien styren)

Velmi využívaný 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. [24]

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. Vytištěna součást se může kroutit, proto je dobré tiskárnu zakrytovat. [24]

Na tomto materiálu lze provádět povrchové úpravy jako například vyhlazení acetonovými parami, které vytištěnou součástku vyhladí, tak že nejsou vidět jednotlivé vrstvy tisku. [24]

7.5 PET/PETG (Polyethylteraftalát)

Jedná se o velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností, malou tepelnou roztažností (nekrouťí se na podložce) a dobrými mechanickými vlastnostmi. Je vhodný pro tisk mechanických součástí. Tento materiál patří mezi ty oblíbenější. [22]

PET je velmi používaný materiál, který můžeme nalézt všude kolem nás a je hlavně vhodný pro recyklaci, proto firma EKO MB s.r.o., jak již bylo zmíněno, se rozhodla recyklovat tento materiál v podobě filamentů určených pro 3D tisk na FDM tiskárnách. [14]

Proces recyklace v bodech:

- 1) Výkup plastů
- 2) Třídění a dekontaminace
- 3) Drcení (zpracování)
- 4) Následná výroba filamentu [14]

Při výrobě recyklovaného filamentu je důležitá čistota plastů, aby výrobek měl zaručené mechanické vlastnosti, které jsou podobné novému PET materiálu. [14]

PETG je Polyethylterftalát s glykolem, který se přidává během výrobního procesu. Je to kvůli tomu, že materiál má při tisku menší křehkost a je především snadnější pro tisk. Dále je materiál pružný, což nám při tisku pomáhá k odlepení od podložky (dočasně se prohne). [22]

7.6 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 tiskové podložky 80-100°C. Rychlost tisknutí je okolo 40-70mm/s. Tento materiál je vhodný pro tisk mechanicky namáhaných součástí, jako jsou například ozubená kola, různé přípravky, atp. Tento materiál není nikterak levný. Polský výrobce Spectrum Group Sp. z o.o. prodává tento produkt za cenu okolo 1020 Kč za 1 Kg. [26]

7.7 TPE (Termoplastický elastomer)

Protože se jedná o pružný materiál je tento filament těžký pro tisk a je vhodný pro zkušenější tiskaře. Tento filament nám umožňuje tisknout i pružné díly. Materiál, který zde budeme rozebírat, se nazývá Flexfill TPE 90A. Má hladký matný povrch, dobrou přilnavost, která zajišťuje stabilitu rozměru, odolný proti nečistotám, omyvatelný a nelepí. Teplotu tisku je potřeba nastavit okolo 225-245°C, podložky 50-60°C. [30]

7.8 Mechanické vlastnosti nejvíce používaných materiálů

Fyzikální vlastnosti materiálu PLA od výrobce Prusa Polymers				
	Hodnoty			Metoda
Teplota tání [°C]	145-160			ISO 11357
Teplota skelného přechodu [°C]	55-60			ISO 11358
Hustota [g / cm ³]	1,24			ISO 1183
Teplota tvarové stálosti (0,45 MPA) [°C]	55			ISO 75
Mechanické vlastnosti				
Vlastnosti/ Směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Modul pružnosti v tahu [GPa]	22,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	ISO 527-1
Napětí na mezi kluzu [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	ISO 527-1
Rázová houževnatost Charpy (4) [kJ/m ²]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	ISO 179-1

Tabulka 2. Mechanické vlastnosti materiálu PLA (Prusament PLA Prusa Galaxy Black 1kg) [23]

Fyzikální vlastnosti materiálu PETG od výrobce Prusa Polymers				
	Hodnoty			Metoda
Teplota tání [°C]	-			ISO 11357
Teplota skelného přechodu [°C]	-			ISO 11358
Hustota [g / cm ³]	1,27			ISO 1183
Teplota tvarové stálosti (0,45 MPA) [°C]	68			ISO 75
Mechanické vlastnosti				
Vlastnosti/ Směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,5 ± 0,1	50 ± 1	30 ± 5	ISO 527-1
Napětí na mezi kluzu [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,1	2,5 ± 0,5	ISO 527-1
Rázová houževnatost Charpy (4) [kJ/m ²]	Bez přerušení	Bez přerušení	5 ± 1	ISO 179-1

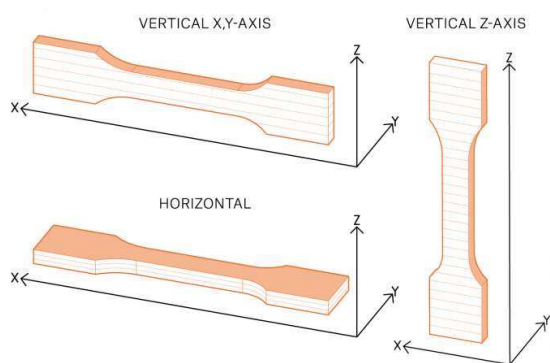
Tabulka 3. Mechanické vlastnosti materiálu PETG (Prusament PETG 1kg) [36]

Fyzikální vlastnosti materiálu PET od výrobce EKO MB S.R.O.		
	Hodnoty	Metoda
Teplota tání [°C]	240-260	ISO 11357
Teplota měknutí dle Vicata (VST) [°C]	85	ISO 306
Hustota [g / cm ³]	1,35	ISO 1183/B
Teplota tvarové stálosti (0,45 MPA) [°C]	70	ISO 75
Rázová houževnatost Charpy [kJ/m ²]	12	ISO 179
Pevnost v ohybu [MPa]	1850	ISO 178

Tabulka 4. Mechanické vlastnosti materiálu rPET (PET-A FILAMENT) [38]

Fyzikální vlastnosti materiálu ASA od výrobce Prusa Polymers				
	Hodnoty			Metoda
Teplota tání [°C]	-			ISO 11357
Teplota skelného přechodu [°C]	-			ISO 11358
Hustota [g / cm ³]	1,07			ISO 1183
Teplota tvarové stálosti (0,45 MPA) [°C]	93			ISO 75
Mechanické vlastnosti				
Vlastnosti/ Směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,7 ± 0,1	1,7 ± 0,1	-	ISO 527-1
Napětí na mezi kluzu [MPa]	42 ± 1	45 ± 2	-	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	3,4 ± 0,2	3,8 ± 0,2	-	ISO 527-1
Rázová houževnatost Charpy (4) [kJ/m ²]	25 ± 3	38 ± 11	-	ISO 179-1

Tabulka 5. Mechanické vlastnosti materiálu PETG (Prusament ASA 1kg) [37]



Obrázek 17. Orientace zkušebního tělesa [23]

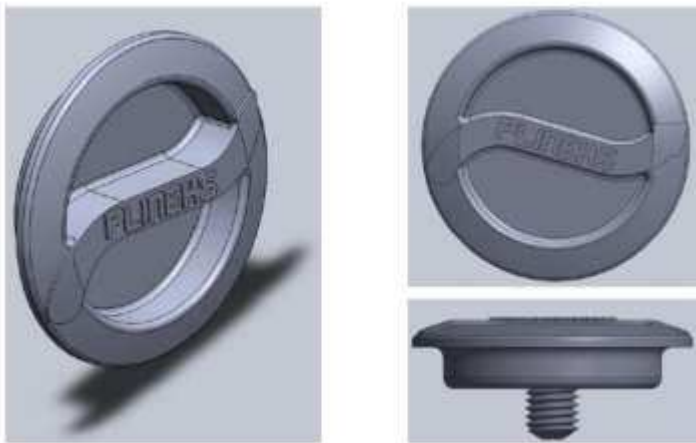
7.8 Možnosti a využití tisku SLS technologie

Jedno z využití SLS technologie je například v lékařství, a to konkrétně v pediatrické kardiologii, kde lékaři před zákrokem potřebují nastudovat lidské srdce. Kvalita tisku s jemným rozlišením pomáhá, jak již bylo zmíněno, ke studiu srdce, ale také k informování daného člověka v jakém stavu se nachází. [17]



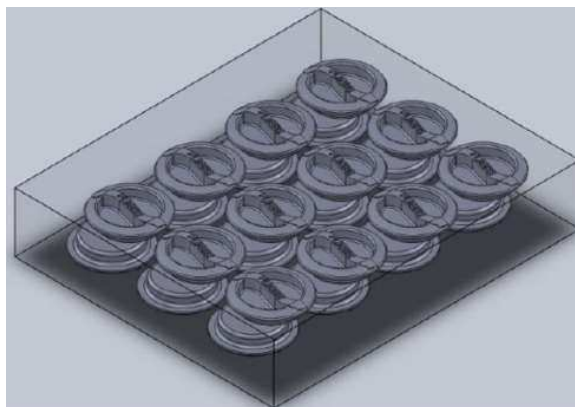
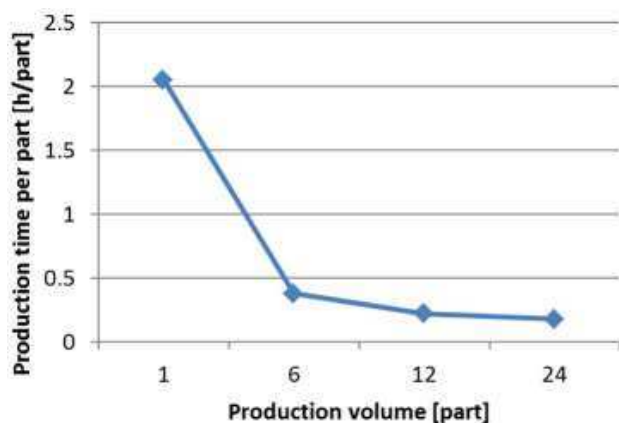
Obrázek 18. Lidské srdce vytištěné pomocí metody SLS [17]

Tato technologie byla vyvinuta také za účelem vytváření kvalitních součástek ke konečnému použití, jinými slovy je zaváděna do sériové výroby. Největší výhodou této technologie je, že je velice flexibilní a jsme schopni poměrně rychle přetypovat výrobu na jiný výrobek. Pokud se jedná o součást malého rozměru, jsme schopni v tiskovém prostoru tisknout více součástí naráz. Prášek v tomto případě funguje jako podpora součástek. Příklad tisku v sériové výrobě následně znázorním na této zvolené součástce z použitého zdroje. [18]



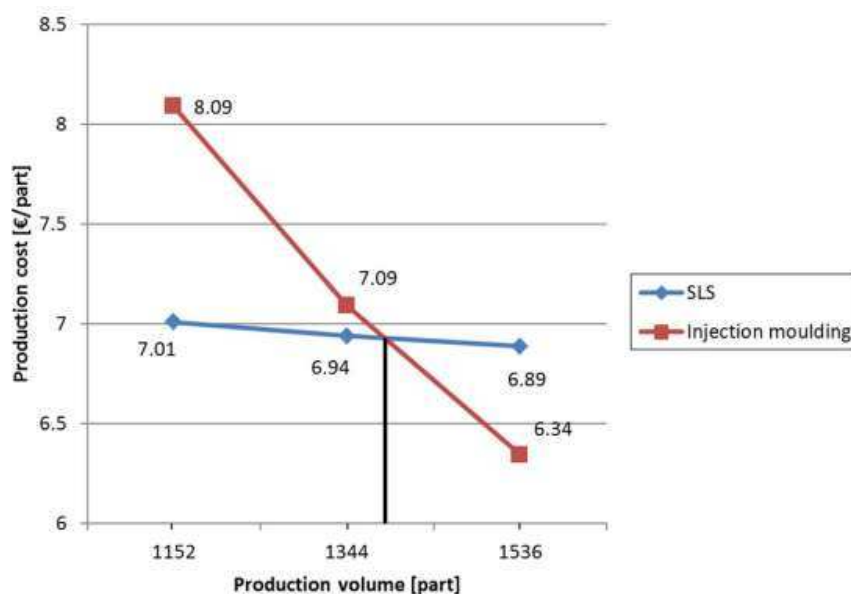
Obrázek 19. Zvolená součástka [18]

Například pokud tiskneme pouze jednu součástku o průměru 55 mm a výšce cca 25mm, tak nám tisk touto metodou zabere cca 2,05 hodiny a při navýšení na 12 součástek nám zabere tisk cca 2,65 hodiny, proto se dnes výrobci snaží zvětšovat pracovní plochy těchto tiskáren, aby tiskli levněji a mohli konkurovat již zmíněné sériové výrobě. Při tisku těchto součástek při zaplnění 192 kusů v tiskové ploše je rychlost tisku 34,75 hodin. [18]



Obrázek 20. Vliv množství součástek na rychlost tisku [18]

Konkurencí metody SLS v sériové výrobě je vstřikování, kde je velkým negativem velikost vstupních investic. Je pouze na našem uvážení a propočtech, zda se nám výroba pomocí SLS vyplatí. Důležitým faktorem je plánovaný počet vyrobených kusů, kde musíme vyhodnotit zlomový bod, od kterého se nám vyplatí nasadit metodu vstřikování. [18]



Obrázek 21. Zlomový bod při volbě metody SLS/Vstřikování [18]

Prášek, který se u Selective Laser Sintering využívá je PA a lze částečně recyklovat pro tištění dalších součástek, a to v určitém poměru s novým práškem. Zpravidla to však bývá 45 % starého a zbytek tvoří nový prášek, starý prášek se musí přesít. Doporučené hodnoty udává výrobce tiskáren. [16]

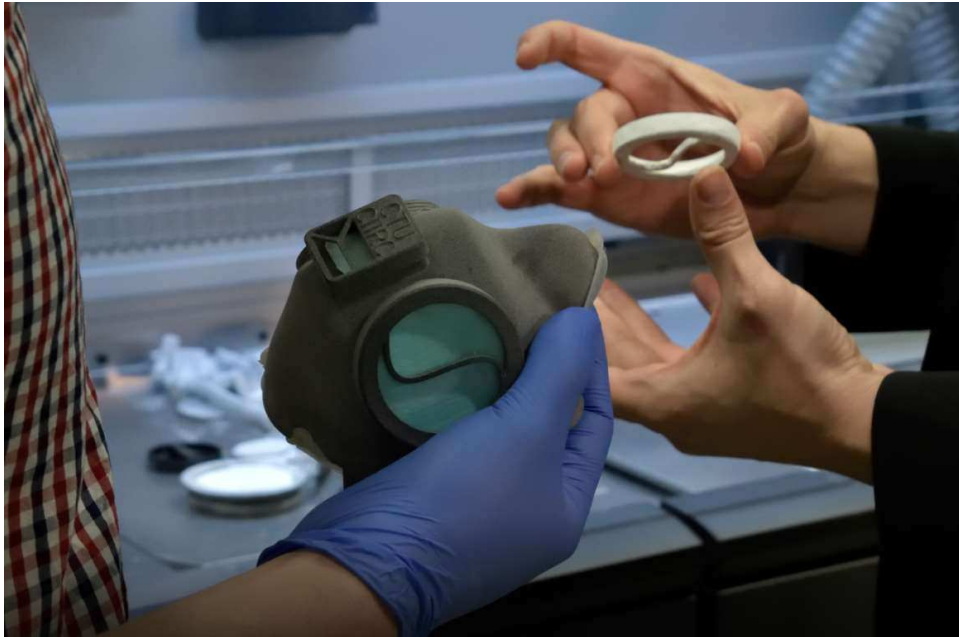
Společnost	Materiál	Poměr starý prášek k novému [%]
EOS	PA2200	3-50
	PA3200GF	50-70
3D-Systems	DuraForm	30 (+ 30 navíc)
	GF DuraForm	50 (+ víc)

Zdroj: EOS (2012), 3D-Systems (2012)

Tabulka 6. Doporučený poměr stanoven výrobcí – starý prášek/nový [16]

7.9 Možnosti a využití tisku MJF technologie

Další využití bylo například metody SLS, kde na ČVUT vědci vyvinuli vlastní funkční respirátor, který splňuje ty nejpřísnější normy. Označení masky je CIIRC RP95, jedná se o polomasku, která splňuje certifikaci dle normy EN 140:1999 jako respirátor třídy FFP3. Výhodou této masky je, že ji lze používat opakovaně. Materiál lze sterilizovat v parním sterilizátoru a zároveň ji, jak již bylo zmíněno, znovu dezinfikovat, a to za pomoci dezinfekčního roztoku na bázi alkoholu a 85% ethanolu. Postup desinfikování byl ověřen ve spolupráci s Českou kardiologickou společností, že se jedná o virucidní metodu. Tento respirátor je tištěný pomocí tiskárny Multi Jet Fusion. Tato metoda zaručuje nepropustnost částic Covid-19 skrz tištěný materiál do dýchacího ústrojí člověka. [10]



Obrázek 22. obličejová maska CIIRC RP95 [11]

Plastový prášek pro Multi Jet Fusion lze částečně recyklovat pro tištění dalších součástek, a to v určitém poměru. Podle jediného výrobce této tiskárny HP lze prášek recyklovat v poměru 80 % starého prášku na 20 % nového při zachování podobných mechanických vlastností (pro MJF 540). Tento typ tiskárny dokáže tento prášek odsávat a recyklovat automaticky. Tiskárna dokáže tisknout při zaplnění tiskového prostoru do výšky 25 mm 5 hodin, při zaplnění do maximální výšky 359 mm 18 hodin. Rychlosti tisku je $2340 \text{ cm}^3/\text{hod}$. Díky této rychlosti tisku lze zvažovat u této tiskárny sériovou výrobu. Velikost tiskového prostoru je 332x190x248 mm. [27]



Obrázek 23. HP Multi Jet Fusion 540 [28]

8 Výzkum v oblasti 3D tisku

8.1 Výzkum u technologie SLS

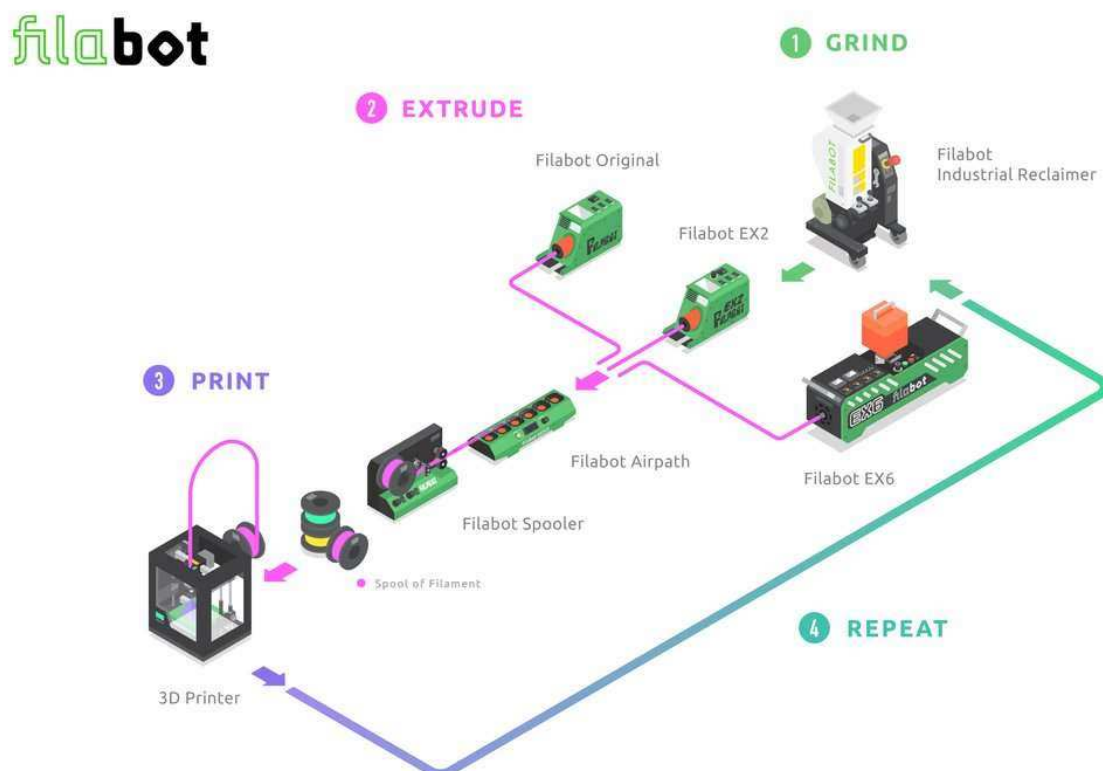
Zde se vědci zaměřují primárně na tiskovou oblast, kde se snaží tuto oblast zvětšovat, aby mohli navyšovat výrobní kapacity na jednu výrobní dávku. Samozřejmě, že se zlepšuje i software tiskáren a způsob naplňování, aby byla tato technologie ještě více produktivní, než je dnes. U této technologie lze pouze recyklovat prášek. [19]

8.2 Výzkum u technologie FDM

Tato technologie má veliký potenciál pro recyklaci. Vědci zkoumají a zkouší recyklovat velké spektrum materiálů a z těchto materiálů vytvářet filament. Důkazem může být například firma Canon, který se snaží recyklovat PC-ABS a HIPS ze starých kopírek a tiskáren. PC-ABS vyniká výbornou odolností proti teplu a má dobré mechanické vlastnosti. HI-PS (High Impact Polystyrene sheet) materiál je vhodný pro tisk podpěr. Tento materiál vyniká velkou rázovou odolností. [39]

8.3 Filabot – zařízení pro recyklaci 3D strun

Filabot je systém, který je schopen vyrábět tiskovou strunu z granulátu nebo rozdrčeného materiálu v jakémkoliv drtiči. Výhodou tohoto systému je, že je schopen recyklovat nepovedené výtisky z 3D tiskárny. V podstatě lze recyklovat jakýkoliv materiál určený pro 3D tisk. Tento systém využívají významné organizace jako je NASA, MIT. Cenová relace tohoto systému se pohybuje okolo 310 tisíc Kč. [29], [40]



Obrázek 24. Filabot system [29]

9 Vyhodnocení a návrh vhodné technologie pro recyklaci materiálu

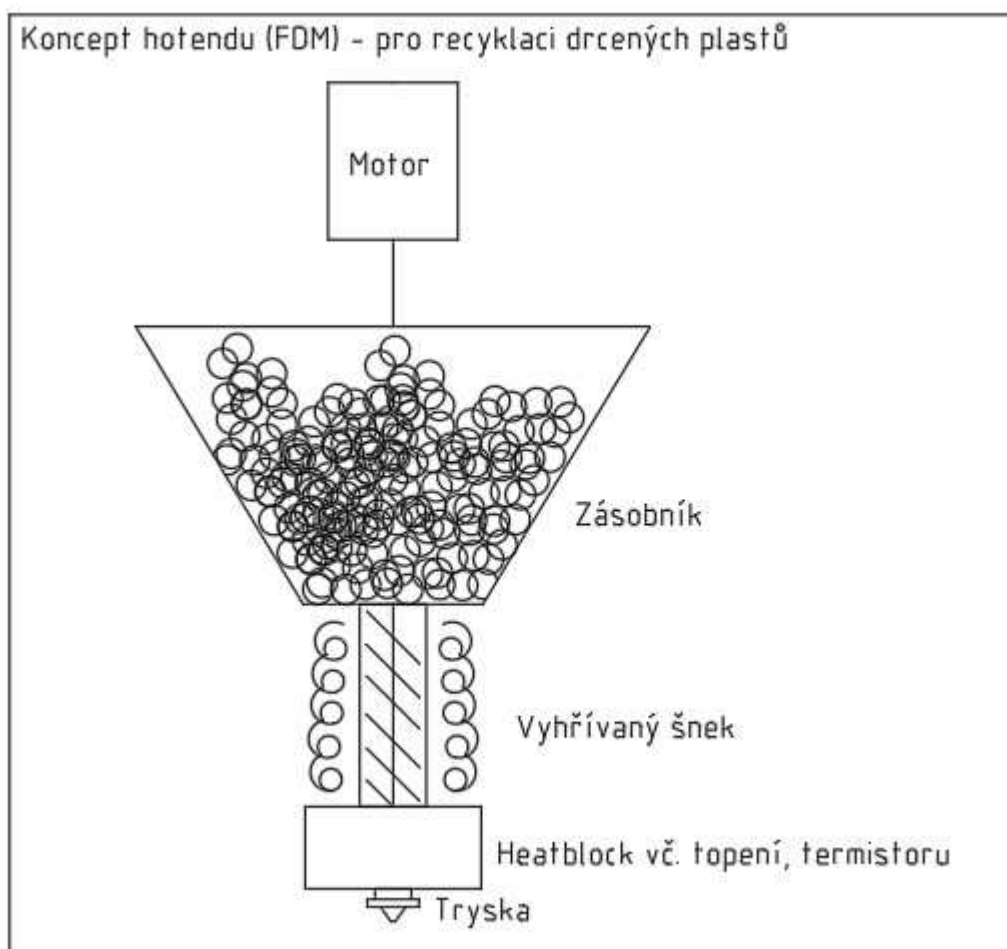
Vhodnou technologií a velký potenciál pro recyklaci je FDM technologie, kde můžeme znovu použít velké spektrum materiálů. Na světě existuje plno společností, které mají pro tento účel postavené celé linky. Cena recyklovaného materiálu je nižší než materiálu nového.

Samozřejmě, že se nelze zmínit jen o jedné technologii 3D tisku, která je vhodná pro recyklaci materiálu. Proto bych rád zmínil metody SLS, SLM, MJF, kde lze recyklovat tiskový polotovar. Z mého pohledu je nejvhodnější technologií pro recyklaci technologie FDM.

10 Vlastní koncept zařízení

Zvolil jsem si koncept zařízení pro FDM technologii, především protože je tato technologie masivně využívána ve světě a je nejvhodnější pro tisk z recyklovaného materiálu. Níže navrhuji koncept hotendu pro tyto typy tiskáren, do kterého je sypán průběžně drcený plast, který byl nadrcen pomocí jakéhokoliv drtiče na malé kousky. Tento plast sypeme do zásobníku tiskárny, který je dále dopravován vyhřívaným šnekem do heatbloku a následně vytlačován tryskou po vrstvě na tiskovou podložku. Díky vyhřívanému šneku, který zároveň vytváří smykové napětí je tento plast uveden do plastického stavu, pomocí něho je možno tisknout 3D objekty. U tohoto konceptu doporučuji recyklovat pouze roztríděný materiál bez nečistot, jako jsou například PET lahve, zbytky PLA z nepovedeného tisku.

Tento koncept je dále určen pro experimentální tisk z nových materiálů, ale toto může být námět třeba pro diplomovou práci.

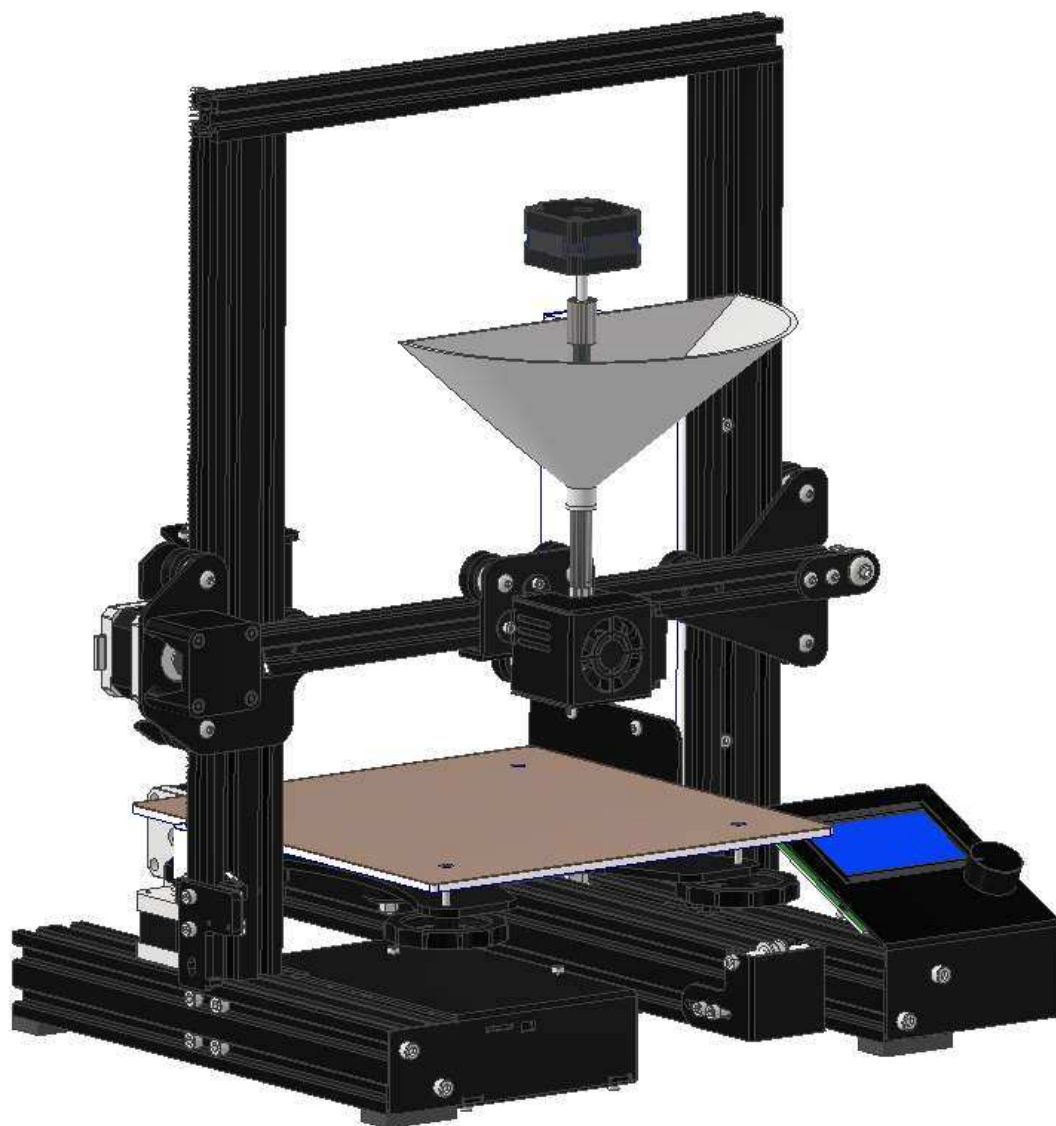


Obrázek 25. Koncept hotendu pro recyklaci 3D tisku

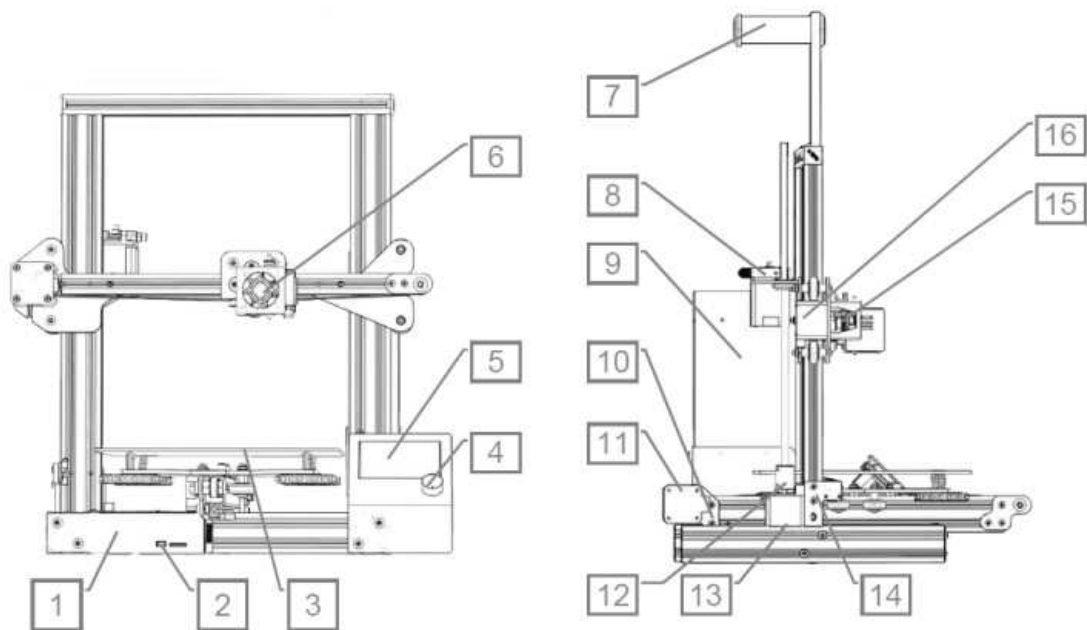


Obrázek 26. Koncept hotendu pro recyklaci 3D tisku – CAD model

Tento koncept hotendu se může namontovat do jakékoliv opensource tiskárny. Pro příklad jsem zde popsal tiskárnu Ender 3 Pro, kterou osobně vlastním.



Obrázek 27. Mnou upravený model 3D tiskárny s vlastním konceptem [45]



- | | | | |
|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| 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 26. Popis 3D tiskárny Ender 3 pro [41]

11 Závěr

Nejvíce jsem se zaměřil na FDM technologii, a to hlavně protože se jedná o relativně dostupnou technologii. U této technologie se nabízí využívat k 3D tisku recyklátů, kde lze recyklovat materiál velkoobjemově. Je to dané především velkou světovou komunitou, která vlastní tento typ tiskáren. Jediná nevýhoda u recyklovaného materiálu je, že se s ním úplně nejlépe netiskne, a to v případě rPET. Při tisku z rPET jsou zde mezi přejezdy vidět vlákna (stringy). S ostatními recykláty se tisklo výrazně lépe. Nebylo to nic závažného a kvalita tisku z recyklátů byla až na nedostatek u rPET výborná. Pro tuto technologii jsem vytvořil koncept přímého plnění materiálu, kde by se mohl recyklovat plastový odpad, může být i ze spotřebičů. Jak již bylo psáno, tak tento koncept by mohl být dalším námětem pro diplomovou práci.

Velkou nevýhodou při recyklaci materiálu, že uživatel si musí materiál roztřídit, rozdrtit, vysušit a až poté plnit tiskárnu. Je to velmi časově náročný proces.

Další technologií, kde je potenciál v recyklaci je u práškových technologií. Kde jsme schopni recyklovat v určitém poměru tiskový prášek.

U technologie SLA bohužel žádná recyklace neexistuje. Ačkoliv se tato technologie v dnešní době hodně rozšiřuje, a to díky výborné tiskové kvalitě.

Vývoj aditivních technologií je tak rychlý, že je složité sledovat veškeré dnešní trendy. V knižních publikacích bylo plno informací, které platí, ale jsou již překonané. Zpravidla se jednalo o knihy starší tří let, proto je dobré čerpat z nejnovějších publikací, odborných článků nebo z internetových zdrojů samotných výrobců. Z mé analýzy technologií v této bakalářské práci tedy zcela vyplývá, že jasným favoritem 3D tisku z recyklátů je technologie FDM, pro kterou jsem vytvořil koncept zařízení.



Obrázek 27. Vytisknutá postavička Groot z recyklované filamentu rPLA (Fiberlogy)

12 Seznam zkratek a symbolů

3D – Tří rozměrný

FDM – Fused Deposition Material

SLM – Selective Laser Sintering

SLA - Stereolitografie

MJF – Multi Jet Fusion

LOM – Laminated Object Manufacturing

FFM – Fused filament modeling

FFF – Fused filament Fabrication

PLA - Polylactid

ABS – Akrylonitril butadien styren

PET - Polyethylenteraftalát

PETG – Polyethylenteraftalát + glykol

PA - Polyamid

TPE – Termoplastický elastomer

PC – Polykarbonát

PVA - polyvinylalcohol

HIPS – High impact polystyrene

UV – ultrafialové

DLP – Digital Light Processing

Heatblock – blok pro vedení tepla

Heatbreak - přerušování vedení tepla

Hotend – sestava komponentů FDM pro vytlačení materiálu

Dpi – dot per inch

13 Seznam obrázků

Obrázek 1. Fused deposition modeling [3]	11
Obrázek 2. CXI tiskárna 3D Fortus 450mc [31].....	11
Obrázek 3. Generativní laserové tavicí zařízení SLM 280HL [31]	12
Obrázek 4. Multi Jet Fusion – princip [6].....	13
Obrázek 5. 3D tiskárna HP JF 4200 [31].....	13
Obrázek 6. PolyJet Matrix [32]	14
Obrázek 7. 3D tiskárna Objet 500 Connex [31]	15
Obrázek 8. 3D tiskárna J750 [31].....	15
Obrázek 10. Princip stereografie [43].....	16
Obrázek 11. FormLabs SLA 3D printer [43]	16
Obrázek 9. Selective Laser Sintering [5]	17
Obrázek 12. Laminated object manufacturing [8]	18
Obrázek 13. princip 3D pera Renegade [11]	20
Obrázek 14. tisk pomocí 3D pera Renegade [11].....	20
Obrázek 15. Tisk obličejových štítů [9].....	21
Obrázek 16. Druhy materiálů pro FDM včetně povrchových úprav [22]	21
Obrázek 17. Orientace zkušebního tělesa [23]	25
Obrázek 18. Lidské srdce vytištěné pomocí metody SLS [17]	26
Obrázek 19. Zvolená součástka[18].....	26
Obrázek 20. Vliv množství součástek na rychlost tisku[18].....	27
Obrázek 21. Zlomový bod při volbě metody SLS/Vstřikování[18].....	27
Obrázek 22. obličejová maska CIIRC RP95 [11]	28
Obrázek 23. HP Multi Jet Fusion 540 [28]	28
Obrázek 24. Filabot system [29].....	29
Obrázek 25. Koncept hotendy pro recyklaci 3D tisku	31
Obrázek 26. Popis 3D tiskárny Ender 3 pro [41].....	34
Obrázek 27. Vytištěná postavička Groot z recyklované filametny rPLA (Fiberlogy)	35

14 Seznam tabulek

Tabulka 1. Cenový rozbor materiálu	19
Tabulka 2. Mechanické vlastnosti materiálu PLA (Prusament PLA Prusa Galaxy Black 1kg) [23]	24
Tabulka 3. Mechanické vlastnosti materiálu PETG (Prusament PETG 1kg) [36]	24
Tabulka 4. Mechanické vlastnosti materiálu rPET (PET-A FILAMENT) [38]	25
Tabulka 5. Mechanické vlastnosti materiálu PETG (Prusament ASA 1kg) [37]	25
Tabulka 6. Doporučený poměr stanoven výrobcí – starý prášek/nový [16]	27

15 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] 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
- [3] *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. Scottsdale, Arizona: CustomPartNet, 2008 [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [4] 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>
- [5] *Přehled technologií 3D tisku* [online]. In: . 2018 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [6] HP Multi Jet Fusion. In: *3 Faktur* [online]. Moritz-von-Rohr Str. 1A, Jena: 3Faktur, 2020 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://3faktur.com/en/3d-printing-materials-technologies/hp-multi-jet-fusion-technology-overview/>
- [7] KAMRANI, Ali K. a Emad Abouel NASR. *Engineering Design and Rapid Prototyping* [online]. 1. Springer New York: Springer, 2010 [cit. 2020-07-21]. ISBN 978-0-387-95862-0. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=-CIR8ptaMZkC&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
- [8] A Review on Development of Medical Implants by Rapid Prototyping Technology. *International Journal of Pure and Applied Mathematics* [online]. Sofia: Academic Publications, 2011-, 2017, **117**(21), 257-276 [cit. 2020-07-25]. ISSN 1314-3395. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322096608_A_Review_on_Development_of_Medical_Implants_by_Rapid_Prototyping_Technology
- [9] ČÍŽEK, Jakub. Prusa Research vyrábí ochranné štíty a komunita dalších 3D tiskařů se organizuje pro dobrou věc na Facebooku Více na: <https://www.zive.cz/clanky/prusa-research-vyrabi-ochranne-stity-a-komunita-dalsich-3d-tiskaru-se-organizuje-pro-dobrou-vec-na-facebooku/sc-3-a-203049/default.aspx>. In: *Živě.cz* [online]. Brno, Jakubská 5, Česká republika: CZECH NEWS CENTER, 2020 [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/prusa-research-vyrabi-ochranne-stity-a-komunita-dalsich-3d-tiskaru-se-organizuje-pro-dobrou-vec-na-facebooku/sc-3-a-203049/default.aspx>
- [10] CIIRC ČVUT proti COVID-19. *Český institut informatiky robotiky a kybernetiky* [online]. Praha: ČVUT, 2020 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <https://www.ciirc.cvut.cz/cs/covid-2/>

- [11] *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>
- [12] BARTNIK, Nikodem. *Best way to connect 3D printed parts - welding with 3D pen!*. Youtube [online], 2017 [cit. 2020-07-27]. Dostupné také z: <https://www.youtube.com/watch?v=apf84-xhUGQ>
- [13] WALLACH, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [14] EKO MB S.R.O. *Recyklace*. Praha, 2020 [cit. 2020-07-27]. Dostupné také z: <https://www.ekomb.cz/recyklace/>
- [15] PRUSA RESEARCH A.S. *OCHRANNÉ ŠTÍTY PRO LÉKAŘE A PROFESIONÁLY*. Praha, 2020 [cit. 2020-07-27]. Dostupné také z: <https://www.prusa3d.cz/covid19/>
- [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] ŠMÍD, Jiří. 3D tisk pomáhá pediatrické kardiologii. *Technický týdeník* [online]. Praha: Business Media CZ, 2018 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/medicinska-technika/3d-tisk-pomaha-pediatricke-kardiologii_45755.html
- [18] BRAJLIH, T., M. PAULIC, T. IRGOLIC, Z. KADIVNIK, J. BALIC a I. DRSTVENSEK. Study of the complementary usages of selective laser sintering during the high volume production of plastic parts. *Rapid Prototyping Journal* [online]. Emerald Group Publishing Limited Copyright © 2016, Emerald Group Publishing Limited, 2016, **22**(4), 735-742 [cit. 2020-07-30]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-02-2015-0016/full/html?skipTracking=true>
- [19] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING*. 4. London: World Scientific Publishing Co. Pte., 2016. ISBN 978-9814571401.
- [20] MAZZANTI, Valentina, Lorenzo MALAGUTTI a Francesco MOLLICA. FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. *Polymers* [online]. Department of Engineering, Università degli Studi di Ferrara, via Saragat 1, Ferrara 44122, Italy, 2019, **11**(7), 1-22 [cit. 2020-07-31]. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11071094>. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/7/1094>
- [21] GEBHART, Andreas. *Understanding Additive Manufacturing*. 1. Germany: Hanser Publications, Munich, 2012 [cit. 2020-07-31]. ISBN 978-1-56990-507-4.
- [22] *PRŮVODCE MATERIÁLY* [online]. Praha: Prusa Research, 2020 [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>

- [23] *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
- [24] *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>
- [25] EKO MB S.R.O. *RECYKLOVANÝ FILAMENT RPLA – ČERNÁ, 1 KG*. Tábor, 2020 [cit. 2020-08-01]. Dostupné také z: <https://www.ekomb.cz/produkt/recyklovany-filament-rpla-cerna-1-kg/>
- [26] 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>
- [27] HP DEVELOPMENT COMPANY, L.P. *3D tiskárna HP Jet Fusion 540*. United States, 2019 [cit. 2020-08-01], 4 s. 4AA7-1970ENE. Dostupné také z: <https://www.3dees.cz/images/pdf/HP-Jet-Fusion-540-informacni-material.pdf>
- [28] JAMIE, D. HP Announce 4 New 3D Printers Including Full-Color Printers. In: *3D natives* [online]. France: © 3Dnatives 2020, 2018 [cit. 2020-08-25]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/>
- [29] PRESS INFORMATION. *Filabot* [online]. 2020 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.filabot.com/pages/press-1>
- [30] *Nylon FX256* [online]. Filamentum Manufacturing Czech [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/98v61k0zwc1czrg/Technical%20Data%20Sheet_Nylon%20FX256.pdf?dl=0
- [31] *3D tisk: Laboratoř prototypových technologií a procesů*. Liberec, 2020 [cit. 2020-11-29]. Dostupné také z: <https://cxi.tul.cz/sluzby/3d-tisk-a-prototypy/3d-tisk>
- [32] 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>
- [33] *What is PolyJet 3D Printing Technology | Smooth, Multi-Material Additive Manufacturing*. Youtube [online], 2016 [cit. 2020-09-01]. Dostupné také z: <https://www.youtube.com/watch?v=Cz7pKRcuTgs>
- [34] KELLER, Petr a Radomir MENDRICKY. PARAMETERS INFLUENCING THE PRECISION OF SLM PRODUCTION. *MM Science Journal* [online]. 2015, , 705-710 [cit. 2020-09-02]. DOI: 10.17973/MMSJ.2015_10_201540. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/december-2017/articles/parameters-influencing-the-precision-of-various-3d-printing-technologies>

- [35] SÚKAL, Jan. *ANALÝZA VLIVU RECYKLACE PRÁŠKOVÉ OCELI NA POROZITU DÍLŮ VYRÁBĚNÝCH TECHNOLOGIÍ SELECTIVE LASER MELTING*. Brno, 2017 [cit. 2020-09-02], 49 s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=149865. Diplomová práce. VUT Brno.
- [36] Technický List: Prusament PETG od Prusa Polymers. In: *Prusa Research* [online]. Praha [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/fotky/PETG_TechSheet_CZE.pdf
- [37] *Technický list: Prusament ASA od Prusa Polymers* [online]. Praha: Prusa Research [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/fotky/ASA_DataSheet_CZE.pdf
- [38] *TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:: PET-A FILAMENT* [online]. EKO MB [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://www.ekomb.cz/wp-content/uploads/2019/11/TECHNICAL_DATA.pdf
- [39] *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/>
- [40] MACHINES. *Filabot* [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.filabot.com/collections/filabot-core>
- [41] *Toner Depot* [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.tonerdepot.cz/testy-tiskaren/creality-ender-3-pro>
- [42] CHUA, Chee Kai. a Kah Fai. LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fourth edition of Rapid prototyping*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte., 2014. ISBN 9789814571401.
- [43] *All 10 Types of 3D Printing Technology in 2019* [online]. Micro3D [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://themicro3d.com/types-3d-printing/>
- [44] *How Do You Recycle Acrylic Resin? AZO Materials* [online]. 2012 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7945>
- [45] EVGENIY. *Creality Ender 3 Pro* [online]. 13.5.2020 [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/creality-ender-3-pro-1>