

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2023

**VOJTĚCH
JANEČEK**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Možnosti recyklace filamentu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Vojtěch Janeček

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Jan Šimota

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janeček** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **501514**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Možnosti recyklace filamentu

Název bakalářské práce anglicky:

Filament recycling options

Pokyny pro vypracování:

Současný stav FDM technologie 3D tisku, trendy, nové materiály.
Rešerše v oblasti recyklace materiálů používaných při FDM technologii tisku.
Návrh mechanismu pro recyklaci materiálů.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Šimota ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Šimoty, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Šimotovi za cenné připomínky a rady při vypracování mé bakalářské práce. Mé poděkování patří i Bc. Martinu Šnidaufovi za vstřícné poskytnutí svých znalostí, které mi napomohly ke zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině, která za mnou stála po celou dobu studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou 3D tisku a recyklací spojenou s odpadním materiálem vznikajícím v procesu technologie FDM. V úvodní části práce je cílem představit 3D tisk samotný a přiblížit jednotlivé základní technologie 3D tisku, dále jsou v teoretické části práce zaznamenány základní materiály používané v technologii FDM a přiblížení pojmu samotné recyklace. Na závěr teoretické části je přiblížen současný stav na poli recyklace v technologii FDM.

Praktická část bakalářské práce si klade za úkol návrh a konstrukci recyklačního zařízení vhodného pro domácí použití a tím pomoci v problematice využívání odpadních materiálů vznikajících v procesu technologie FDM. V této části je zaznamenán vývoj prototypu odpovídajícího na tento problém a jeho ekonomické zhodnocení.

| | |
|-------------------------------|---|
| Název diplomové práce: | Možnosti recyklace filamentu |
| Autor práce: | Vojtěch Janeček |
| Vedoucí práce: | Ing. Jan Šimota |
| Akademický rok: | 2022/2023 |
| Vysoká škola: | ČVUT v Praze, Fakulta strojní |
| Ústav: | 12134 - ústav technologie obrábění, projektování a metrologie |
| Vedoucí ústavu: | Ing. Libor Beránek, Ph.D. |
| Rozsah práce: | 60 stránek, 4 tabulek, 23 obrázků |
| Klíčová slova: | 3D tisk, FDM, Aditivní výroba, recyklace, filament |

Annotation

This bachelor's thesis deals with the issues of 3D printing and recycling associated with the waste material generated in the FDM (Fused Deposition Modeling) technology process. The introductory part of the thesis aims to present 3D printing itself and provide an overview of the various basic 3D printing technologies. Furthermore, the theoretical section of the thesis covers the fundamental materials used in FDM technology and an explanation of the concept of recycling itself. The conclusion of the theoretical part presents the current state of recycling in FDM technology.

The practical part of the bachelor's thesis focuses on the design and construction of a recycling device suitable for domestic use, with the aim of addressing the problem of utilizing waste material generated in the FDM technology process. This section documents the development of a prototype designed to tackle this problem and includes an economic evaluation of the prototype.

| | |
|-----------------------------------|--|
| Title of the final thesis: | Options for filament recycling |
| Author: | Vojtěch Janeček |
| Supervisor: | Ing. Jan Šimota |
| Academic year: | 2022/2023 |
| University: | CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering |
| Department: | 12133 – Department of Manufacturing Technology |
| Head of department: | Ing. Libor Beránek, Ph.D. |
| Extent: | 60 pages, 4 tables, 23 pictures |
| Keywords: | 3D printing, FDM, Additive manufacturing, recycling, filament |

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod a cíl práce | 11 |
| 2. Historie aditivních technologií..... | 13 |
| 3. Pojmy..... | 15 |
| 3.1. Aditivní výroba (Additive Manufacturing)..... | 15 |
| 3.2. Vrstva..... | 15 |
| 3.3. Rapid Prototyping (RP) | 15 |
| 3.4. RepRap..... | 15 |
| 3.5. Extruder | 16 |
| 3.6. Tryska..... | 16 |
| 3.7. Hotend..... | 16 |
| 4. Technologie 3D tisku..... | 17 |
| 4.1. Fotopolymerizace | 18 |
| 4.2. Tavení prášku | 19 |
| 4.3. Přímé nanášení materiálu..... | 20 |
| 4.4. Laminování..... | 21 |
| 4.5. Extruze filamentu..... | 22 |
| 5. Materiály ve 3D tisku | 23 |
| 6. Materiály pro FDM/FFF | 24 |
| 6.1. ABS | 24 |
| 6.2. Nylon/PA..... | 25 |
| 6.3. PET/PETG..... | 25 |
| 6.4. PLA..... | 25 |
| 6.5. PC..... | 26 |
| 6.6. Další [2] [14]..... | 26 |
| PP | 26 |
| ASA..... | 27 |

| | |
|--|----|
| PVA..... | 27 |
| Filament s uhlíkovými vlákny | 27 |
| Dřevěný filament..... | 27 |
| 7. Recyklace..... | 28 |
| 7.1. Recyklace plastů..... | 28 |
| 7.1.1. Mechanická recyklace..... | 29 |
| 7.1.2. Chemická recyklace..... | 29 |
| 8. Současný stav recyklace v FDM 3D tisku | 30 |
| 8.1. Vliv recyklace na mechanické vlastnosti a strukturu materiálů [18]..... | 31 |
| 8.2. Dnešní možnosti nakládání s odpadem z FDM tisku | 33 |
| 8.3. Zařízení pro recyklaci filamentu | 34 |
| 8.3.1. 3DEVO..... | 34 |
| 8.3.2. Filastruder | 35 |
| 9. Konstrukce zařízení | 37 |
| 9.1. Řídící jednotka | 37 |
| 9.2. Extrudér | 41 |
| 9.3. Naviják filamentu | 45 |
| 10. Ekonomické náklady | 49 |
| 11. Diskuse | 51 |
| 12. Závěr | 52 |
| 13. Reference | 53 |
| 14. Seznam tabulek..... | 57 |
| 15. Seznam obrázků..... | 58 |

Seznam zkratek

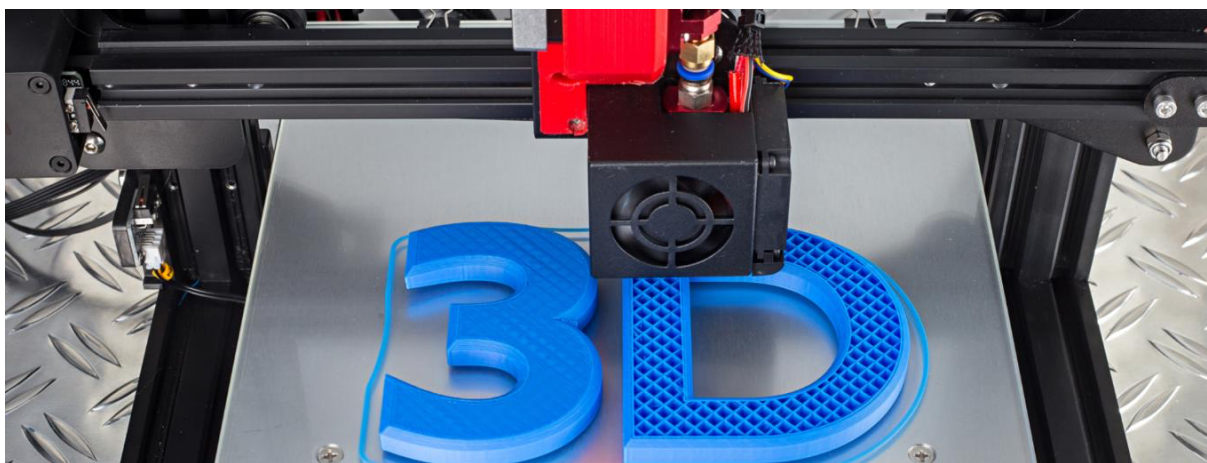
| zkratka | vysvětlení |
|---------|--------------------------------|
| 3D | Třídimenzionální |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| SLA | Stereolitografie |
| SLS | Selective Laser Sintering |
| AT | Aditivní technologie |
| AV | Aditivní výroba |
| RP | Rapid prototyping |
| DLP | Digital Light Projector |
| PBF | Powder Bed Fusion |
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering |
| SHS | Selectiv Heat Sintering |
| EBM | Electron Beam Melting |
| DMD | Direct Metal Desposition |
| FFF | Fused Filament Fabrication |
| ABS | Akrylonitril Butadien Styren |
| PA | Polyamid |
| PET | Polyetylen Tereftalát |
| PETG | Polyetylen Tereftalát Glykolem |
| PLA | Polylaktid |
| PC | Polykarbonát |
| PP | Polypropylen |
| ASA | Acrylonitrile Styrene Acrylate |
| PVA | Polyvinyl Alcohol |

1. Úvod a cíl práce

Aditivní výroba (AV) je velmi mladé odvětví strojírenství, které se datuje teprve do 80. let minulého století. Tato technologie je oproti konvenčním technologiím založena na principu přidávání materiálu namísto jeho odbírání, jako je tomu například u soustružení. Tento fakt dovoluje výrobu velmi topologicky složitých návrhů, které by konvenčními technologiemi nebylo možné dosáhnout. Jako základní princip aditivních technologií lze považovat postupné kladení materiálu ve vrstvách. [1]

První patent v oblasti 3D tisku byl podán v USA roku 1986 Chuckem Hallem a je mu tak možná neprávem přisuzován titul vynálezce 3D tisku. Úplně první patentovaná aditivní technologie byla stereolitografie (SLA) a nedlouho na to na sebe nenechali čekat další, jako například technologie SLS (Selective Laser Sintering) nebo FDM (Fused Deposition Modeling). I přes veliký pokrok v tomto velmi mladém strojírenském odvětví jsou tyto nejstarší technologie stále jedny z nejpoužívanějších. [2]

Patenty z 80. let na tyto technologie jsou již veřejné, a to bezpochyby pomohlo k dalšímu růstu tohoto odvětví, a to například díky nové konkurenci a komercializaci. Tento fakt se projevil velmi rychle na klesající pořizovací ceně některých 3D tiskáren a následném rychlém rozšíření do rukou nadšenců. Dnes není problém ponořit se do aditivních technologií s pár stokorunami. Nejčastějšími „hobby tiskárnami“ jsou dnes především ty s technologií FDM a to z důvodu jejich „out of the box“ řešení neboli možnosti tisknutí takřka ihned po rozbalení z krabice.



Obrázek 1 - Příklad využití 3D tisku [11]

Jednou z největších výhod AV je především možnost velmi rychlé cesty od nápadu k prvotnímu dílu, a proto se 3D tisk používá k výrobě prototypů. Tato praxe je s 3D tiskem natolik spjata, že si našla dnes již hojně používaný název rapid prototyping (RP). Další, stejně tak veliká přednost, je variabilita ve výrobě, kdy se zvyšování komplexnosti výrobku nepromítá do zvyšování výrobního času ani cen.

Využití 3D tisku je dnes velmi pestré, a to od leteckého průmyslu přes stavitelství až k lékařství nebo šperkařství. Se stále probíhajícím vývojem AT se bude 3D tisk více ozývat i v našem každodenním životě třeba například v domácnostech při drobných opravách. [3] [1]

Pro správný a očekávaný výsledek tisku je za potřebí vybrat správnou technologii 3D tisku, správné tiskové parametry a v neposlední řadě materiál.

Dnes je na výběr ze širokého spektra materiálů a vývojem stále další přibývají. Základní rozdělení je však takové, jestli se materiál nachází v tekutém nebo pevném skupenství, jestli se jedná o drát nebo prášek, nebo jestli je materiálem plast, kov, keramika, vosk nebo spoustu dalších.

Cílem této práce je představení obecné problematiky 3D tisku se zaměřením na technologii FDM, zamyšlení se nad problematikou opakovaného využití plastového materiálu a s riziky s tím spojenými a představení možností recyklace odpadu vzniklého v průběhu FDM 3D tisku. Praktická část této práce zkouší přijít s odpovědí na tuto otázku konstrukcí recyklačního zařízení pro násobné využití FDM tisknutého materiálu.

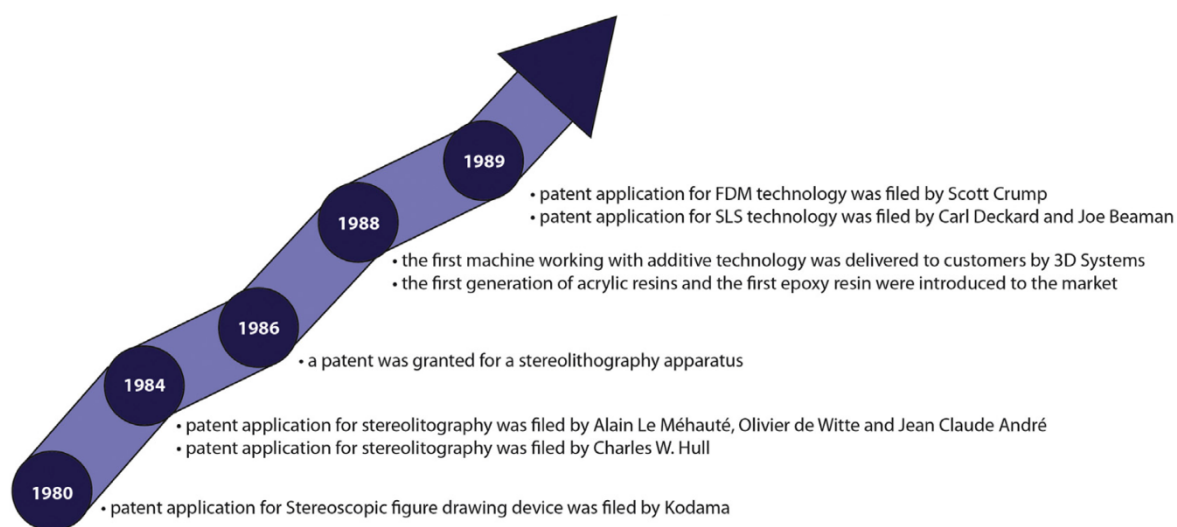
2. Historie aditivních technologií

Historie 3D tisku, tak jak ho známe dnes, se začala psát již před 40 lety. To bylo období, ve kterém se první vědci začali zajímat o způsob rychlejšího vytváření prototypů. Jedním z řešení, na které přišli, bylo vytvrzování tekutých polymerů pomocí laserového paprsku. V 70. letech se touto myšlenkou zabýval například Japonec Hideo Kodama nebo francouzský tým pod vedením P. A. Cirauda. Nikdo z jmenovaných však nepodal konkrétní patent na určitou technologii, a tak toto prvenství patří Američanu Chucku Hallovi, který je znám především díky první komerčně používané technologii 3D tisku stereolitografii (SLA) patentované roku 1984. Část vůbec prvního patentu si lze prohlédnout na obrázku 3.

Historie aditivních technologií (AT) by však mohla sahát až do 19. století a záleží jen na úhlu pohledu. Za pradávného předchůdce AT by šlo považovat svařování elektrickým obloukem, které se datuje k roku 1881. Vynálezu 3D tisku také předcházela vynález inkoustové tiskárny, která dala základ nejedné technologii 3D tisku.

Zanedlouho po vynálezu Chucka Halla byly patentovány i další postupy vytvrzování materiálu po vrstvách. V roce 1989 byly zaznamenány dva veliké průlomové ve 3D tisku a to zejména patentem Carla Deckarda na technologii SLS a patentem Scotta Crumpa na FDM tisk. Obě technologie pracují na rozdíl od SLA s materiálem v pevném skupenství. SLS je technologie založená na postupném spékání práškového materiálu a FDM pracuje s plastovým drátem (filamentem). Vynálezce technologie FDM stojí také za založením firmy Stratasys, jedné z největších v odvětví AT. Časovou osu vývoje 3D tisku si lze prohlédnout na obrázku 2.

S vývojem 3D tisku jako takového se vyvíjely i programy pro něj určené. Programy jsou potřeba jak pro tvorbu 3D modelů tak ale i pro jejich následné přeložení do jazyka, kterému 3D tiskárna porozumí. Software má za úkol převést model (např. ve formátu STL) do jednotlivých vrstev a vygenerovat G kód, díky tomu pak tiskárna ví kde a jak se pohybovat.



Obrázek 2 - Vývoj AT v 80. létech [2]

3. Pojmy

3.1. Aditivní výroba (Additive Manufacturing)

Výroba spočívající v přidávání materiálu ve vrstvách na rozdíl od konvekčních metod, kdy dochází k uberu materiálu. Vrstvy jsou definovány pomocí CAM softwaru z 3D modelu. Do pojmu aditivní výroba se řadí všechny druhy 3D tisku jako je například SLA, SLS a FDM. [1]

3.2. Vrstva

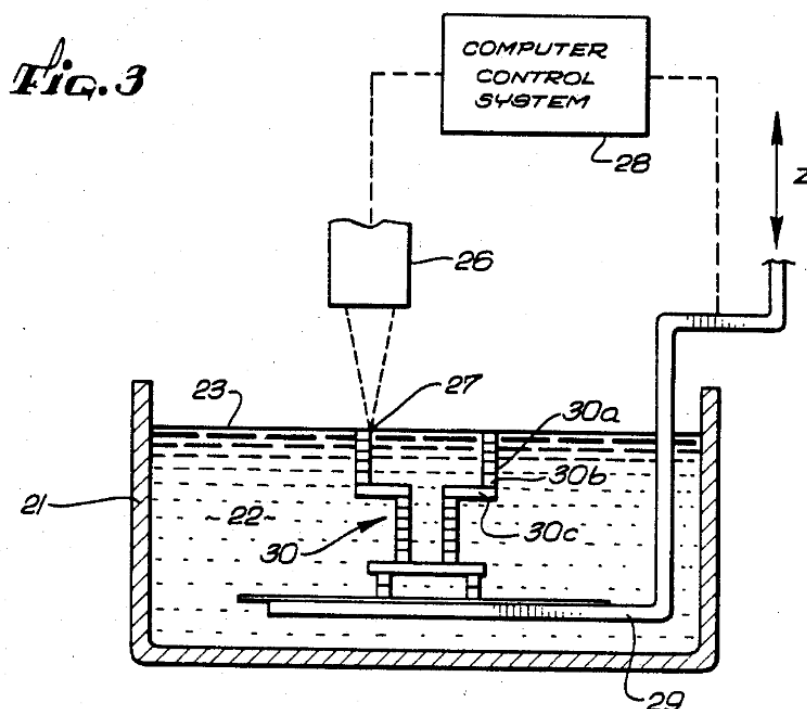
Model je před tiskem rozložen do stejně vysokých vrstev. Výška vrstvy přímo ovlivňuje tiskový čas a výslednou kvalitu povrchu.

3.3. Rapid Prototyping (RP)

Soubor úkonů na jejichž konci se nachází fyzický prototyp vytištěný na 3D tiskárně. Prototyp většinou není vhodný pro koncové využití a slouží především pro vizuální představu o modelu. [4]

3.4. RepRap

Mezinárodní open-source projekt založený pro zlevnění 3D tisku. Je založený na principu samotisknoucích se tiskáren, jinými slovy tiskárny tisknou prvky, kterými je možná jejich samotná oprava nebo stavba dalších tiskáren. [5]



Obrázek 3 - Patent US4575330 podán Chukem Hallem, SLA [6]

3.5. Extruder

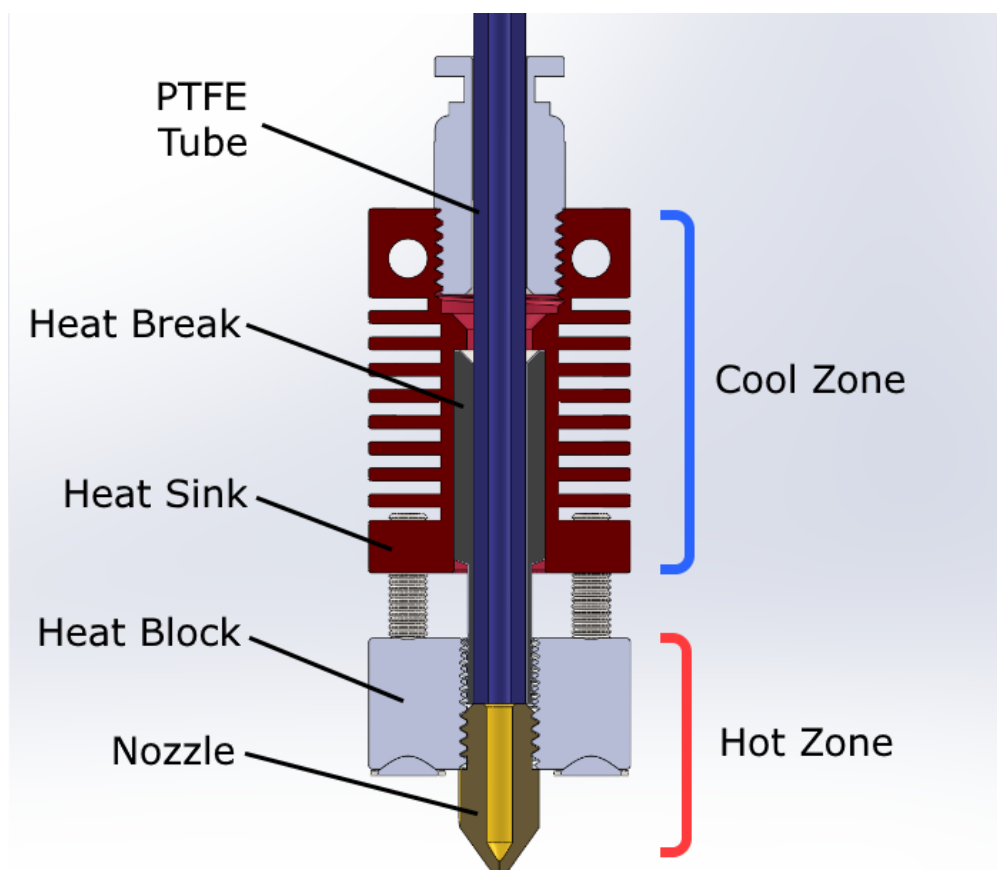
Část tiskárny, která je zodpovědná za podávání filamentu do Hotendu, kde se následně taví a vrstvu po vrstvě se skládá na podložku. Extruder může být na principu přímého nebo nepřímé podávání. Záleží na tom, jakým způsobem je filament vtlačován do Hotendu. Schéma obou principů si můžeme prohlédnout viz Obrázek 9.

3.6. Tryska

Je to poslední část samotné tiskárny, která je v kontaktu s extrudovaným materiálem. Jedna z nejdůležitějších částí Hotendu, která má velký vliv na výslednou kvalitu tisku. Trysky se vyrábí ve velkém spektru materiálů a průměrů.

3.7. Hotend

Doslovný překlad zní „horký konec“ což je v podstatě přesné. Jedná se o důležitý komplet součástek používaných v FDM tisku. Skrze hotend prochází filament, který se v něm taví na tvárné vlákno. Schéma Hotendu si můžeme prohlédnout na obrázku 4. [7]



Obrázek 4 - schéma Hotendu [8]

4. Technologie 3D tisku

V každém odvětví průmyslu je klíčové zvolení správné kombinace technologického postupu a vhodného materiálu a u 3D tisku tomu není jinak. Pro dosažení co nejlepších mechanických vlastností a finanční výhodnosti, je zapotřebí zvolit tu nejlepší možnou kombinaci.

Základními technologickými skupinami jsou: [9]

Fotopolymerizace

Tavení prášku

Přímé použití energie

Laminování

Extruze filamentu

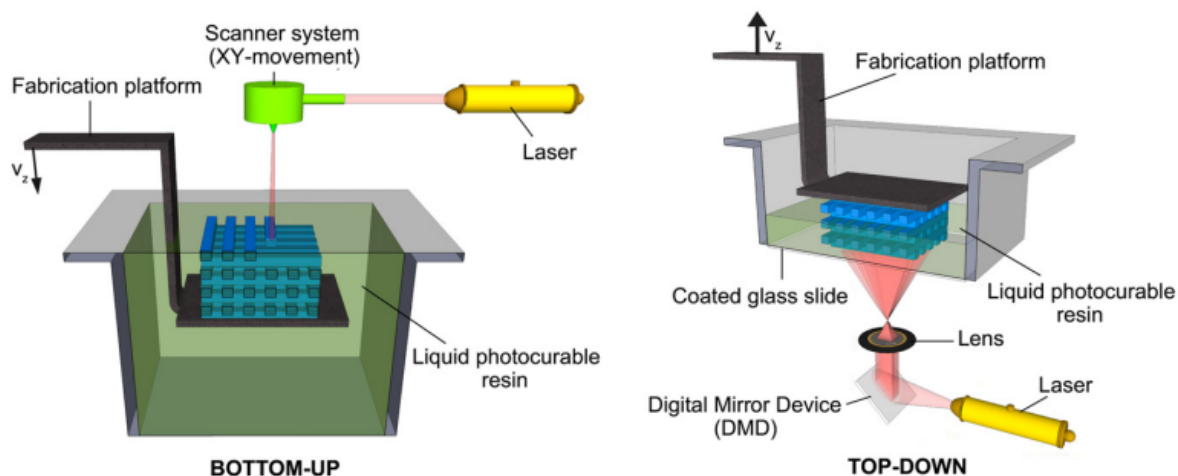
4.1. Fotopolymerizace

Fotopolymerizace je založená na ovlivňování tekuté pryskyřice (resinu) UV světelným zářením. Dopadem UV světla na resin dochází k jeho vytvrzování a postupným posuvem podložky v ose Z dochází k vytvrzování vrstvy po vrstvě. Do této skupiny patří vůbec nejstarší technologie 3D tisku SLA (Stereolitografie) nebo DLP (Digital Light Projector). Technologie SLA využívá k vytvrzování resinu laser a DLP projektor. Tyto technologie 3D tisku se využívají spíše pro prostorově nenáročnější prvky.

Výhody fotopolymerizace, v porovnání s FDM tiskem, jsou například řádově vyšší přesnost a tvorba hladkého povrchu.

Nevýhodou je pak náročnější příprava před samotným tiskem a odladění tiskových parametrů.

Zajímavostí u tohoto druhu tisku je možnost tisknout ve dvou směrech, kdy se při každém způsobu výtisk pohybuje postupně nahoru (bottom-up) nebo dolů (top-down). Oba způsoby narážejí na jiná technologická úskalí. Při tisku top-down nastává při špatném odladění tiskových parametrů možnost odloupení od vlastní tiskové podložky vlivem vlastní váhy. Při tisku bottom-up jsou kladeny větší nároky na prostorovou náročnost tiskárny. Oba principy si můžeme prohlédnout na obrázku 5 [1]



Obrázek 5 - Schéma vytvrzování fotopolymeru pomocí laseru [10]

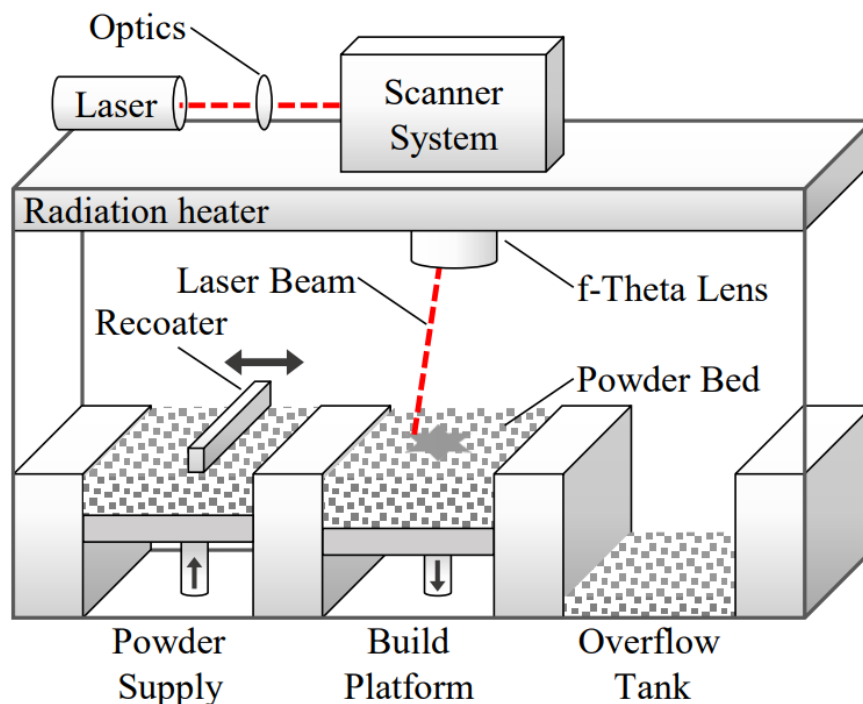
4.2. Tavení prášku

Metoda založená na principu PBF (Powder Bed Fusion), kdy je polotovarem pro tisk materiál ve formě prášku. Prášek se nanese po celém povrchu podložky ve formě tenké vrstvy, ve které se laserem speče požadovaný obrys a postup se opakuje. Nejznámějšími představiteli této technologie je SLS (Selective Laser Sintering), nebo DMLS (Direct Metal Laser Sintering). SLS pracuje s polymerním práškem a DMLS s kovovým. Obdobou sintrování pomocí laseru může být tepelné ovlivnění prášku tepelnou hlavou. Na tomto principu pracuje technologie SHS (Selectiv Heat Sintering). Princip technologií si lze prohlédnout na obrázku 6.

Výhodou těchto technologií mohou být, po správném odladění parametrů, výborné mechanické vlastnosti a možnost opětovného použití nespečeného prášku.

U spékání kovových prášků jsou nevýhodou vysoká vnitřní pnutí, a proto se často musí přistupovat k postprocesingu ve formě tepelného zpracování což prodlužuje a zdražuje výsledný produkt

Uplatnění výrobků zhotovených těmito technologiemi se nachází spíše u funkčních dílů než u prototypů. [1] [11]



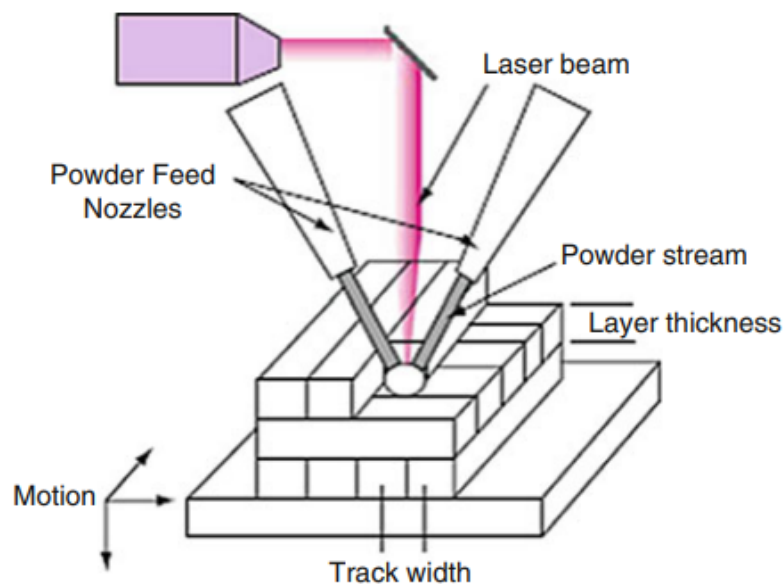
Obrázek 6 - Schéma technologie Selectiv Laser Sintering [12]

4.3. Přímé nanášení materiálu

Technologie pracující na principu spojování materiálu v okamžiku jeho nanesení. Podstata technologie teoreticky dovoluje aditivní výrobu s různými druhy materiálů, ale nejčastěji se setkáváme s přímou depozicí kovových prášků. Ke spojení jednotlivých vrstev dochází za působení elektrického oblouku, elektronového paprsku nebo plazmy. Součástí takového technologického postupu musí být zaručena odpovídající okolní atmosféra, a tak se tiskne buď za pomoci inertních plynů nebo ve vakuu. Možnými zástupci jsou EBM (Electron Beam Melting) nebo DMD (Direct Metal Desposition). Základní materiál bývá nejčastěji ve formě prášku. I v této variantě tisku jsou dosahovány vysoké mechanické vlastnosti. Oproti DMLS jsou tyto technologie rychlejší a nepřístupuje se k tepelnému zpracování. Princip technologie si lze prohlédnout na obrázku 7.

Nevýhodou těchto metod je nižší přesnost výroby a dražší provoz tiskárny.

Uplatnění si výtisky stejně jako u minulé skupiny hledají již spíše v reálném provozu než v prototypové výrobě. [3]



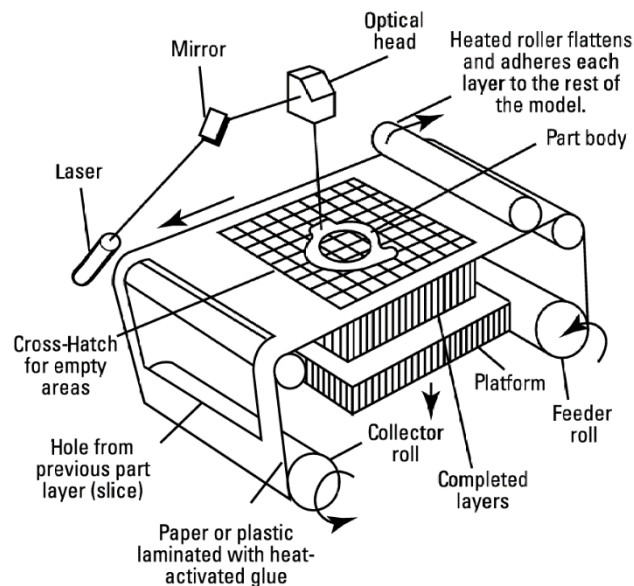
Obrázek 7 - Schéma technologie přímého nanášení prášku [3]

4.4. Laminování

Podstata této technologie spočívá ve vyřezávání a následném skládání jednotlivých vrstev do požadovaných objektů. Polotovarem jsou různé druhy fólií, papír, kompozity nebo slabé plechy. Tvar vrstvy je nejprve vyřiznut do tenké fólie o tloušťce cca 0,2 mm, na kterou je nanесeno následně lepidlo. Představitelem této technologie je LOM (Laminated Object Manufacturing). Princip technologie LOM si lze prohlédnout na obrázku 8

Do předností řadíme relativně nízké pořizovací náklady tiskárny nebo rychlost tisku.

Slabou stránkou je pak především tvorba velkého množství odpadu, který tvoří zbytky oříznuté fólie. [1] [9]



Obrázek 8 - Laserem řezané fólie s teplotně aktivovaným lepidlem [1]

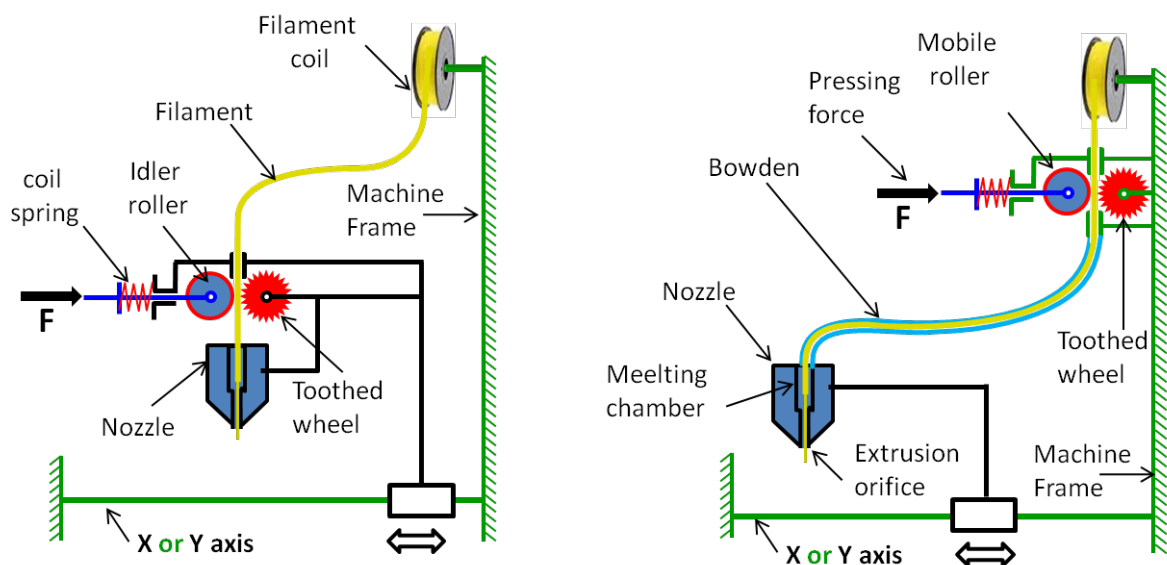
4.5. Extruze filamentu

Technologie pracující na protlačování filamentu skrze extrudér, kdy dochází k natavování a následnému vrstvení tekutého polymeru. Princip fungování FDM technologie si lze prohlédnout na schématu v obrázku 9. Do této kategorie patří dnes nejrozšířenější metoda 3D tisku FDM/FFF. FDM je jednou z nejpoužívanějších technologií pro tisk prototypů. Ve srovnání s technologií SLA je výsledná kvalita povrchu podstatně horší. K rozšíření této technologie velmi přispěl zakladatel projektu RepRap, který dal světu technologii FFF. FFF je takřka totožná s FDM, ale hned od začátku byla vedena jako open-source projekt, což řádově urychlilo vývoj a následnou komercializaci.

Výhodou je dnes vysoká škálovatelnost pořizovacích nákladů tiskáren, kdy lze nejlevnější kusy pořídit i v řádech stokorun. Dalším pozitivem je snadnost práce s tiskárnou, a i začátečník dojde k rychlému pochopení problematiky. Jelikož se jedná o jednu z nejrozšířenějších metod tisku, je zde vysoký počet materiálů, ze kterých lze tisknout.

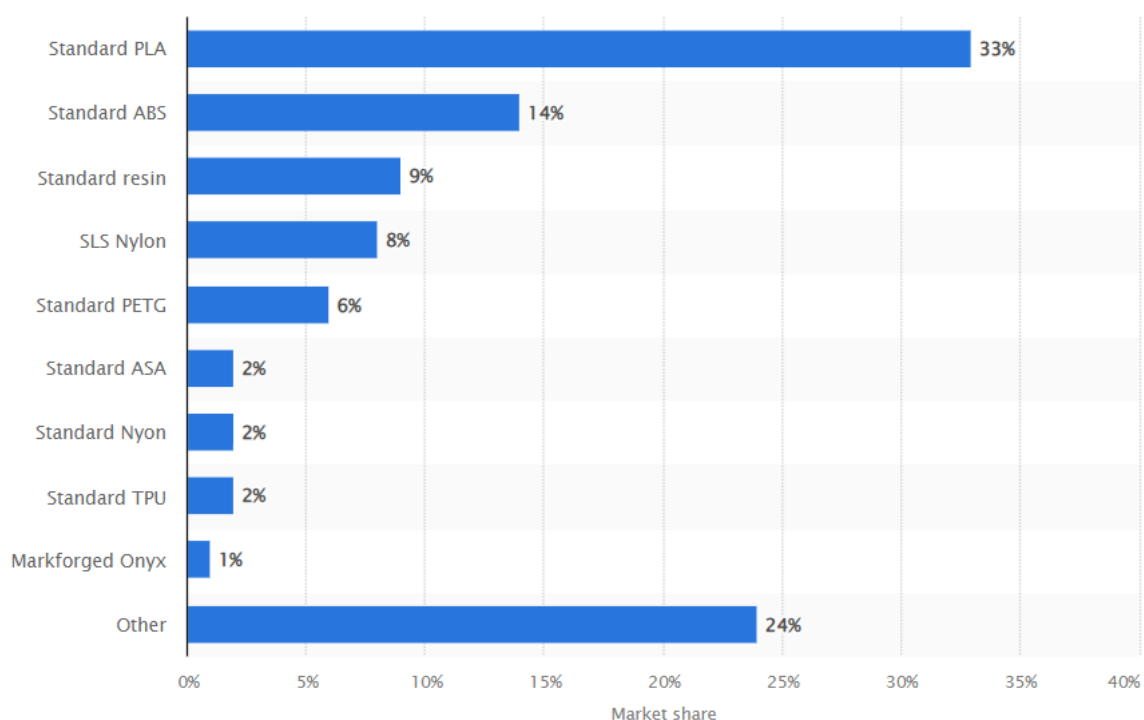
Za nevýhody může být považován výsledný povrch s viditelným žebrováním nebo minimální možná hranice rozlišení.

Prvky vytištěné pomocí technologie FDM mohou sice sloužit i jako funkční součásti, FDM tisk je ale jeden z nejvhodnějších pro prototypování. [1] [13]



5. Materiály ve 3D tisku

Po správném vybrání technologie, kterou se bude výrobek tisknout je stejně tak důležitý výběr materiálu. Materiály používané ve 3D tisku lze rozdělit dle několika kritérií. Tím první je však v jaké formě, potažmo skupenství se nachází. Rozlišujeme materiály ve formě tekutiny, drátu a prášku. Další rozdělení je už podle druhu materiálu. Hlavními zástupci jsou plasty a kovy. V aditivní výrobě jsou používány však i další, a to například keramika, písek, vosk nebo i beton. [3]



Obrázek 10 - Nejpoužívanější materiály ve 3D tisku k červenci 2018 [28]

6. Materiály pro FDM/FFF

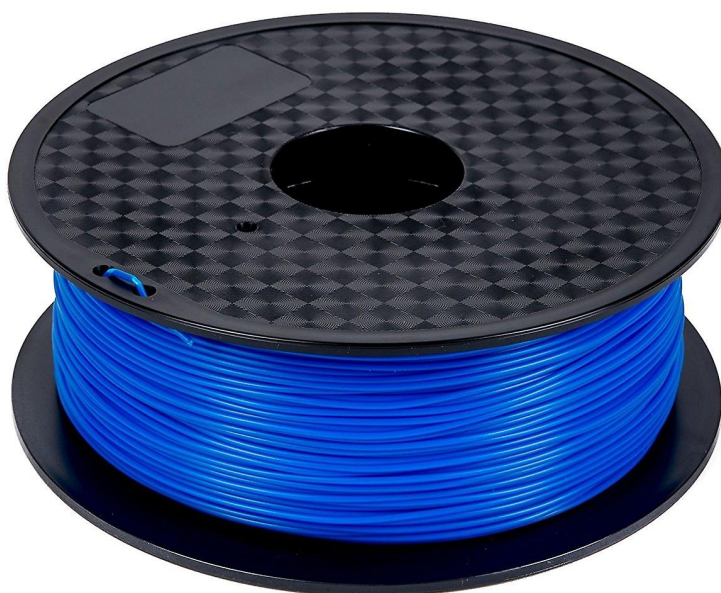
Materiál pro FDM nebo FFF tisk se nazývá filament. Filament je polotovar ve formě plastové struny/drátu a bývá zpravidla navinut na cívce (viz. obrázek 11). Prodává se v různém spektru průměrů a na kilogramy. Vývoj nových materiálů nezastavuje a s nadsázkou se dá říct, že nový vhodný materiál vzniká každý den. Dnes rozeznáváme několik stovek, ne-li tisíců, druhů materiálů vhodných pro FDM tisk. Následující podkapitoly představují základní druhy používaných materiálů a mají za účel přiblížit ty nejpoužívanější nebo nejzajímavější.

6.1. ABS

Akrylonitril Butadien Styren je spjatý se samotným vznikem 3D tisku a je tak jeden z nejdéle používaných polymerů v technologii FDM. I přes tento fakt se v dnešní době stále jedná o jeden z nejvíce používaných termoplastů pro tisk vůbec.

+ Jeho nespornou výhodou je nízká pořizovací cena, mechanická pevnost, chemická i teplotní odolnost a nízká náchylnost ke strigování.

- Materiál sice je recyklovatelný ale jen těžce, proto v dnešní době končí spíše na skládkách. Dalšími nevýhodami je jeho odér při tištění nebo špatná odolnost vůči UV záření, což jej diskvalifikuje z použití ve venkovním prostředí. [2]



Obrázek 11 - Filament na cívce [29]

6.2. Nylon/PA

Nylon spadá do široké skupiny polymerů zvaných Polyamidy, avšak tyto názvy se navzájem zaměňují. Nylon je, stejně jako ABS, spjatý se vznikem technologie FDM, kdy tyto dva materiály byly Scottem Crumpem použity jako vůbec první.

+ PA jsou oblíbené pro svou tuhost a zároveň částečnou flexibilitu. Pořizovací ceny jsou také velmi přívětivé a při jejich tavnosti nedochází k uvolňování žádných nepříjemných pachů.

- Jejich největší problém představuje jejich hydrofilní vlastnost. Při kontaktu s vodou, nebo jen vlhkostí, mají tendenci se rozpadat. Neodolávají dobře ani nízkým teplotám, při kterých křehnou. [2]

6.3. PET/PETG

Polyetylen Tereftalát/Glykolem modifikovaný Polyetylen Tereftalát jsou materiály spadající do skupiny Polyesterů a v 3D tisku jsou velmi oblíbené pro své tiskové vlastnosti, obzvláště pak PETG. Jsou to jedny z nejlépe recyklovatelných materiálů používaných v technologii FDM.

+ Jejich velikou výhodou jsou mechanické vlastnosti jako například mechanická odolnost, ať už vůči konstantnímu namáhání nebo nárazům. Kladnou tiskovou vlastností je například malé smršťování, nebo minimální tendence ke kroucení. Hodí se i k docílení lesklého povrchu.

- PETG je náchylnější ke stringování (nežádoucí efekt při 3D tisku) a lepení se v průběhu tisku. Tiskový čas patří spíše k delším. Další nevýhodou je vysoká teplota tisku, a s tím nutnost vyhřívání podložky [2]

6.4. PLA

Polylaktid neboli kyselina polylaktová je bioplast nevyrábějící se z ropy nýbrž z obnovitelných zdrojů, jako je například kukuřičný škrob. PLA je tedy biologicky odbouratelný. Polyaktid je dnes možná nejpoužívanější materiál v domácím tisku. Materiál je to sice biodegradabilní, ale doba úplného rozkladu v přírodě

může trvat dva a více roků v závislosti na okolních podmínkách nebo velikosti výtisku.

+ Mezi jeho největší přednosti patří ekonomičnost, ekologičnost nebo nízká teplota tisku.

- S nízkou teplotou tisku je spojená i nízká teplotní odolnost. Dalším negativem je jeho špatná snášenlivost s UV zářením. I při zamezení dopadu slunečního světla jsou však výrobky náchylné k postupné degradaci. Tento fakt neplatí jen pro hotové výtisky, ale i pro samotný filament. Je tedy nutné tisknout z nových nebo velmi dobře skladovaných návinů. [2] [14]

6.5. PC

Polykarbonát je nejpevnější termoplast používající se v konzumním FDM tisku. Jeho vysoké mechanické vlastnosti jsou však vykoupeny velmi vysokou teplotou tisku. S PET je to jeden z mála materiálů, který se v reálném světě i prakticky recykluje.

+ Jeho největší předností je vysoká houževnatost a nárazuvzdornost, a to až do -20°C . PC je přirozeně, jako jeden z mála využívaných materiálů, plně průhledný. Je i vysoce flexibilní. Další mechanickou vlastností je dobrá otěruvzdornost.

- Pohlcuje vzdušnou vlhkost a ztrácí tak na svých schopnostech. Pro tisk je nutná vysoká teplota trysky i podložky, což je energeticky náročné. Při tisku má mírný charakteristický zápach. Není tak uživatelsky přívětivý jako jiné materiály a vyžaduje již zkušenost operátora tiskárny. V neposlední řadě je PC finančně náročný. [2]

6.6. Další [2] [14]

PP

Charakteristikou polypropylenu je jeho velmi vysoká únavová odolnost. Je velmi těžko tisknutelný kvůli jeho vysokému smršťování nebo špatné přiléhavosti k podložce.

ASA

Acrylonitrile Styrene Acrylate byl vyvinut jako alternativa k ABS. S ABS sdílí velmi podobnou strukturu a většinu kladných i záporných vlastností. Jeho největší předností je odolnosti proti venkovním živlům.

PVA

Polyvinyl Alcohol je výborný podpůrný materiál. Jeho pozitivní i negativní vlastnosti jsou předurčeny jeho nekompatibilitou s vodou. Rozpustnost ve vodě je kladná vlastnost při oddělování podpor od výrobku, ale negativní při použití samotného materiálu pro výtisky. Materiál je to biodegradabilní a netoxický.

Filament s uhlíkovými vlákny

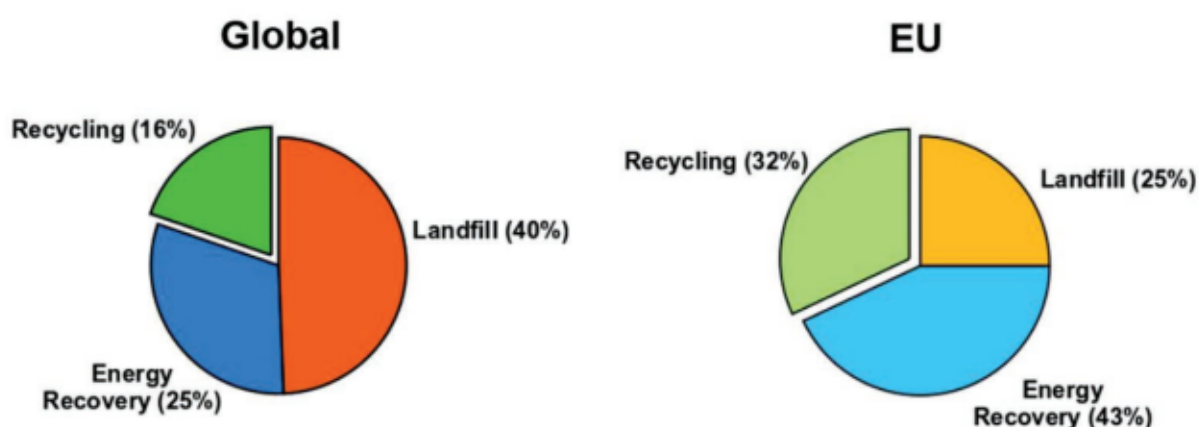
Jedná se o kompozitní materiál. V tomto případě polymer slouží jako pojivo a vlákna působí jako zpevňovací prvek. Tento materiál je více či méně experimentální a jeho použití ještě nepokročilo do konzumních tiskáren. Jeho přednostmi může být zvýšená tuhost a pevnost nebo vysoká rozměrová stabilita.

Dřevěný filament

I když by se to mohlo zdát, tak tento materiál není pouze ze dřeva, ale jako základ slouží zase polymer. Jedná se tedy také o kompozitní materiál. Nejčastěji jako pojivo slouží PLA. Dřevo se do filamentu přidává jen kvůli estetickým vlastnostem, a naopak většinou zhoršuje mechanické vlastnosti. Dřevo klade větší nároky na tiskovou hlavu, kterou abrazivně vydírá.

7. Recyklace

Recyklací se myslí jev, díky kterému se z vyprodukovaného odpadu znovu stávají výrobky nebo materiály, sloužící pro původní nebo nové účely. Nejefektivnějším způsobem nakládání s odpadem je žádný nevyprodukovat, ale to se lehčeji řekne, než udělá. Když je výrobek na konci svého životního cyklu, anebo se jedná o vedlejší produkt výroby, je na řadě rozhodnutí, jak s ním naložit. V dnešní době se s odpadem nakládá různorodě, ale nejčastějšími možnostmi je skládkování, pálení ve spalovnách nebo námi zmiňovaná recyklace. I přes fakt, že je dnes většina produktů recyklovatelná, tak se tomu spíše neděje, a to zejména z důvodů neekonomičnosti. Druhotné suroviny získané recyklací bývají dnes dražší než primární. Pro co nejefektivnější recyklaci materiálů, je zapotřebí jejich třízení a separace. [15] [16]



Obrázek 12 -Nakládání s plastovým odpadem ve světě a v EU [16]

7.1. Recyklace plastů

I pro recyklaci plastů platí již dříve zmíněná praxe separace. Pro co nejlepší výsledky při recyklaci je zapotřebí co nejefektivnější roztřídění do jednotlivých skupiny. Nejlepšími adepty na recyklaci jsou výrobky z jednoho druhu materiálu, a naopak problém dělají ty, které se skládají z více různých. Příkladem obtížné recyklace mohou být například různé obalové materiály skládající se z několika vrstev různých prvků nebo za přispění rozmanitých aditiv.

Základním rozdělením recyklace plastů je funkční podstata postupu.

7.1.1. Mechanická recyklace

Dnes je nejpoužívanějším způsobem mechanická recyklace, která spočívá na principu mletí či drcení odpadu a následném čištění, separaci, sušení a regranulizaci. Nevýhodou může být určitý počet provedených cyklů takto zrecyklovaného materiálu nebo diskvalifikace z opětovného použití u výrobků přicházející do kontaktu s potravinami, s výjimkou PET. Mechanická recyklace zachovává molekulární strukturu.

Pro co nejlepší výsledné vlastnosti zrecyklovaných plastů se v průběhu recyklačního cyklu do recyklované směsi přidávají různá aditiva nebo úplně nový materiál. Obě složky mají funkci zefektivnění procesu recyklace a prodloužení životního cyklu materiálu. Pro příklad u recyklace Polyethylentereftalátu (PET) je váhový poměr nového/recyklovaného materiálu běžně 30/70. [16]

V případě, že by se nijak nekompenzovala degradace recyklátu, docházelo by k mnohem rychlejšímu završení životního cyklu materiálu, ale i k rychlejší degradaci zařízení používající se k recyklaci. Materiál by se musel tavit na mnohem vyšší teploty a byl by méně poddajný. [16]

Tímto popsaným jevem se zabývá praktická část této bakalářské práce.

7.1.2. Chemická recyklace

Druhou kategorií tvoří chemická recyklace. Podstata tohoto procesu nakládání s odpadem využívá chemických látek nebo tepla, pro rozložení plastu na původní látky, z nichž byl vytvořen. K chemické recyklaci se dnes přistupuje jen v případě, že odpad nejde recyklovat mechanicky, protože se jedná o výrazně pracnější a ekonomicky nákladnější proces. [16]

Tímto druhem recyklace se tato bakalářská práce v praktické části nezabývá.

8. Současný stav recyklace v FDM 3D tisku

Aditivní technologie (AT) nabízí možnost ekologického chování již při samotném návrhu nebo výrobě. AT toho dosahuje skrze snížené energetické nároky při výrobě, optimalizaci topologických vlastností a tím i snížení váhy samotného výrobku. I přes tento fakt dochází ke generování stále většího množství odpadu [17]

Aditivní výroba (AV) se v dnešních podmínkách rychle stává prostředkem k výrobě konzumních produktů a s vývojem v čase je takřka jisté, že se tento jev bude dále prohlubovat. Dnes již neplatí, že AV slouží pouze v prototypové fázi výroby. Takovéto chování má za následek velikou produkci odpadního materiálu a pokud se nebudeme zabývat jeho recyklací, tak budeme pouze rozšiřovat množství generovaného odpadu z jiných odvětví. Dnešní nejrozšířenější technologií 3D tisku je bezesporu FDM, která svou uživatelskou přívětivostí a cenovou dostupností dominuje na poli domácího 3D tisku. FDM fungující na principu extruze termoplastu, navíc dává veliký potenciál právě v odvětví recyklace. Bohužel se dnes tak spíše neděje, a to z několika důvodů. Tím nejdůležitějším je stále nižší pořizovací cena panenského materiálu. [17] [18]

Náklady spojené s recyklací vznikají především v souvislosti s pořizovacími náklady na recyklační zařízení. Tento fakt je jednou z největších překážek v rozšíření recyklace v podobném měřítku jako samotný 3D tisk. Občasným hobby tiskařům se jednoduše nevyplatí investice do recyklačních zařízení, které dnešní trh nabízí. Nefunkční výtisky, podpěry nebo jiné prvky vznikající souběžně s AV tak končí jako odpad.

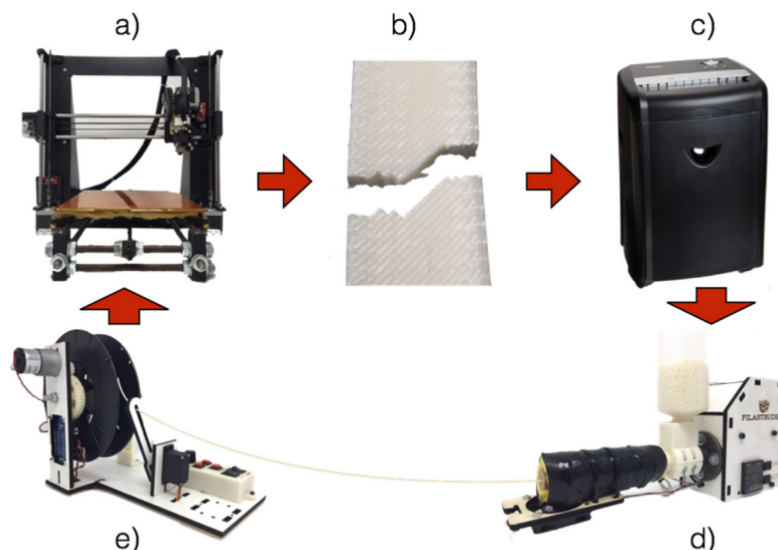
Náklady spojené s recyklací odpadu vzniklého v procesu 3D tisku nejsou však jediné, co limitují rozšíření udržitelného nakládání s odpadem v AT. Dalším podstatným problémem je postupná degradace materiálu při násobné recyklaci. To jak a zdali vůbec k postupnému zhoršování mechanických, ale i tiskařských vlastností dochází, je druhou hlavní překážkou v recyklaci odpadního materiálu vzniklého při FDM tisku.

8.1. Vliv recyklace na mechanické vlastnosti a strukturu materiálů [18]

Vliv recyklace v odvětví 3D tisku není k dnešnímu dni dostatečně popsán a bude zapotřebí další zkoumání této problematiky. Jeden z výzkumů zabývajících se touto problematikou proběhl v týmu na kalifornské San Jose State University.

Výzkum se zabýval násobnou recyklací ABS a jejími následnými dopady na mechanické vlastnosti a strukturu výsledného materiálu. Test zahrnoval tahové zkoušky, zkoumání chemického složení materiálu a změny v teplotním chování plastového recyklátu.

Postup pokusu byl následovný (viz obr. 13). Z panenského materiálu byl na 3D tiskárně (obr. 13, bod a) vytištěn vzorek (obr. 13, bod b) vhodný pro tahovou zkoušku a zkouška se na něm provedla. Tahová zkouška byla prováděna do přetržení. Takto podrobené vzorky byly následně rozdrčeny v komerční skartovačce (obr. 13, bod c). Materiál byl následně vysušen a zrecyklován na recyklačním zařízení Filastruder Kit (obr. 13, bod d, e). Takto zrecyklovaný filament byl následně použit na tisk dalšího kola vzorků. Tento postup se opakoval a test dospěl až ke vzorkům ze třikrát zrecyklovaného materiálu.

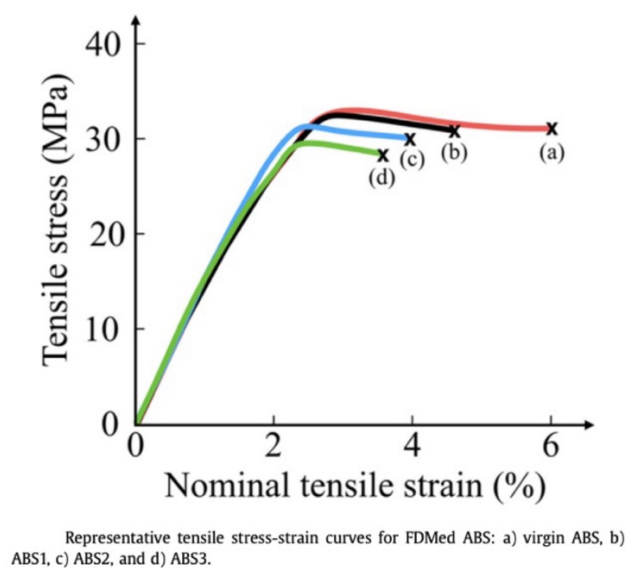


Obrázek 13 - Postup výroby a recyklace vzorků [18]

Pro zaznamenání vlivu samotné technologie FDM na výsledky tahových zkoušek byly provedeny tahové zkoušky i na samotný filament v průběhu recyklace.

Test dospěl například k těmto závěrům:

1. Recyklace měla za následek snížení mechanických vlastností FDM tisknutého ABS. Výsledky zhoršujících se tahových zkoušek tisknutého ABS si lze prohlédnout na obrázku 14.
2. Výsledky tahových zkoušek samotných recyklovaných filamentů se od sebe takřka nelišili, což vede k předpokladu, že na snižující se mechanické vlastnosti má vliv spíše technologie FDM než samotná recyklace.
3. Jako viník zhoršujících se mechanických vlastností tisknutého ABS byla stanovena zvyšující se porozita.
4. Jako řešení snižujících se mechanických vlastností by mohlo být odladění tiskových parametrů pro každé stádium recyklovaného materiálu.
5. Ve vzorcích se při násobné recyklaci objevoval zvyšující se obsah železa, který se do vzorků nejspíše dostal v procesu recyklace. I tento fakt by mohl vézt ke změnám mechanických vlastností.



Obrázek 14 - Tahové křivky panenského a recyklovaného materiálu [18]

8.2. Dnešní možnosti nakládání s odpadem z FDM tisku

S postupujícím vývojem v oblasti aditivní výroby (AV) se vyvíjí i možnosti nakládání s odpadním materiálem. Tento jev bohužel není úměrný, a proto dochází k převisu vygenerovaného odpadu nad možnostmi jeho zpracování. Nakládání s odpadem nemusí být pouze recyklací na nový filament, ale může se jednat i o jiný způsob zpracování, kterému se přeměnou dá nový jiný účel využití. Například světoznámá česká značka Prusa se k problematice odpadu postavila způsobem, kdy se z nepovedených výtisků snaží vyrábět originální nábytek skrze velkoformátové plastové tabule, které mohou být následně použity jako desky stolů, nebo jiné plošné prvky, při výrobě nábytku (viz obrázek 15) [19]



Obrázek 15 - Deska stolu z recyklátu [19]

8.3. Zařízení pro recyklaci filamentu

Dnešní nabídka na trhu recyklačních zařízení není nijak přívětivá k recyklaci na domácí úrovni. Konkurence není nijak veliká, a tudíž není ani tlak na zlevňování produktů.

Tato kapitola představuje vybrané zástupce na poli recyklačních zařízení filamentu v FDM tisku. Zvolení zástupci nejsou jediní, kteří se touto problematikou zabývají, avšak jedná se o dva nejviditelnější představitele pohybující se v tomto odvětví.

8.3.1. 3DEVO

Zařízení, které nabízí nizozemská značka 3devo (viz obrázek 16), nabízí v porovnání s konkurencí nesrovnatelnou uživatelskou přívětivost, rychlost možné extruze recyklovaného materiálu, ale i subjektivně nejprofesionálnější provedení. 3devo nabízí dvě řady svých produktů, kdy nižší řada s cenovkou přesahující 5800 euro je schopna dosahovat teplot až 350°C a vyšší řada s cenou přes 6500 euro s možností extruze až při teplotách dosahující 450°C. Jak je bohužel zjevné především z cenovky produktů, tak se nejedná o zařízení vhodné pro domácí hobby tiskaře, ale spíše pro firmy, které takto nastavenou cenu dokáží obhájit v konkurenčním prostředí trhu. Za takovéto náklady, však zákazník dostane vysoce profesionální produkt, který mu dovolí nejen recyklovat materiál, ale i experimentovat s přísadami do filamentu. [20]

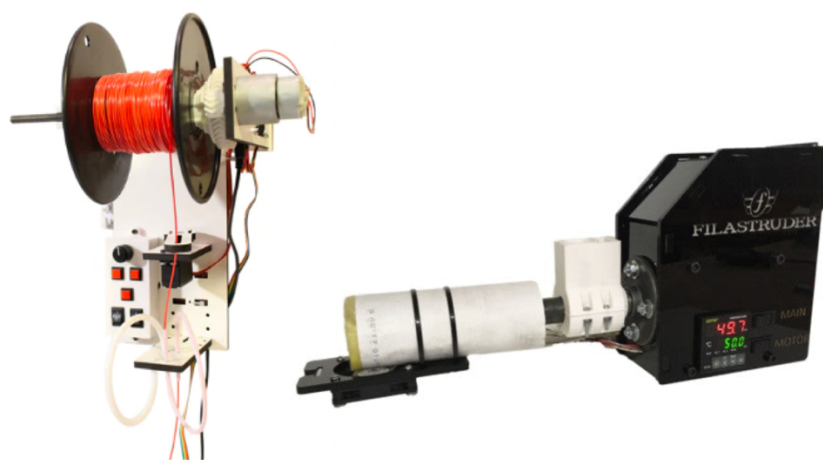


Obrázek 16 - 3devo [20]

8.3.2. Filastruder

Produkt od firmy Filastruder se již blíží k představám o produktu určeném pro domácí použití. Zařízení, které Filastruder nabízí, již neposkytuje takové uživatelsky přívětivé uživatelské prostředí. I podle provedení (viz obrázek 17) je na první pohled zjevné, že se jedná o produkt nižší cenové kategorie. S cenovkou blížící se 500 eur se však jedná o řešení, které může určitě oslovit větší pole zákazníků a proniknout do sféry domácí recyklace v FDM tisku. Velikou nevýhodou tohoto řešení je však fakt časté nedostupnosti ze strany výrobce. Je zde tedy očividný převis poptávky nad nabídkou, kterou výrobce nedokáže pokrýt. Přirozená dostupnost pouze na americkém trhu také nijak nenapomáhá k rozšíření tohoto řešení do domácností po celém světě. Výrobce sice expeduje zásilky i do zbytku světa, ale zákaznická podpora je tím velmi ovlivněna.

Řešení firmy Filastruder je schopno maximální extruze materiálu při teplotě 260 °C, což je sice skoro o třetinu menší výkon než řešení firmy 3devo, avšak pro domácí recyklaci je tato teplota více než dostačující. [21]



Obrázek 17 – Filastruder [21]

PRAKTICKÁ ČÁST

9. Konstrukce zařízení

Praktická část této bakalářské práce se zaměřuje na možné konstrukční řešení zkoumané problematiky s cílem zkonstruovat funkční prototyp určený k výrobě filamentu. Z praktických důvodů je kapitola o konstrukci zařízení rozdělena do tří kapitol, které popisují tři hlavní prvky zařízení.

9.1. Řídící jednotka

Tato kapitola popisuje konstrukční řešení řídicí jednotky celého zařízení a vnitřní zapojení jednotlivých komponentů. Řídící jednotku si lze prohlédnout na obrázku 18.

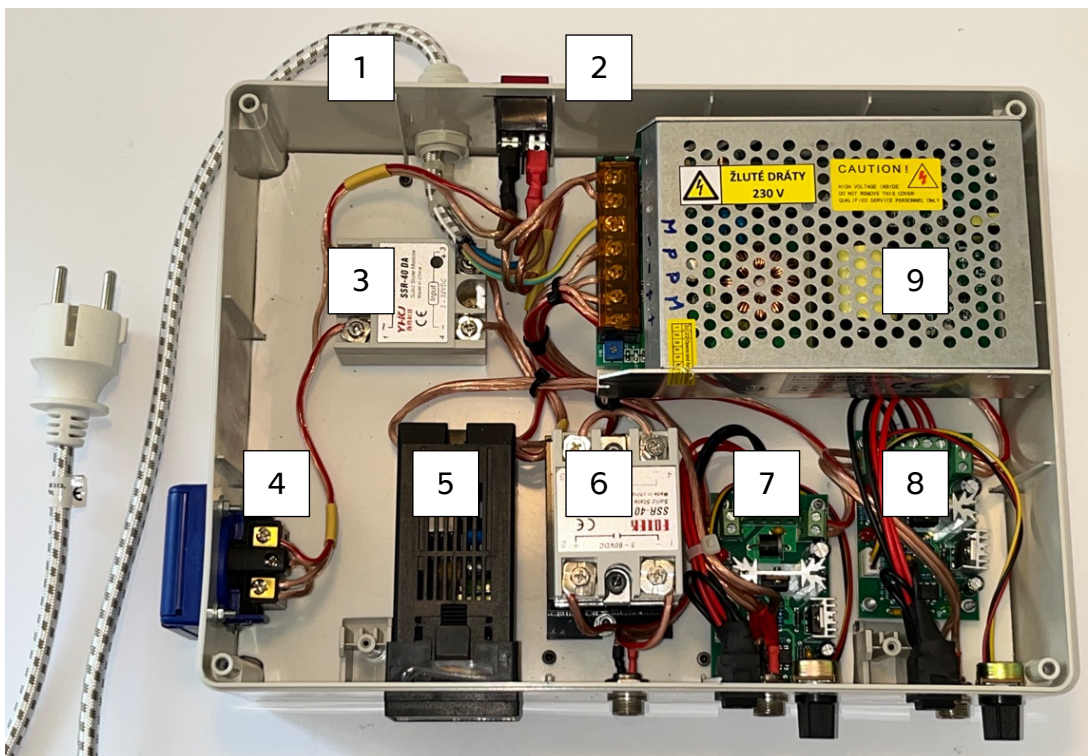


Obrázek 18 - Řídící jednotka

Seznam komponentů

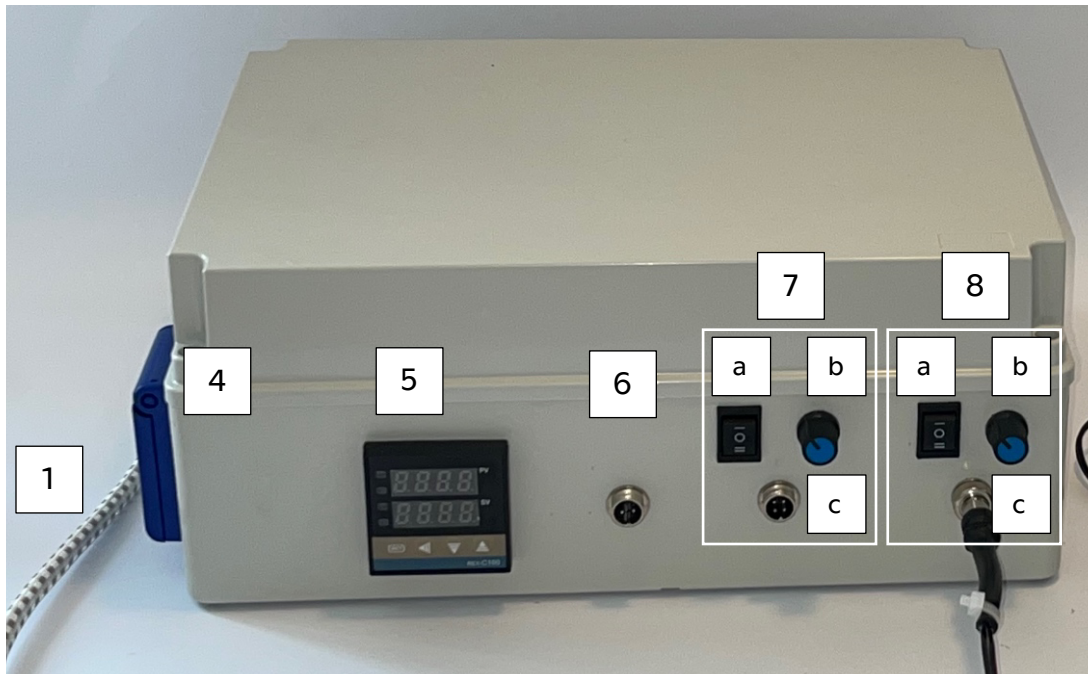
| | |
|----|--------------------------------------|
| 1 | Napájecí kabel |
| 2 | Přepínač |
| 3 | SSR relé AC |
| 4 | Zásuvka pro extrudér |
| 5 | PID regulátor teploty |
| 6 | SSR relé DC |
| 7 | PWM regulátor – motor extrudéru |
| 8 | PWM regulátor – motor navíjení cívky |
| 9 | Zdroj 12V |
| 10 | Propojovací materiál |

Tabulka 1 - seznam komponentů v řídicí jednotce



Obrázek 19 - Zapojení řídicí jednotky

Popis ovládání a fungování řídicí jednotky



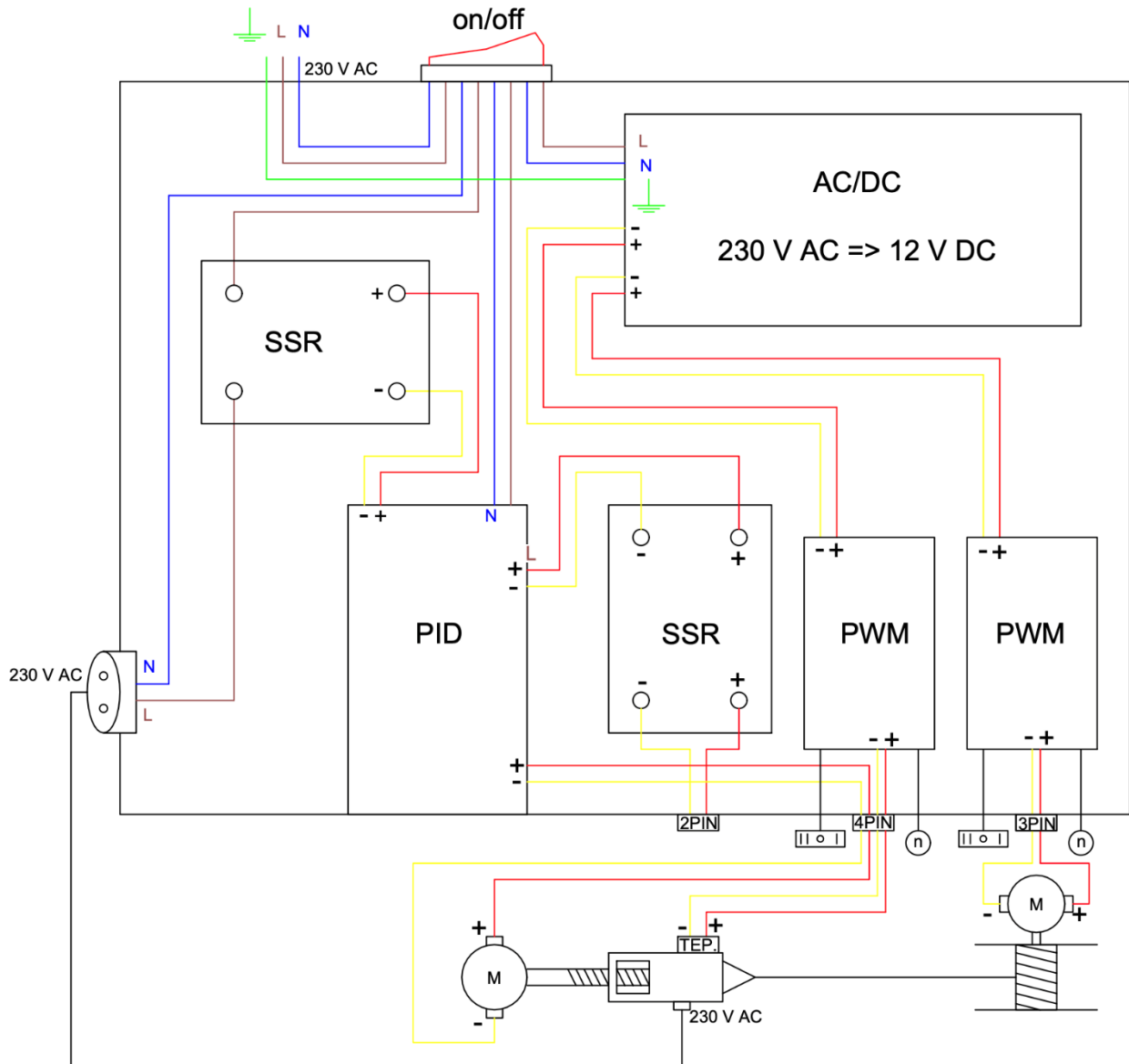
Obrázek 20 - Ovládací prvky řídicí jednotky

Pozn. posloupnost číslování na obrázku 20 zachována z obrázku 19.

Po zapojení napájecího kabelu (obr. 20, bod 1) do zdroje se řídicí jednotka uvede v provoz přepnutím kolébkového přepínače do horní polohy. Následně se zapojí zbývající prvky zařízení do připravených konektorů, případně zásuvky. Extrudér se pomocí čtyřpinového konektoru (obr. 20, bod 7c) zapojí do řídicí jednotky a následně se zapojí i napájecí kabel extrudéru do připravené zásuvky (obr. 20, bod 4). Postup se opakuje i s třípinovým konektorem navíjecí cívky (obr. 20, bod 8c). Na displeji PID regulátoru (obr. 20, bod 5) se na spodním řádku nastaví požadovaná teplota extruze a vyčká se až se nastavená hodnota bude rovnat reálné na horním řádku. PID (obr. 19, bod 1) regulátor pomocí termočlánku instalovaném do kontaktu s topným článkem extrudéru udržuje konstantní teplotu. Pro přesnější čtení teploty je mezi termočlánkem a topným tělesem nanesena teplovodivá pasta. PID regulátor každých 0,5 sekundy vyhodnocuje teplotu a podle potřeby pomocí SSR relé odpojuje zásuvku extrudéru od zdroje napětí. Ve chvíli, kdy se hodnoty nastavené a reálné teploty shodují, může začít proces extruze. Motor šnekového podavače v extrudéru se uvede v pohyb pomocí třípolohového přepínače (obr. 20, bod 7a), stejně tak motor k navíjení cívky (obr. 20, bod 8a). Otáčky obou motorů je možné korigovat za pomoci potenciometrů (obr. 20, body 7b a 8b).

Dále se obrázku 20 (bod 6) nachází dvoupinový konektor, který ale v tomto stádiu vývoje není používán. Jedná se o přípravu k ovládní teploty hotendu, skrz který bude možná nutné táhnout recyklovanou plastovou strunu pro zlepšení rozměrových vlastností recyklovaného materiálu. Tento čtvrtý komponent, však není v tuto chvíli zkonstruován a s možnou pravděpodobností nebude ani potřeba. Dvoupinový konektor je v tuto chvíli pouze pojistkou do budoucího vývoje.

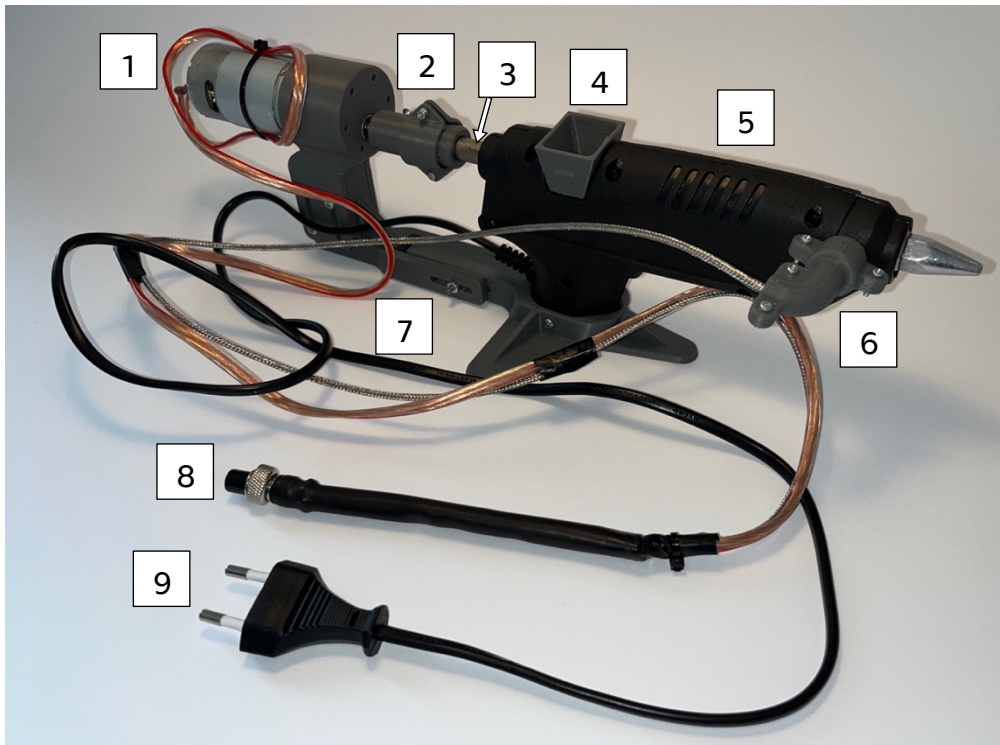
Blokové schéma řídicí jednotky



Obrázek 21 - Blokové schéma zapojení řídicí jednotky

9.2. Extrudér

Tato kapitola rozebírá konstrukční řešení druhého prvku recyklačního zařízení, a to extrudéru.



Obrázek 22 - Extrudér

Pro extruzi materiálu je využita upravená tavná pistole (obr. 22, bod 5) z obchodního řetězce Bauhaus. Jedná se o velmi výrazné snížení nákladů v konstrukci. Tavná pistole je značně upravena a z původního zařízení zbylo jen tělo a topné těleso. Tavná pistole je konstruována na tavení tyčinek o průměru 11 mm. Jako šnekový podavač byl použit modifikovaný vrták do zdiva s upilovanou špičkou (obr. 22, bod 3), tak aby měl vrták konstantní velký i malý průměr. Byl využit vrták s jmenovitým průměrem 12 mm. Vrták s upilovanou špičkou má nyní průměr 10,5 mm a je v topném tělese takřka bez vůle.

U vrtáku jsou důležité tři parametry:

1. Výška stoupání, a to kvůli materiálu, který se musí do mezery vměstnat.
2. Rozdíl mezi velkým a malým průměrem. Tento rozdíl je poměrně důležité udržet na malé hodnotě z důvodu konstrukce tavné pistole. Topné těleso je v našem případě pouze ve stěnách komory, a kdyby byl rozdíl mezi velkým a malým průměrem veliký, docházelo by k nerovnoměrnému tavení plastového granulátu.
3. Třetí parametr, který je potřeba sledovat, je co nejmenší rozdíl průměrů komory tavné pistole a samotného vrtáku. Tento rozdíl je důležité udržet na malé hodnotě z důvodu efektivní dopravy taveného materiálu v požadovaném směru skrze tavnou pistoli. V případě velké tolerance by mohlo docházet k nedokonalému posuvu materiálu skrze komoru.

Dalším prvkem v zařízení je 12V elektromotor s převodovkou (obr. 22, bod 1). Elektromotor byl volen s ohledem na možné velké momenty, které při extruzi budou nastávat.

Důležitou funkcí extrudéru je i možnost nastavení teploty topného tělesa (obr. 22, bod 10). K této funkci je zapotřebí teploměr (obr. 22, bod 6), který je do těla tavné pistole připevněn takřka u ústí. Mezi teploměrem a topným tělesem je aplikována termovodivá pasta pro kvalitnější čtení aktuální teploty.


V konstrukci extrudéru byl využit i 3D tisk samotný. Pomocí 3D tiskárny byl zhotoven stojan (obr. 22, bod 7), který se stává ze tří jednotlivých kusů, a jejich vzájemné polohování uvádí elektromotor a tělo tavné pistole do požadované pozice.


Pomocí 3D tisku byl zhotoven i nástavec teploměru (obr. 22, bod 6), díky kterému jej lze prakticky uchytit na požadované místo na tavné pistoli. Dalším tištěným dílem je v mechanismu násypka materiálu (obr. 22, bod 4).

Poslední tištěnou součástí je spojka mezi elektromotorem a šnekovým podavačem (obr. 22, bod 2). Spojka je sestavou tří dílů, které využívají tvarových vlastností vrtáku a hřídelky motoru pro přenos kroutícího momentu. Spojka svou konstrukcí dovoluje i velmi malé vyosení a tím ulehčuje nastavení polohy mezi samotným motorem a tavnou pistolí.

Celý mechanismus extrudéru je propojený s řídicí jednotkou pomocí čtyřpinového konektoru (obr. 22, bod 8), který slouží pro ovládání elektromotoru a komunikaci s teploměrem. Extrudér je s řídicí jednotkou dále propojen pomocí napájecího kabelu tavné pistole (obr. 22, bod 9).

Seznam komponentů

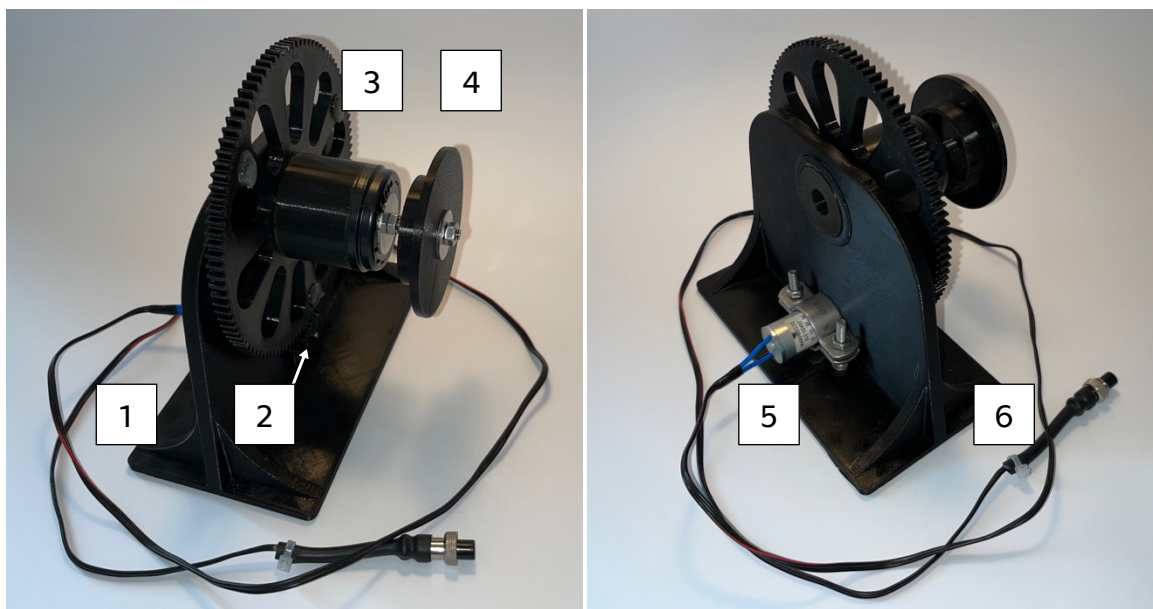
| | | |
|---|-------------------|--|
| 1 | Elektromotor 12 V |  |
| 2 | Spojka |  |
| 3 | Šnekový podavač |  |
| 4 | Násypka |  |
| 5 | Tavná pistole |  |

| | | |
|----|-------------------------------|--|
| 6 | Teploměr |  |
| 7 | Stojan |  |
| 8 | Čtyřpinový konektor |  |
| 9 | Napájecí kabel topného tělesa |  |
| 10 | Topné těleso |  |

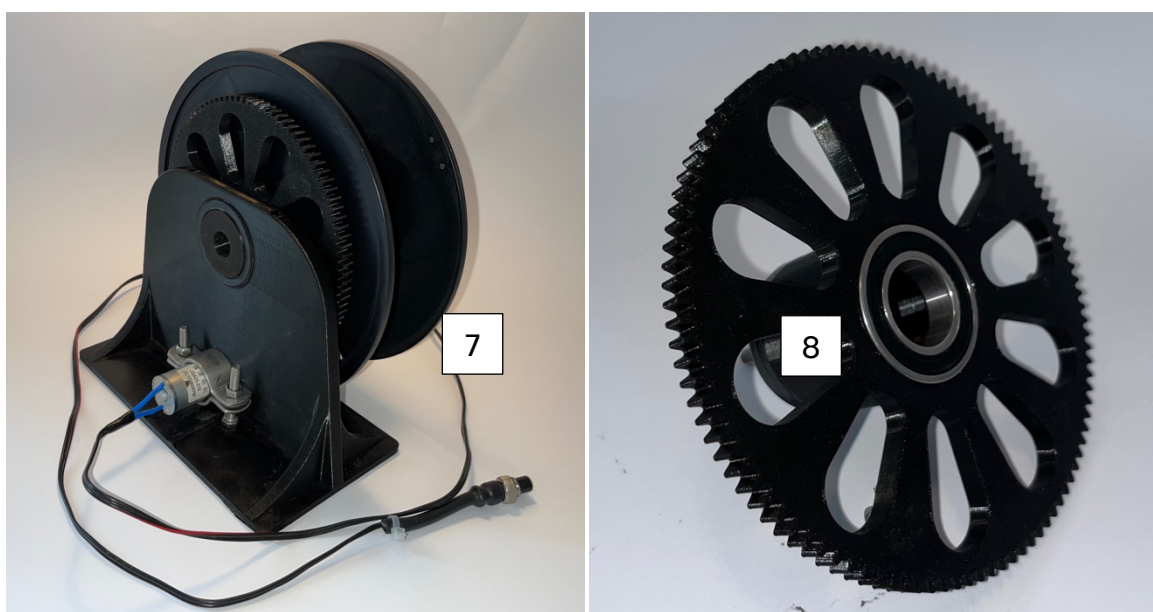
Tabulka 2 - seznam komponentů extrudér [22] [23]

9.3. Naviják filamentu

Třetím a posledním komponentem recyklačního zařízení je mechanismus pro navíjení recyklovaného filamentu.



Obrázek 23 - Naviják filamentu



Obrázek 24 - Naviják filamentu se špulkou a velké ozubené kolo

Filament bude navíjen na prázdnou špulku standardizovaných rozměrů (obr. 24, bod 7), která se k tomuto účelu běžně využívá. Špulka je odpadním materiálem z předchozího tisku a za normálních okolností by již nenašla využití.

Pro výrobu valné většiny komponentů potřebných pro konstrukci navijáku bylo využito 3D tisku. Největším tištěným komponentem vůbec v celém recyklačním zařízení je tělo stojanu navijáku. Stojan (obr. 23, bod 1) se skládá ze dvou součástí, z těla stojanu a z osy podpírající velké ozubené kolo. Osa není součástí těla z technologických důvodů tisku (eliminace podpěr komponenty vysoko nad tiskovou podložkou) a z možné záměny za osu jiných rozměrů (v případě potřeby lze zaměnit za osu s menším průměrem pro navíjení špulky s menším rozměrem). Stojan má rozměrové vlastnosti takové, aby ustavil osové vzdálenosti velkého ozubeného kola a pastorku. Tento převod je použit pro zpřevodování elektromotoru, který je uchycen na spodní desce stojanu.

Maximální otáčky elektromotoru (obr. 23, bod 5) dosahují 60 ot/min a elektromotor je pomocí tištěných dílů zpřevodován redukčním převodovým poměrem 1:6. Maximální rychlost navíjené špulky dosahuje 10 ot/min a je možné jí ještě zpomalit za pomoci potenciometru na řídicí jednotce.






Elektromotor je zapojen do řídicí jednotky skrze třípinový konektor (obr. 23, bod 6). Motor využívá pouze dva piny ze tří a toto řešení bylo zvoleno pro eliminaci lidské chyby špatného zapojení, jelikož se na řídicí jednotce již nachází jiný konektor využívající dva piny.

Převod byl realizován za pomoci kol s evolventním ozubením a modulem 1,5. Pastorek (obr. 23, bod 2) se 17 zuby je umístěn na hřídelce motoru a na svém místě je ustaven jen za pomoci rozměrových vlastností. V mechanismu dochází jen k velmi malým momentům a jiné řešení nebylo nutné.

Velké ozubené kolo (obr. 23, bod 3) se 102 zuby má dvojitě využití. Kromě samotného převodu slouží i jako nosný prvek špulky. Špulka (obr. 23, bod 8) se nasune na válec, který je součástí velkého ozubeného kola, a pomocí vloženého šroubu a víčka (obr. 23, bod 4) se ustaví na své místo.

Ve vnitřní části válce ozubeného kola je nalisované kuličkové ložisko 6005-2RS (obr. 24, bod 8)

Seznam komponentů

| | | |
|---|-------------------|--|
| 1 | Stojan |  |
| 2 | Pastorek |  |
| 3 | Ozubené kolo |  |
| 4 | Víčko |  |
| 5 | Elektromotor 12 V |  |

| | | |
|---|--------------------|---|
| 6 | Třípinový konektor |  |
| 7 | Špulka |  |
| 8 | Ložisko |  |

Tabulka 3 - seznam komponentů navijáku [24] [25] [26]

10. Ekonomické náklady

Při návrhu tohoto zařízení byl brán ohled na ekonomické náklady. Jejich udržení na nízké hladině bylo důležité pro alespoň teoretickou možnost rozšíření tohoto konceptu do domácností nebo k hobby tiskařům. Jedná se o první prototyp a je tedy pravděpodobné, že náklady vynaložené na tvorbu tohoto prvního zařízení budou mít v čase tendenci spíše se snižovat, s vývojem a potencionální malosériovou výrobou.

Do ekonomické rozvahy není započítána hodinová sazba vývoje zařízení, ale pouze prvky, které jsou pro konstrukci zařízení přímo potřebné. Stejně tak do rozvahy nejsou zahrnuty náklady na tisk.

V následující tabulce jsou náklady na materiál, ze kterého byl zkonstruován první prototyp. Materiál byl pořizován v českých e-shopech, a i zde je tedy možnost budoucí optimalizace nákladů objednávkou materiálu přímo od výrobce z asijského kontinentu.

| Komponenta | Cena za ks | Množství | Σ |
|--|------------|----------|----------|
| PID regulátor teploty + SSR relé AC + chladič + teplotní čidlo v tavné pistolí | 739 Kč | 1 | 3 585 Kč |
| SSR relé DC | 179 Kč | 1 | |
| Zdroj 12V | 549 Kč | 1 | |
| Konektor 4p - samec | 22 Kč | 1 | |
| Konektor 4p - samice | 22 Kč | 1 | |
| Konektor 3p - samec | 20 Kč | 1 | |
| Konektor 3p - samice | 20 Kč | 1 | |
| Konektor 2p - samec | 18 Kč | 1 | |
| Konektor 2p - samice | 18 Kč | 1 | |
| Motor na navíjení cívky | 238 Kč | 1 | |
| Motor na šneku | 448 Kč | 1 | |
| Vypínač | 28 Kč | 1 | |
| PWM regulátor | 134 Kč | 2 | |
| Průchodka | 7 Kč | 1 | |
| Krabice | 458 Kč | 1 | |
| Zásuvka | 71 Kč | 1 | |
| Tavná pistole | 269 Kč | 1 | |
| Přívodní kabel | 149 Kč | 1 | |
| Ložisko | 62 Kč | 1 | |

Tabulka 4 - Ekonomické náklady

Ze součtu nákladů z tabulky 4 je patrné, že se náklady na sestavení zařízení pro recyklaci filamentu blíží výšce nákladů, které by domácnost s lehce nadprůměrnou produkcí výtisků mohla akceptovat.

Díky této rozvaze můžeme i přibližně odhadnout návratnost projektu. Průzkumem trhu jsme zjistili, že průměrná cena PLA filamentu za 1 kg se pohybuje na hranici 600 korun. S těmito náklady na filament by došlo k teoretické ekonomické návratnosti projektu po recyklaci zhruba šesti kilogramů materiálu. [27]

11. Diskuse

Praktická část této bakalářské práce si kladla za úkol návrh možného řešení, které by se zabývalo recyklací odpadu vzniklého v procesu FDM tisku. Byl zkonstruován první prototyp a bylo provedeno jeho odzkoušení bez zátěže.

V prvním testu bude mechanismus vystaven množství otázek, které v této fázi vývoje nelze ověřit.

Jednou z nich, která bude muset být zodpovězena je kvalita extrudovaného materiálu. Bude zapotřebí otestovat kvalitu produkovaného filamentu a zdali bude možné dosáhnout jeho požadovaných rozměrů. Návrh se vznikem tohoto rizika počítá přípravou dvoupinového konektoru. Ten bude moct ovládat hotend skrze který bude možné táhnout strunu pro zlepšení jejích rozměrových vlastností.

Druhé riziko, kterému je návrh vystaven, je zatím nepředvídatelné chování recyklované struny mezi extrudérem a navijákem. Rychlost chladnutí struny bude kritická pro udržení jejích rozměrových vlastností. Další vývoj by se měl zabývat, zdali nebude nutné strunu například rychle ochladit ve vodní lázni. Tento postup by však vnášel do projektu další nejistoty, které by způsobila možná přidaná vlhkost ve filamentu.

Posledním z hlavních rizik tohoto projektu je samotný postup recyklátu z extrudéru. Šnekový podavač je v tomto provedení atypický a oproti konvenčním způsobům nezajišťuje zhušťování materiálu směrem k trysce. Tento fakt je zapříčiněn důrazem na ekonomickou stránku projektu, avšak není jisté, jestli toto řešení bude mít za následek požadované vlastnosti.

V průběhu pokračování tohoto experimentu mohou nastat i jiná rizika, avšak toto jsou představitelé hlavních kategorií, ve kterých je předpoklad možných komplikací.

12. Závěr

Rychlý vývoj v oblasti aditivní výroby má za následek převis vzniklého odpadu nad možnostmi jeho zpracování a snaha o řešení této problematiky je v dnešní konzumní společnosti důležitější než kdy jindy. S rozvíjející se tendencí 3D tisku po celém světě, bude za potřebí se touto problematikou ještě dopodrobna zabývat.

Teoretická část této bakalářské práce slouží k seznámení se s problematikou aditivních technologií. Jedná se o velmi progresivně se rozvíjející oblast strojírenství, což znamená, že i samotný pojem aditivní technologie se bude v čase vyvíjet. Byly však představeny základní pojmy a principy, na kterých stojí oblast 3D tisku tak jak jí dnes známe. V teoretické části jsou popsány základní technologické principy a při každém z nich byly představeny i jeho nejpoužívanější technologie tisku. Práce představuje i materiály, se kterými se můžeme setkat v aditivní výrobě a konkrétně rozebírá nejpoužívanější nebo něčím zajímavé materiály používané v FDM tisku. Byly představena úskalí v oblasti recyklace a dva základní pojmy v tomto odvětví, a to mechanická recyklace a chemická recyklace. Součástí teoretické části je i rešerše v oblasti dnešní recyklace na poli FDM tisku. Teoretickou část uzavírá přestavení recyklačních zařízení využívajících se pro recyklaci odpadu vzniklého v procesu FDM tisku. Obě zařízení sloužila jako inspirace k řešení problematiky, již se zabývá praktická část práce.

Praktická část se snažila přijít s odpovědí na otázku týkající se návrhu zařízení vhodného pro recyklaci odpadního materiálu z FDM tisku. Výsledkem je konstrukce jednoho prvního prototypu vhodného právě k těmto účelům. Prototyp je ve fázi, kdy je plně funkční, avšak čekající na své první testování. Prototyp se skládá ze tří hlavních částí: z řídicí jednotky, extrudéru a navijáku filamentu. Každá část je podrobně popsána a je sestavena tabulka použitých komponent. Při konstrukci zařízení bylo dbáno na ekonomickou stránku projektu s myšlenkou na snazší rozšíření v tiskařské komunitě a tím pomoci v řešení otázky týkající se nakládání s plastovým odpadem.

13. Reference

- [1] HORNE, Richard a , HAUSMAN. *3D Printing for dummies*. 2. vydání. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017, 6-22 s. ISBN 978-1-119-38631-5.
- [2] IZDEBSKA-PODSIADŁY, Joanna. *Polymers for 3D printing: methods, properties, and characteristics*. 1. Cambridge, MA, Oxford: William Andrew, 2022, 394 s. ISBN 9780128183113.
- [3] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. 2. vydání. London, New York, Heidelberg, Dordrecht: Springer, 2015. ISBN 9781493921126.
- [4] GRIMM, Todd. *User's guide to rapid prototyping*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2004, . ISBN 0872636976. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/zMRXZjMC>
- [5] JONES, Rhys, Patrick HAUFE, Edward SELLS, Pejman IRAVANI, Vik OLLIVER, Chris PALMER a Adrian BOWYER. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011, 29(), 177-191. ISSN 0263-5747. Dostupné z: doi:10.1017/S026357471000069X
- [6] *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. 1984. USA. US4575330A. Uděleno 1986-03-11. Zapsáno 1984-08-08.
- [7] Encyklopedie 3D tisku: základní slovník pojmů i pro úplné začátečníky. In: *Tiskni.xyz* [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://tiskni.xyz/encyklopedie-3d-tisk>
- [8] This cross section shows the components of the hot end. In: *CREALITY EXPERTS* [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://www.crealityexperts.com/creality-hot-end-repair-guide>
- [9] *Additive manufacturing: General principles — Terminology*. 2015-12-15. Geneva: ISO/ASTM, 2015. ISO/ASTM 52900:2015(E).

- [10] BILLIET, Thomas, Mieke VANDENHAUTE, Jorg SCHELFHOUT a Sandra VAN VLIERBERGHE. A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering. *Biomaterials*. 2012, **2012**(33), 6023. Dostupné z: doi:10.1016/j.biomaterials.2012.04.050
- [11] *3D printing: A new dimension* [online]. In: . [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.dhl.com/global-en/delivered/digitalization/3d-printing-a-new-dimension.html>
- [12] REIFF, Colin, Stefan EPPLE, Frederik WULLE, Oliver RIEDEL a Volkher ONUSEIT. *ON INLINE PROCESS CONTROL FOR SELECTIVE LASER SINTERING* [online]. Stuttgart, Germany, 2018 [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/329625918_On_Inline_Process_Control_for_Selective_Laser_Sintering. University of Stuttgart.
- [13] BOULAALA, Mohammed, Driss ELMESSAOUDI, Irene BUJ-CORRAL, Jihad EL MESBAHI, Omar EZBAKHE, Abdelali ASTITO, Mhamed EL MRABET a Abdelilah EL MESBAHI. Towards design of mechanical part and electronic control of multi-material/multicolor fused deposition modeling 3D printing. *International journal of advanced manufacturing technology*. London: Springer London, 2020, **110**(0), 45-55. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-05847-0
- [14] *Additive Manufacturing of Bio and Synthetic Polymers*. Basel: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022, . ISBN 9783036533209. Dostupné z: doi:10.3390/books978-3-0365-3319-3
- [15] Plastový odpad a jeho recyklace v EU (infografika). *Generální ředitelství pro komunikaci* [online]. 2021, 2 [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: doi:20181212STO21610
- [16] SCHYNS, Zoé a Michael SHAVER. *Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review*. 2020, 1-22, 27 s. ISSN 1022-1336. Dostupné také z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/marc.202000415>
- [17] KUCLOURYA, Tanay, Roberto MONROY, Enrique CUAN-URQUIZO, Armando ROMAN-FLORES a Rafiq AHMAD. Scientometric analysis and critical review of fused deposition modeling in the plastic recycling context. *Cleaner Waste*

- Systems*. Elsevier Ltd, 2022, 20, 100008. ISSN 2772-9125. Dostupné z: doi:10.1016/j.clwas.2022.100008
- [18] CRESS, Alex K., Jimmy HUYNH, Eric H. ANDERSON, Ryan O'NEILL, Yanika SCHNEIDER a Özgür KELEŞ. Effect of recycling on the mechanical behavior and structure of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS). *Journal of cleaner production*. Elsevier Ltd, 2021, 2790, 123689. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.123689
- [19] Experimentujeme s recyklací plastového odpadu. In: *Prusalab* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://prusalab.cz/blog/experimentujeme-s-recyklaci-plastoveho-odpadu/>
- [20] Filament Makers. In: *3devo* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.3devo.com/filament-makers>
- [21] FILASTRUDER KIT. In: *Filastruder* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit?variant=323882043>
- [22] Konektor 16mm GX16 - 4 piny, kabel. In: *Laskakit* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/konektor-16mm-gx16-4-piny--f-m-/>
- [23] Motorek 25GA-310 12V s převodovkou, 16RPM. In: *Hadex* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/l747-motorek-25ga-310-12v-s-prevodovkou-16rpm/>
- [24] Motor JGB37-550 12V s převodovkou. In: *Laskakit* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/motor-jgb37-550-12v-s-prevodovkou/>
- [25] Ball bearing 6210 2RS [KLT]. In: *Agrobearings* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://agrobearings.com/ball-bearing-6210-2rs-klt/>
- [26] Konektor 12mm GX12 - 3p, kabel. In: *Laskakit* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/konektor-12mm-gx12-3p--kabel/>
- [27] Tiskové struny PLA filamenty. In: *Heureka* [online]. [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://tiskove-struny.heureka.cz/f:31693:42852032/>
- [28] *Worldwide most used 3D printing materials, as of July 2018* [online]. 2018 [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/800454/worldwide-most-used-3d-printing-materials/>

[29] Pla Filament 1,75 mm 1kg cívka pro 3D tiskárnu. In: *Fruugo* [online]. [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://www.fruugo.cz/pla-filament-175-mm-1kg-civka-pro-3d-tiskarnu-modre-vlakno-spotrebni-material-pro-3d-tisk/p-48781862-96943064>

14. Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 - seznam komponentů v řídicí jednotce | 37 |
| Tabulka 2 - seznam komponentů extrudér [22] [23] | 44 |
| Tabulka 3 - seznam komponentů navijáku [24] [25] [26] | 48 |
| Tabulka 4 - Ekonomické náklady | 49 |

15. Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 - Příklad využití 3D tisku [11]..... | 11 |
| Obrázek 2 - Vývoj AT v 80. létech [2] | 14 |
| Obrázek 3 - Patent US4575330 podán Chukem Hallem, SLA [6] | 15 |
| Obrázek 4 - schéma Hotendu [8]..... | 16 |
| Obrázek 5 - Schéma vytvrzování fotopolymeru pomocí laseru [10] | 18 |
| Obrázek 6 - Schéma technologie Selectiv Laser Sintering [12]..... | 19 |
| Obrázek 7 - Schéma technologie přímého nanášení prášku [3]..... | 20 |
| Obrázek 8 - Laserem řezané fólie s teplotně aktivovaným lepidlem [1]..... | 21 |
| Obrázek 9 - Schéma extruze filamentu [13] | 22 |
| Obrázek 10 - Nejpoužívanější materiály ve 3D tisku k červenci 2018 [28] | 23 |
| Obrázek 11 - Filament na cívce [29]..... | 24 |
| Obrázek 12 -Nakládání s plastovým odpadem ve světě a v EU [16]..... | 28 |
| Obrázek 13 - Postup výroby a recyklace vzorků [18]..... | 31 |
| Obrázek 14 - Tahové křivky panenského a recyklovaného materiálu [18] | 32 |
| Obrázek 15 - Deska stolu z recyklátu [19]..... | 33 |
| Obrázek 16 - 3devo [20]..... | 34 |
| Obrázek 17 – Filastruder [21] | 35 |
| Obrázek 18 - Řídící jednotka | 37 |
| Obrázek 19 - Zapojení řídicí jednotky | 38 |
| Obrázek 20 - Ovládací prvky řídicí jednotky..... | 38 |
| Obrázek 21 - Blokové schéma zapojení řídicí jednotky | 40 |
| Obrázek 22 - Extrudér | 41 |
| Obrázek 23 - Naviják filamentu..... | 45 |
| Obrázek 24 -Naviják filamentu se špulkou a velké ozubené kolo | 45 |