



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra techniky a kybernetiky

Diplomová práce

Extrudace kompozitního filamentu pro 3D tisk

Autor práce: Bc. Matěj Kouba
Vedoucí práce: Ing. Mgr. Zbyněk Havelka, Ph.D.
Konzultant práce: Mgr. Pavel Černý, Ph.D.

České Budějovice
2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....
Podpis

Abstrakt

Diplomová práce shrnuje dosavadní poznatky o 3D tisku, konkrétně o technologii zvané Fused Deposition Modeling a materiálech, které jsou při ní využívány. Cílem praktické části diplomové práce je vytvořit konstrukční návrh a následně sestavit extrudér pro experimentální účely při výrobě kompozitního materiálu z kyseliny polylactické a přírodních vláken. V rámci práce byl nejprve pomocí modelovacího programu vytvořen návrh extrudéru pro výrobu kompozitních materiálů. Při návrhu byl kladen důraz na maximální snížení pořizovacích nákladů a možnost modularity. Jednotlivé části stroje byly vyrobeny opracováním zbytkového materiálu prostřednictvím strojní techniky. Další komponenty byly vytvořeny za pomoci aditivní technologie 3D tisku FDM. Vyroběný stroj byl otestován při různých teplotách topné části na materiálu PLA.

Klíčová slova: 3D tisk, FDM, extrudér, kompozitní filament

Abstract

The thesis summarizes the existing knowledge about 3D printing, specifically about the technology called Fused Deposition Modeling and the materials used in it. The aim of the practical part of the thesis is to create a structural design and subsequently build an extruder for experimental purposes in the production of a composite material made of polylactic acid and natural fibres. As part of the thesis was firstly created, the design of the extruder for the production of composite materials, using modeling program. During the design, emphasis was given to minimize the acquisition cost and modularity. Some parts of the apparatus were fabricated by machining the residual material using machine technology. Other components were created using additive FDM 3D printing technology. The fabricated machine was tested at different temperatures of the heating part on PLA material.

Keywords: 3D print, FDM, extruder, composite material

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Mgr. Zbyňkovi Havelkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce. Velké díky patří zejména Mgr. Pavlovi Černému, Ph.D. za cenné rady a připomínky, metodické vedení, profesionální a vstřícný přístup v průběhu řešení práce.

Obsah

Úvod	8
1 Teoretická část	9
1.1 3D tisk	9
1.1.1 Vývoj 3D tisku	10
1.1.2 Aplikace 3D tisku	12
1.1.3 Technologie 3D tisku	13
1.2 Fused Deposition Modeling (FDM)	16
1.2.1 Princip technologie FDM	17
1.3 Materiály pro FDM tisk	18
1.3.1 Polyethylentereftalát glykol (PETG)	18
1.3.2 Akrylonitril-butadienstyren (ABS)	19
1.3.3 Akrylonitril-styren-akrylát (ASA)	20
1.3.4 Termoplastické elastomery (TPE)	20
1.3.5 Polypropylen (PP)	21
1.3.6 Kyselina polymléčná (PLA)	21
1.3.7 Kompozitní materiály využívané v technologii FDM	25
1.4 Extrudace filamentu	26
1.4.1 Princip extrudace	27
2 Metodika	31
2.1 Návrh extrudéru	31
2.2 3D modelace	31
2.3 FDM tisk	32
2.4 Strojírenské úpravy	33
2.5 Elektrotechnické měření	34
2.6 Termografie	34

3	Praktická část	35
3.1	Pohon extrudéru	35
3.2	Stejnoseměrný napájecí zdroj	36
3.3	Komora extruderu	37
3.4	Šnek extrudéru	38
3.5	Spojka	38
3.6	Tryska extrudéru	39
3.7	Základna pro uložení stroje	40
3.7.1	Uložení extruzní komory	40
3.7.2	Uložení pohonu	41
3.8	Násypka	41
3.9	Topná část	42
3.9.1	Topná objímka	42
3.9.2	Redukce topné objímky	43
3.9.3	PID regulátor	44
3.9.4	Odporový snímač teploty	44
3.9.5	Tepelná izolace	45
3.10	Elektrotechnické zapojení	45
3.11	Sestava jednotlivých komponent	47
3.12	Cenová sumarizace	49
4	Testování extrudačního zařízení	50
4.1	První test zařízení	50
4.1.1	Konstrukční úpravy	52
4.2	Druhý test zařízení	53
5	Diskuze	56
	Závěr	57

Seznam použité literatury	58
Seznam obrázků	64
Seznam tabulek	66

Úvod

3D tisk je aktuálně jednou z nejprogresivnějších výrobních technologií, která se rozšiřuje to řady průmyslových odvětví. V průběhu let bylo vyvinuto mnoho různých technologií 3D tisku, které využívají širokou škálu materiálů. Od termoplastů, přes sklo až po kovy. Jednou z nejvyužívanějších technologií je FDM (fused deposition modeling), která se stala velmi oblíbenou i mezi amatérskými uživateli tisku. Prostřednictvím této poměrně jednoduché technologie je možné vyrábět i složité díly. Principem je extruze taveniny ze vstupní suroviny, která vstupuje do zařízení v podobě filamentu, zvaného také tisková struna. Díl je následně vytvářen vrstvou po vrstvě, od spodu nahoru. Vyhřívaná vytlačovací hlava vytlačuje termoplastickou látku, která tvoří vrstvy (Jasveer & Jianbin, 2018; Agrawaal & Thompson, 2021; Liu et al., 2022).

Ve formě struny pro 3D tisk je dodávána řada materiálů, jako je například polyethylentereftalát ve směsi s glykolem (PETG), akrylonitril-butadienstyren (ABS), akrylonitril-styren-akrylát (ASA), termoplastické elastomery (TPE) a polypropylen (PP). Jedním z nejpoužívanějších materiálů je kyselina polymléčná (PLA). Používá se také řada kompozitních materiálů, které připomínají dřevo, bronz či měď (Stříteský et al., 2019).

Výroba filamentu probíhá technologií zvaná extruze. Materiál ve formě granulí či pelet prochází zařízením zvaným extrudér. Základem extrudéru (vytlačovacího stroje) je šnek, ten se otáčí v extrudační komoře, která má obvykle podobu ocelového válce. Do válce je přiváděn materiál, který je topnými tělesy na vnější straně válce ohříván na úroveň bodu tání. Přívod materiálu zajišťuje dávkovací mechanismus. Granulát je posouván komorou pomocí šneku směrem k vytlačovací hlavě (Ausperger, 2015).

Cílem diplomové práce je konstrukčně navrhnout a sestrojít extrudér kompozitních materiálů za účelem experimentální výroby kompozitního materiálu na bázi kyseliny polymléčné a přírodních vláken. Přístroj by měl splňovat požadavky na nízkou cenu výroby, nenáročnou výměnu komponent, jednoduchou manipulaci a obsluhu. Funkčnost zařízení bude provedena prostřednictvím testu funkčnosti.

1 Teoretická část

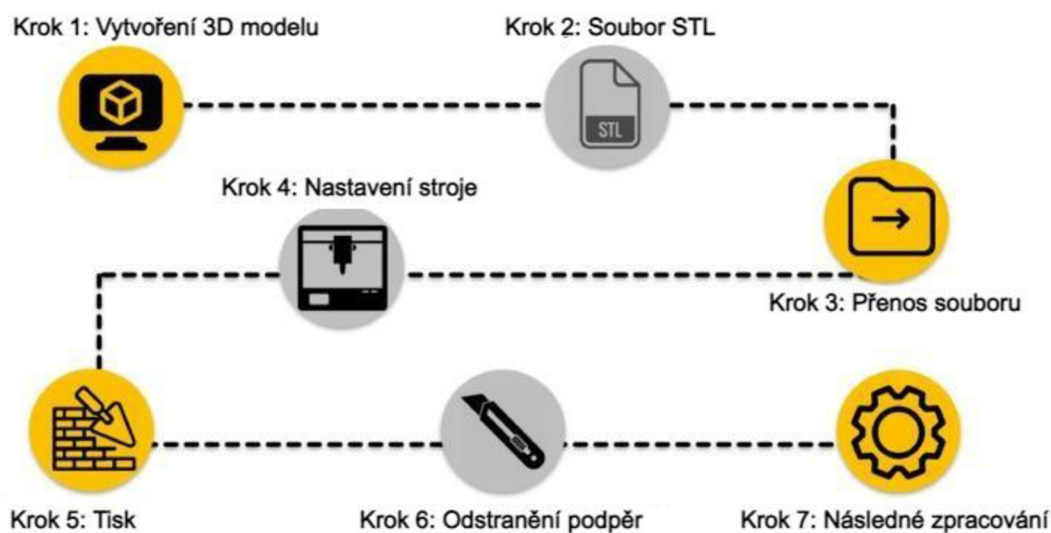
1.1 3D tisk

3D tisk anebo také aditivní technologie je produkční proces, při kterém je trojrozměrný objekt vytvářen na základě 3D digitálního modelu. Komponenty jsou vytvářeny postupně, kladením materiálu vrstvu po vrstvě za použití 3D tiskárny. Tento způsob výroby je zcela odlišný od konvenčních výrobních metod, jako je odlévání, kování či obrábění. (Agrawaal & Thompson, 2021; Liu et al., 2022). Ve srovnání s tradičním obráběním je 3D tisk procesem přímého vytváření objektů skládáním vrstev materiálu na sebe, dokud není získán požadovaný výrobek. Vrstvy se na sebe skládají různými způsoby v závislosti na použité technologii. Tato technologie umožňuje navrhovat složité součásti, čímž se lze vyhnout dodatečným nákladům na montáž. Protože 3D tisk je proces bez použití nástrojů, výrazně snižuje náklady i dodací lhůty (Jasveer & Jianbin, 2018).

Technologie přináší možnost vytvářet geometricky velmi složité komplexní díly s vysokou přesností a minimální potřebou dalšího zpracování. Vzhledem k tomu, že díl vyrobený 3D tiskem již obvykle nevyžaduje další opracování, je materiál využit prakticky bezodpadově, což z technologie dělá také slibný nástroj, jak snížit cenu výroby, současně v souladu s principy ochrany životního prostředí. Zároveň je možné využít celou řadu materiálů, včetně plastů a kovů. 3D tisk přináší konstrukční svobodu a umožňuje vytvářet jedinečné prvky i v malých objemech a ekonomicky výhodným způsobem. Aditivní výrobní technologie a metody se neustále rozšiřují také z hlediska aplikací a podílu na trhu. Již našly využití ve výrobních oborech jako je automobilový průmysl, biomedicína či letectví a očekává se, že tento růst bude pokračovat i v příštích několika letech (Bikas et al., 2016).

Výroba samotného 3D tištěného objektu se skládá z několika kroků. Nejprve se s využitím softwaru pro počítačem podporované navrhování (CAD) navrhne virtuální 3D struktura *in silico*. CAD software poskytuje také představu o očekávané strukturální integritě hotového výrobku. Následujícím krokem je převod souboru z CAD software do formátu STL (Standard Tessellation File). Základní myšlenkou formátu je překrytí vnějšího povrchu konstruovaného trojrozměrného modelu do malých trojúhelníků, zvaných *fasety*, které jsou zodpovědné za popis geometrie povrchu objektu, bez ohledu na barvu, texturu či jiné atributy modelu. STL soubor je

přenesen do 3D tiskárny, kde dojde k samotnému sestavení objektu. Doba, potřebná k sestavení a prostorovému rozlišení se může výrazně lišit v závislosti na náročnosti vytvářeného objektu i použité tiskárně. Po dokončení samotného tisku může následovat, v závislosti na požadavcích na konečný výrobek, fáze postprocessingu, která může zahrnovat kroky jako lakování, broušení, vyhlazování či lepení (Agrawaal & Thompson, 2021). Schéma výroby je naznačeno na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1: Schéma 3D tisku (upraveno podle Agrawaal & Thompson, 2021)

1.1.1 Vývoj 3D tisku

Koncem 70. let 20. století začaly být navrhovány různé metody počítačem asistované aditivní výroby s využitím různých technologií, které byly předmětem prvních patentů v oblasti 3D tisku. Až do 80. let neměly strategie aditivní výroby praktické využití jako alternativa k tradiční subtraktivní průmyslové výrobě. Výjimkou byl elektronický průmysl a výroba mikročipů. Jak již je uvedeno výše, při aditivní výrobě je trojrozměrný objekt vytvářen postupným přidáváním materiálu. Tradiční způsob průmyslové výroby pevných předmětů se nazývá subtraktivní výroba. Spočívá v odebírání materiálu z daného pevného bloku, dokud nezíská předepsaný tvar. Výroba používá nástroje jako jsou soustruhy či frézy. Třetím, tradičním způsobem výroby trojrozměrných objektů je tvarování roztaveného materiálu do požadovaného tvaru a jeho následné ztuhnutí, v tomto případě hovoříme o odlévání. Tento poslední způsob výroby se dříve používal zejména při výrobě prototypů (Savini & Savini, 2015).

V roce 1984 si Charles Hull nechal patentovat *stereolitografii* (STL), proces, při kterém se kapalné polymery vytvrzují pod ultrafialovým světlem. První předmět, který byl tímto způsobem vyroben byla nádoba, vysoká asi 5 cm, jejíž výroba trvala několik měsíců. O dva roky později založil Hull společnost 3D System, která dodnes vyrábí a prodává výrobní zařízení (Davis, 2014). Koncem 80. a v průběhu 90. let byly postupně vytvořeny další technologie aditivní výroby, jako *Selective Laser Sintering* (SLS), která spočívá v tavení částic prášku laserovým paprskem. Samotné technologie pro 3D tisk byly vyvinuty na Massachusettském technologickém institutu na počátku 90. let. Přijatá výrobní technologie byla inspirována technologií inkoustového tisku, kterou poprvé vyvinula společnost Canon Co. v roce 1979. Již koncem 80. let 20. století vyvinul S. S. Crump technologii Fused Deposition Modeling (FDM) založenou na nanášení termoplastického materiálu po vrstvách pomocí tříosého robota. Tuto metodu a zařízení si nechal patentovat v roce 1992 a založil společnost Stratasys Inc. (Crump, 1992). Tavené depoziční modelování se pak stalo výrobním procesem, na němž je založena většina stolních 3D tiskáren. V USA bylo od osmdesátých let údajně zveřejněno již více než 30 000 patentů o 3D tisku (Savini & Savini, 2015).

Až do počátku 21. století byly 3D tiskárny drahé stroje, využívané téměř výhradně v průmyslových odvětvích při vývoji prototypů. Přibližně v roce 2005 vznikly iniciativy s cílem nabídnou jednotlivcům levné 3D tiskárny. Příkladem může být projekt *Rep Rap* (Replacating Rapid prototyping) A. Bowyera z University of Bath. Cílem projektu bylo vyvinout 3D tiskárnu, která bude sama schopna vyrobit většinu vlastních dílů. Tiskárna Rep Rap se skládala z tříosého robota, na nějž byl namontován jeden nebo více extrudérů využívajících technologii Fused Filament Fabrication odvozenou od Fused Deposition Modeling. Software a hardware byly open-source, včetně elektroniky založené na platformě Arduino. Cílovými zákazníky byli „domácí kutilové“, kteří byli vyzváni k úpravě a výrobě částí vlastních tiskáren (Sells et al., 2009). Podobná iniciativa se uskutečnila v roce 2006 také na Cornellově univerzitě v USA. Tiskárna *Fab@Home* byla vyvinuta pomocí open-source hardwaru a softwaru, skládala se z tříosého systému pohybujícího s několika extrudery, které nanáší širokou škálu materiálů. Cílem bylo rozšířit vývoj a využití 3D tiskáren v průmyslové i domácí výrobě (Malone et al., 2006). V průběhu let se stal 3D tisk dostupným i pro domácí použití. Cena 3D tiskárny Prusa Research začíná například zhruba na 11 000 korun (Savini & Savini, 2015; Prusa Research, 2023).

1.1.2 Aplikace 3D tisku

V průběhu posledních 30 let se technologie 3D tisku rozšířila do různých oblastí, jako je letectví, automobilový průmysl, potravinářství, zdravotnictví, architektura, elektronika či módní průmysl. Technologie 3D tisku poskytuje oproti konvenčním technologiím nesrovnatelnou volnost při navrhování a výrobě součástí, ať už z hlediska geometrie či použitých materiálů (Shahrubudin et al., 2019).

V leteckém průmyslu přináší 3D tisk možnost výroby lehkých součástí složitých tvarů, které mohou vést k úspoře materiálů. Odlehčené součástky letadel přispívají ke snížení spotřeby paliva a tím k redukci nákladů. Aditivní výroba může být využita také v oblasti výroby náhradních dílů pro části letadel jako je například motor, jehož součástky se snadno opotřebovávají a vyžadují tak pravidelnou obměnu. K odlehčení součástí přispívá 3D tisk také v automobilovém průmyslu. V automotive se technika 3D tisku stala fenoménem, který umožňuje vytvářet lehčí a zároveň složitější konstrukce mnohem rychleji než konvenční výroba. Již v roce 2014 nechala společnost Local Motor „vytisknout“ první elektromobil. Stejná společnost využití rozšířila a vytiskla autonomní elektrický autobus OLLI, který je navíc recyklovatelný a mimořádně inteligentní. Lídrem ve využití 3D tisku v automotive je společnost Ford, která jej využívá k výrobě prototypů i součástí motorů. BMW využívá 3D tisk k výrobě ručních nástrojů pro testování a montování automobilů. Prototypy i náhradní díly vyrábí, ve spolupráci se společností SLM Solution Group AG, také Audi. Technologie 3D tisku umožňuje v automobilovém průmyslu zkoušet různé alternativy a zároveň klást důraz na zlepšování již ve fázi vývoje, což vede ke zefektivňování automobilového designu. Zároveň může technologie 3D tisku napomoci ke snížení plýtvání a spotřeby materiálu (Shahrubudin et al., 2019).

Klinické aplikace ve zdravotnictví se zpočátku týkaly zejména plánování a navádění operací či výroby implantátů. 3D tisk poskytl možnost vyvíjet například implantáty naplněné aktivními farmaceutickými látkami, které mohou být vytvářeny přesně na míru konkrétním potřebám pacienta. Postupně se 3D tisk dostává také do farmaceutického odvětví, kde je využíván k vývoji různých lékových forem. V roce 2015 byl v USA schválen lék Spritam, který je vůbec první 3D tištěný lék. Jde o lék na epilepsii, u kterého je vyžadována rychlá účinnost (Vaz & Kumar, 2021). Léčivo Spritam je vytvářeno technologií ZipDose[®], která je první a jedinou platformou pro formulaci léčiv, která využívá 3D tisk. Během procesu jsou spojovány vrstvy

práškového léčiva pomocí tekutiny na bázi vody, vzniká tak pevný, ale vysoce porézní lék. Díky vysoce porézní struktuře je lék schopen rychlého perorálního rozpouštění (Aprecia Pharmaceuticals, 2022).

3D tisk zasáhl i do oblastí jako je stavebnictví a architektury, kde je aktuálně diskutovaným tématem tisk s využitím materiálu podobnému betonu. Tato technologie odstraňuje limity, které jsou přítomny v tradičním způsobu výstavby a umožňuje snížit náklady na výstavbu i tvarově náročných objektů. V celé řadě oborů již aditivní technologie prokázala svůj potenciál, stavebnictví je však stále pozadu. Vliv technologie na tento obor však nelze podceňovat, protože může působit na faktory jako je proces výstavby, náklady na materiál a časová náročnost celého projektu. S rozvojem tisknutelných materiálů a optimalizace typických vlastností 3D tištěného betonu se potenciál této technologie blíží využití v praxi (Saleh & Elfatah, 2019). Technologie však nemusí být využívána pouze k tisku celých budov. Je možné vytvářet konstrukční díly, designové prvky, ale také vizualizace staveb tvořených konvenční technologií (Shahrubudin et al., 2019)

Stále větší pozornost získává také technologie 3D tisku potravin, pomocí kterého lze zpracovávat ingredience jako je maso, čokoláda, cukrovinky, těsta či omáčky. Technologie trojrozměrného tisku potravin může kontrolovat typ a množství ingrediencí, které mohou určovat množství, živiny a chuťově charakteristické vlastnosti přísad, což umožňuje personalizovanou výrobu potravin. Nejvyužívanějším způsobem tisku potravin je extruze materiálu a tavení v práškovém loži (Lee, 2021).

1.1.3 Technologie 3D tisku

Všechny 3D tiskárny nepoužívají stejnou technologii. Existuje mnoho způsobů, jak vytisknout vrstvy, tak aby vznikl finální produkt. Technologie 3D tisku lze rozdělit do několika skupin, na základě způsobu výroby jednotlivých vrstev tištěného dílu. Může jít o přímé nanášení, extruzi či tryskání materiálu, tavení v práškovém loži, laminaci či fotopolymerizaci. Aktuálně nejvyužívanějšími technologiemi 3D tisku jsou:

- Stereolithography (SLA)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Digital Light Processing (DLP)
- Fused Deposition Modeling (FDM)

Stereolithography (SLA)

Stereolithography (stereolitografie) je považována za původní proces 3D tisku, byla také jako první komerčně dostupná. Používá se především k vytváření modelů, prototypů a vzorků. Technologie SLA se při výrobě prototypů používá nejčastěji proto, že je časově méně náročná a levnější, ve srovnání s jinými, tradičními metodami výroby. Nicméně u některých dílů vyžaduje SLA podpůrné konstrukce, zejména pokud mají převisy. Tyto konstrukce je nutné odstranit během postprocessingu ručně. Postprocessing zahrnuje také chemickou lázeň, během které je objekt očištěn a následně úplně vytvrzen ve speciálním stroji (Jasveer & Jianbin, 2018; Agrawaal & Thompson, 2021).

Proces stereolitografie je založen na laseru. K výrobě dílů se využívá ultrafialový laser a pryskyřice. Laserový paprsek vyznačí návrh na povrch tekutého polymeru. Působení ultrafialového laseru způsobí, že se řetězce atomů v polymerní gumě spojí dohromady. Jak fotopolymerní pryskyřice reaguje na laser, vytvoří velmi přesný a pevný díl. SLA je jednou z nejpřesnějších technologií 3D tisku s vynikající povrchovou úpravou a hladším povrchem než většina ostatních metod rychlého prototypování. Hladký povrch znamená vysokou úroveň jemných detailů a velmi přesný design. SLA poskytuje také širokou škálu materiálových možností (Jasveer & Jianbin, 2018). Obecně se má za to, že tiskárny typu SLA se vyznačují relativně nízkou rychlostí tisku a jsou omezeny maximálním objemem 1000 cm³ objektu za hodinu. Rychlost a kvalita tisku se však může u různých modelů tiskáren výrazně lišit (Agrawaal & Thompson, 2021)

Selective Laser Sintering (SLS)

Při selective laser sinteringu (selektivní laserové spékání) jsou drobné částičky plastu, keramiky či skla spojovány (spékány) teplem z vysoce výkonného laserového paprsku a vytvářejí tak pevnou látku. Laser je podle datového souboru veden napříč práškovým ložem. Prášek uvnitř práškového lože je pevně stlačen. Laser se pohybuje dvěma směry, při dopadu paprsku na povrch práškového materiálu se částice vzájemně spékají a dávají tvar pevnému tělesu. Sestavovací komora musí být zcela utěsněna, protože je nutné udržovat během procesu teplotu shodnou s bodem tání práškového materiálu. Po dokončení procesu se lůžko s práškem ze stroje vyjme a přebytečný prášek se z vytištěného objektu jednoduše odstraní (Jasveer & Jianbin, 2018).

Jednou z hlavních výhod SLS je, že nevyžaduje žádné podpůrné konstrukce pro složité díly, jak je to nutné u SLA či FDM. Protože díl leží na lůžku z práškového materiálu, nejsou nutné žádné podpěry. Tato výhoda sama o sobě pomáhá šetřit materiál a snižuje výrobní náklady. Rovněž není potřebný náročný postprocessing. SLS dokáže vytisknout geometrie, které nelze vytisknout jinou metodou 3D tisku. Pomocí SLS lze tisknout i díly se složitými vnitřními součástmi bez potřeby odstraňování podpěr a s tím spojeným rizikem poškození dílu. Výsledkem je úspora času při montáži. Díly vytištěné metodou SLS jsou obvykle velmi odolné a robustní. Tato technologie nyní konkuruje dílům vyráběným tradičními metodami, jako je vstřikování, a již se používají v mnoha konečných aplikacích, jako je automobilový a letecký průmysl. Díly vyráběné technologií SLS mohou být z různých materiálů, jako je plast, sklo, keramika či kovy (Jasveer & Jianbin, 2018).

Laminated Object Manufacturing (LOM)

Při Laminated Object Manufacturing se listy plastů nebo plastových materiálů laminují nebo spojují vysokou teplotou a tlakem a poté se pomocí laseru nebo nože řízeného počítačem vytvarují do požadovaného tvaru. Tiskárna využívá souvislý list materiálu, který podávací váleček rozprostírá po konstrukční plošině. Povrch materiálu je potažen lepidlem, které se roztaví po přejetí zahřátého laminovacího válce. Počítačem řízený laser nebo nůž materiál rozřeže do požadovaného tvaru nebo vzoru. Laser také odstraní přebytečný materiál. Po vytvoření první vrstvy předmětu stavební plošina o malý kousek klesne. Druhá vrstva materiálu se pak natáhne přes plošinu a vyhřívaný válec po ní přejede a spojí ji s tou pod ní. Tento postup se opakuje, dokud není vytvořen celý objekt. Po dokončení tisku se objekt odstraní z konstrukční platformy a přebytečný materiál se odřízne. Poté se provede drobný postprocessing, který může zahrnovat broušení, barvení či lakování (Jasveer & Jianbin, 2018).

Náklady na LOM jsou velmi nízké a materiál je snadno dostupný. Výhodou LOM také je, že nezahrnuje žádný chemický proces ani reakci a není potřeba žádná uzavřená komora. Usnadňuje proto stavbu větších modelů. Tato metoda však není ideální pro výrobu objektů se složitou geometrií nebo pro výrobu funkčních prototypů. Z těchto důvodů se metoda LOM používá pouze k výrobě zmenšených modelů a koncepčních prototypů, které lze testovat z hlediska designu nebo tvaru (Jasveer & Jianbin, 2018).

Digital Light Processing (DLP)

Digital Light Processing je podobný stereolitografii. Hlavní odlišností metod je zdroj používaného světelného paprsku. Zatímco SLA používá laser, DLP využívá k vytvrzení fotosensitivní polymerní pryskyřice běžné zdroje světla. DLP tiskárna tiskne objekty promítáním na povrch pryskyřice. Materiál vystavený světlu ztvrdne a následně je nanášena další tekutá vrstva. Tento proces se opakuje, dokud není 3D model dokončen. Postprocessing zahrnuje odstranění podpůrných struktur a chemickou lázeň pro povrchovou úpravu. Ačkoliv díly vytištěné touto metodou mají dobré pevnostní vlastnosti, některé fotopolymerní pryskyřice mohou být v závislosti na konstrukci objektu křehké. Stejně jako SLA i DLP vyrábí díly s vysokou přesností a rozlišením. Výhodou DLP je však potřeba pouze mělké kádě na pryskyřici, což celý proces usnadňuje a snižuje množství odpadového materiálu i provozní náklady. DLP tiskárny využívají fotosensitivní pryskyřice, které jsou vhodné k výrobě nefunkčních prototypů, vysoce detailních uměleckých děl či vzorů pro odlévací formy (Jasveer & Jianbin, 2018).

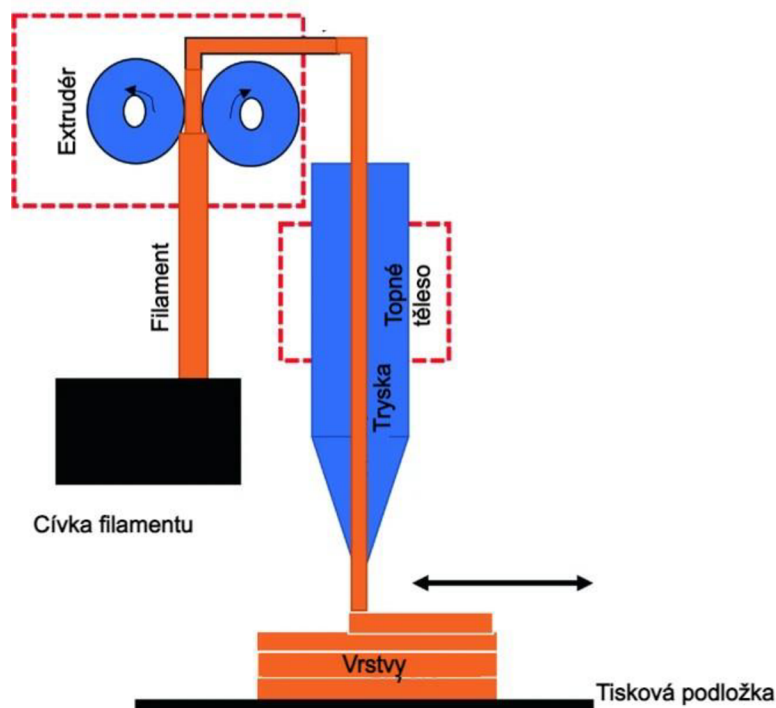
Technologie DLP se dnes úspěšně používá v biomedicínských oborech, například při výrobě zubních protéz či tkání. Potenciál využití technologie ve zdravotnictví spočívá také v možnosti výroby personalizovaných implantátů s předem určenými parametry i specifickými vnějšími strukturami. Technologie by mohla sloužit k výrobě chrupavek s vyhovujícími biomechanickými vlastnostmi či tkáně s předem určenými vnitřními strukturami pro složité orgány jako je průdušnice, srdce, plíce či cévy (Yang et al., 2020).

1.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

Tato práce se zabývá především technologií Fused Deposition Modeling, v překladu *tavené depoziční modelování (FDM)*, kterou si nechal patentovat Crump v roce 1988. Technologie je v základu poměrně jednoduchá, je však díky ní možné vyrábět i složité geometrie. Principem této aditivní technologie je extruze taveniny ze vstupní suroviny, která je vstupuje do zařízení v podobě *filamentu*. Díl je následně vytvářen vrstvou po vrstvě, od spodu nahoru. Vyhřívaná vytlačovací hlava vytlačuje termoplastickou látku, která tvoří vrstvy. Každá vrstva při pokládání tuhne a spojuje se s předchozí vrstvou (Vyavahare et al., 2020; Jasveer & Jianbin, 2018)

1.2.1 Princip technologie FDM

Filament se v tavné zahřeje na teplotu bodu tání daného materiálu a poté se vytlačuje tryskou stroje – 3D tiskárny. Hlava trysky se může pohybovat ve třech stupních volnosti a nanášet tak extrudovaný polymer na konstrukční desku dle pokynů z datového souboru. Princip procesu FDM je schematicky znázorněn na obrázku 1.2. Filament je plynule přiváděn přes extrudér a trysku stroje prostřednictvím dvou válečků otáčejících se v opačných směrech. Materiál je nanášen na konstrukční desku vrstvu po vrstvě, dokud není dosaženo požadovaného tvaru a velikosti výrobku. Během vrstvení se tryska tiskárny pohybuje podle prostorových souřadnic z CAD modelu, dokud není dosaženo finální podoby součásti (Mwema & Akinlabi, 2020).



Obrázek 1.2: Princip FDM technologie (upraveno podle Mwema & Akinlabi, 2020)

Podobně jako u SLA vyžaduje tisk dílů technologií FDM podpěry v případě výroby geometricky složitých struktur. Takto vytištěné díly vyžadují také určitý postprocessing. Obecně lze součásti vyrobené FDM technologií brousit, natírat či frézovat, aby se zlepšil jejich povrchový vzhled i funkčnost. V porovnání se SLA je proces FDM méně přesný. V případě náročných geometrií může být proces také časově náročný (Jasveer & Jianbin, 2018; Mwema & Akinlabi, 2020).

1.3 Materiály pro FDM tisk

Aditivní výroba obvykle využívá materiály, které jsou běžné i v konvenčních zpracovatelských technologiích. Může jít o plast, kov, vosk, sádro, písek atd. Každý z materiálů je specifický svými mechanickými i fyzikálními vlastnostmi. S rapidním rozvojem 3D tisku vyvstaly také otázky jeho dopadu na životní prostředí, zejména s ohledem na používané materiály a jejich uhlíkovou stopu. Z tohoto důvodu se pozornost začala upínat k vývoji biodegradabilních, recyklovatelných a kompostovatelných *eco-friendly* materiálů. I přes tyto snahy však trhu stále dominují nebiodegradabilní materiály, zejména z důvodu jejich nízké ceny (Mazurchevici et al., 2020).

Pro metodu FDM jsou využívány *tiskové struny*. Ve formě struny pro 3D tisk je dodávána řada materiálů, jako je například polyethyltereftalát ve směsi s glykolem (PETG), akrylonitril-butadienstyren (ABS), akrylonitril-styren-akrylát (ASA), termoplastické elastomery (TPE) a polypropylen (PP), jedním z nejpoužívanějších materiálů je kyselina polyléčná (PLA). Používá se také řada kompozitních materiálů, které připomínají dřevo, bronz či měď. Volba správného materiálu je důležitým krokem před zahájením samotného tisku. Materiál musí odpovídat požadovaným kritériím výsledného výrobku, zároveň však musí plnit požadavky pro tisk (Kováčová et al., 2020; Stříteský et al., 2019).

1.3.1 Polyethyltereftalát glykol (PETG)

Polyethyltereftalát (PET) je jedním z nejprodukovánějších plastem na světě, ze kterého se vyrábějí například obaly na potraviny či lahve na vodu. Limitem PET polymeru je krystalizace, pro jeho odstranění byl vytvořen glykolem modifikovaný PET kopolymer – PETG (poly(-ethylenglykol-co-,4cyklohexandimethanoltereftalát)). Ten je syntetizován částečným nahrazením ethylenglykolových jednotek PET 1,4cyklohexandimethanolenovými jednotkami. Mechanické vlastnosti PETG jsou blízké vlastnostem PET. PETG má znatelnou pevnost v tahu, průhlednost, pružnost, je vysoce zpracovatelný a chemicky odolný. Pro 3D tisk je navíc možné využívat recyklovaný PETG, aniž by došlo k výrazné změně vlastností oproti panenskému PETG (Kováčová et al., 2020).

PETG filamenty je možné produkovat v mnoha barvách i provedení. Mimo matné struny je možné produkovat i průhledné, model vytištěný z takovýchto strun je po zatuhnutí transparentní. Jde o jeden z nejlevnějších a zároveň nejsnáze tisknutelných materiálů, vhodných i pro tisk technických dílů. Pro tisk je doporučena teplota trysky 230 °C pro první vrstvu, o 10 stupňů více pro ostatní vrstvy. PETG vyžaduje využití vyhřívané podložky, ta by měla být 85-90 °C. Materiál není vhodný pro tisk přemostění a převisů, navíc je náchylný k vláskování (stringování). Vláskování může do určité míry zabránit využití chlazení, vyšší teplota filamentu však podporuje spojení vrstev, což vede k vyšší mechanické odolnosti. Navíc je materiál silně přilnavý k tiskové podložce, proto je vhodné využívat texturované tiskové pláty, případně potřít povrch podložky tyčinkovým lepidlem. Ve fázi postprocessingu je možné PETG brousit za sucha i za mokra. Rozpouštění a vyhlazování je však možné pouze v laboratoři za využití dichlormethanu (Prusa Research a.s., 2022c).

1.3.2 Akrylonitril-butadienstyren (ABS)

Akrylonitril-butadienstyren je široce využívaným průmyslovým termoplastem. Jde o směs akrylonitrilu, butadienu a styrenu, míchanou v různých poměrech. Butadienová část je rovnoměrně rozložena přes akrylonitril-styrenovou matici. Obvykle se ve výsledné směsi nachází 29-60 % styrenu, 23-41 akrylonitrilu a 10-30 % butadienu. Styren zajišťuje vysoký povrchový lesk, akrylonitril zajišťuje chemickou a tepelnou odolnost a butadien se používá pro zvýšení pevnosti. Změnou poměru daných látek vzniká materiál, rozdílných vlastností pro rozdílné aplikace. Pro materiál je charakteristická vynikající houževnatost, odolnost proti stárnutí, tvrdost, lesk, tuhost, snadná zpracovatelnost, chemická odolnost a nízká cena (Derakhshanfard & Mehralizadeh, 2020; Shi et al., 2021).

ABS je materiál vhodný k tisku mechanicky namáhaných dílů, jeho povrch se dá navíc vyhladit acetonem. Hlavní nevýhodou materiálu je jeho silné kroucení a také uvolňování toxických výparů. Z tohoto důvodu je nutné používat tento materiál při tisku v dobře větrané místnosti. Pro tisk je doporučována teplota trysky 255 °C. Ta by měla mít teplotu mezi 80-110 °C, v závislosti na velikosti tištěného objektu. Při chladnutí mají díly z ABS tendenci se smršťovat, obvykle o 1-2 %. ABS je vhodný k tisku levných technických dílů, u kterých je požadována dobrá teplotní a mechanická odolnost. Při postprocessingu je možné díly snadno brousit, případně vyhlazovat acetonovými výpary (Prusa Research a.s., 2022a).

1.3.3 Akrylonitril-styren-akrylát (ASA)

Akrylonitril-styren-akrylát je nástupcem ABS. Místo butadienu má ve své molekule akryl, díky tomu dokáže lépe odolávat vysokým teplotám nebo UV záření, z těchto důvodů je vhodný i pro výrobu dílů pro venkovní použití. Materiál se široce používá ve stavebních materiálech, jako jsou dlaždice ze syntetické pryskyřice, okna či střešní panely. Nevýhodou materiálu může být nízká odrazivost IR světla, čímž může docházet k pronikání tepla (Mazurchevici et al., 2020).

ASA je odolný a tvrdý materiál, jeho nevýhodou je však silné kroucení při tisku, což vyžaduje práci při vyšších okolních teplotách. Doporučená teplota trysky je 260 °C, teplota podložky by pak měla být 105-110 °C. Výhodou materiálu je rozpustnost ASA v acetonu, což umožňuje jeho využití při postprocessingu k dosažení hladké a lesklé povrchové úpravy, která působí jako po ošetření autolakem. Mimo to je možné díly brousit a lepit acetonem (Prusa Research a.s., 2022b).

1.3.4 Termoplastické elastomery (TPE)

Termoplastické elastomery jsou hybridní materiály, obecně sestávající z měkké elastomerní fáze a tvrdého termoplastického segmentu, což jim dává jedinečnou elasticitu podobnou pryži, ale zpracovatelnost termoplastů. Kromě toho mají vynikající fyzikálně-mechanické vlastnosti, nízkou hmotnost, schopnost spojovat více termoplastů, dobrou chemickou odolnost a odolnost proti rozpouštědlům. Díky kombinaci těchto vlastností jsou přínosem pro řadu průmyslových aplikací. Jde o recyklovatelné materiály, protože na rozdíl od termosetových kaučuků mají pouze tepelně reverzibilní fyzické změny na polymerním řetězci. TPE mají dobrou zpracovatelnost, což z nich tvoří vhodné materiály pro výrobu složitých dílů pomocí 3D tisku (Awasthi & Banerjee, 2021).

Vzhledem k ceně a náročnosti tisku jsou TPE materiály vhodné pro pokročilé uživatele. Doporučená teplota trysky je 230-245 °C, teplota podložky pak 60-75 °C. Filamenty jsou obvykle odolné vůči poškození, flexibilitu si zachovávají i v chladném prostředí. Tisk TPE materiálů je náročnější, dochází při něm k řadě komplikací jako je ucpávání trysky, špatné přemostění, zamotávání filamentu do extruderu či vláskování (Prusa Research a.s., 2023).

1.3.5 Polypropylen (PP)

Polypropylen byl představen v roce 1954 a okamžitě se stal vysoce populární díky své nejnižší hustotě mezi běžnými termoplasty. Je vysoce chemicky inertní, navíc může být zpracován pomocí různých technik. PP se syntetizuje katalyticky z propylenového monomeru. Je vhodný pro výrobu řady předmětů, včetně takových, které je nutné pro použití v klinickém prostředí pravidelně sterilizovat. Materiál je navíc odolný vůči organickým rozpouštědlům, zásadám i kyselinám. PP má vynikající pevnost v tahu a vysokou tepelnou odolnost, při nízkých teplotách však křehne a není příliš odolný proti nárazu (Singh et al., 2022).

PP se v 3D tisku používá pro tisk ohebných částí, jako jsou panty či řemínky. Vzhledem k vysoké ceně a vyšší náročnosti tisku nejde o materiál vhodný pro začátečníky. Doporučená teplota trysky je 220 °C, teplota podložky by měla být 100 °C. Nevýhodou PP je také špatná přilnavost k podložce, doporučuje se používat sklo, případně hladký PEI plát s izolepou. Materiál je však hodný pro tisk výrobků vhodných pro styk s potravinami i tenkostěnných průsvitných modelů (Prusa Research a.s., 2022e)

1.3.6 Kyselina polyléčná (PLA)

Výše uvedené materiály spojuje jedna vlastnost – biologická nerozložitelnost. Ta se jeví jako problematická zvláště ve chvíli, kdy se z materiálu stává odpad. Hledání biologicky rozložitelných materiálů přitahuje velkou pozornost. Hlavním problémem je vyvinout biologicky rozložitelný materiál, který by vykazoval podobné vlastnosti a cenu jako výše uvedené polymery. Nehledě na to, že nezbytná je také stabilita mechanických vlastností v závislosti na čase a prostředí. Jedním z nejslibnějších biopolymerů s potenciálem stát se velkoobjemově používaným plastem je kyselina polyléčná – PLA. Jde o biologicky odbouratelný polyester, který lze získat polymerací kyseliny mléčné s otevřením laktátového kruhu nebo polykondenzací kyseliny mléčné. Již dnes je PLA široce využívána v 3D tisku, ale také při výrobě lékařských implantátů či jako rozložitelný obalový materiál (Enumo et al., 2020).

Dle Prusa Research a.s., (2022d) je PLA jedním z nejsnadněji tisknutelných materiálů, který je levný a vhodný i pro začátečníky. Materiál je vhodný pro tisk rychlých prototypů či levných modelů. Doporučená teplota trysky je 215 °C, bod tání PLA je však již okolo 175 °C a již kolem 60 °C materiál měkne. PLA není vhodná pro

venkovní použití, zejména proto, že neodolá vysokým teplotám, rozkládá se vlivem UV záření a není příliš mechanicky odolná. Na rozdíl od jiných materiálů používaných v 3D tisku se PLA láme po vrstvách či střepinách. PLA se nedoporučuje ani k tisku nádob na jídlo či pití. Na povrchu výtisku jsou mikroskopické trhliny, ve kterých může docházet k usazování bakterií, tomuto lze zamezit nanesením speciální vrstvy zvané *food safe coating*, která povrch uzavře. Ve fázi postprocessingu je možné PLA brousit smirkovým papírem, to však vyžaduje současné chlazení vodou. Chemicky je PLA možné vyhlazovat pouze v laboratorních podmínkách za použití chloroformu, horkého benzenu nebo tetrahydrofuranu. Jednotlivé součásti vytištěné z PLA je možné spojovat vteřinovým lepidlem případně acetonem.

Syntéza PLA

Kyselina polymléčná je směsí D a L laktidu (cyklického diesteru kyseliny mléčné (LA)). Samotná kyselina polymléčná se v průběhu času rozkládá na neškodnou kyselinu mléčnou (Cuiffo et al., 2017). Jde o polyester vyráběný z přírodních škrobů obsažených například v kukuřici či cukrové třtině. Syntéza PLA začíná výrobou kyseliny mléčné a končí její polymerací s mezikrokem tvorby laktidu. V zásadě jde o tři kroky. Prvním krokem je produkce LA, následuje purifikace LA s následnou přípravou jejího cyklického diesteru (laktidu). Posledním krokem je polymerace s otevíráním kruhu laktidů anebo polykondenzace (Enumo et al., 2020; Singhvi et al., 2019).

Ačkoli lze LA vyrobit chemickými procesy, téměř 90 % celkového množství LA se celosvětově vyrábí bakteriální fermentací, zbývající část se vyrábí synteticky hydrolýzou laktonitrilu. Biotechnologická výroba LA převažuje díky svému nízkému dopadu na životní prostředí a nízkým výrobní nákladům. Jde o fermentaci přírodních škrobů pomocí bakterií mléčného kvašení. Škroby pochází obvykle z obnovitelných zdrojů jako je cukrová třtina, kukuřice, brambory, maniok, pšenice či rýže. Účinnost fermentace LA závisí především na kmenech producentů LA, fermentačních substrátech a způsobech provozu. LA je produkován širokým spektrem mikrobiálních druhů, včetně bakterií, hub, kvasinek, sinic a řas. Většina komerčních LA je produkována bakteriální fermentací sacharidů homofermentativními organismy patřícími do rodu *Lactobacillus* (Singhvi et al., 2019).

Polykondenzace zahrnuje dva kroky a jde o nejlevnější způsob získávání PLA, je však obtížné získat takto PLA s vysokou molekulovou hmotností. To naopak umožňuje polymerace s otevíráním kruhu laktidů za přítomnosti katalyzátoru. Katalyzátory jsou obvykle těžkými kovy, které zanechávají v PLA stopové zbytky, což může být nepříznivé pro některé aplikace. Zásadní otázkou je tedy nahrazení katalyzátoru z těžkých kovů bezpečnými a pro životní prostředí přijatelnými alternativami. Jako jedna z nejschůdnějších alternativ a ekologicky nezávadných metod se jeví enzymatická polymerace. Vysoce specifické enzymatické reakce mohou být schopny syntetizovat polymery s jemnou strukturou z levných surovin s nízkými požadavky a teplotu a čistotu monomerů. Úplná biosyntéza PLA proto může být výhodnější, než chemický proces nicméně jde stále o ne příliš využívanou strategii (Singhvi et al., 2019).

Zlepšování vlastností PLA

PLA má kromě biokompatibility také dobrou průhlednost, vysokou pevnost v tahu, snadné zpracování, odolnost vůči vlhkosti a bariérové vlastnosti podobné PET. Při pokojové teplotě je však PLA tuhá a křehká, což omezuje její využití pouze na neohebné aplikace (Enumo et al., 2020). Aby bylo možné aplikace PLA rozšířit, řada výzkumníků vytvořila různé strategie, jako jsou chemické modifikace či plastifikace. Tyto strategie lze kategorizovat do 4 hlavních kategorií: aditivní plastifikace, výroba směsí, ztužování elastomerů a mezifázová kompatibilita (Koh et al., 2018).

Plastifikace, tedy změkčování je běžná technika využívaná pro zvýšení flexibility polymerů a také pro zlepšení jejich zpracovatelnosti. Zvýšením pružnosti lze zvýšit houževnatost materiálu. Zvýšení flexibility prostřednictvím plastifikace však obvykle znamená snížení pevnosti v důsledku snížení interakce mezi řetězci polymeru (Koh et al., 2018). Nicméně i tento problém je možné řešit volbou adekvátního změkčovadla. Ta závisí na mnoha dalších proměnných, jako je povaha matrice a změkčovadla, složení změkčovadla či tepelná stabilita. Jako změkčovadla jsou využívány citrátové estery, triacetin, kyselina maleinová, propylmaleinát či dipropylmaleinát (Enumo et al., 2020)

Pro řadu aplikací je vhodné využívat směsi PLA s jinými polymery. PLA je možné mísit s řadou dalších biopolymerů jako je škrob, lignin, PCI, PBS, PPC či PES. Pro zlepšení vlastností je však možné PLA mísit i s nebiodegradabilními polymery. Složení směsi se obvykle liší v závislosti na požadované aplikaci (Nofar et al., 2019).

Zlepšování vlastností PLA pomocí kyseliny maleinové

Quintana et al. (2016) použili k vytvoření kompatibilní biodegradabilní směsi PLA/PBS anhydrid kyseliny maleinové naroubované na PLA. Kompatibilizované směsi vykazují zejména dobrou zpracovatelnost. Při roubování PLA anhydridem kyseliny maleinové byly před extrudací vysušené pelety PLA smíchány se 3 % své hmotnosti prášku anhydridu kyseliny maleinové. Jako radikálový stimulant, umožňující roubování anhydridu na PLA byl využit komerční přípravek Luperox. Přidáním anhydridu kyseliny maleinové dochází ke zvyšování tuhosti směsi.

Biologická rozložitelnost PLA

PLA materiály jsou obecně označovány za kompostovatelné, biologicky rozložitelné a recyklovatelné. Během několika měsíců až let má docházet k degradaci PLA hydrolýzou kyseliny mléčné na vodu, oxid uhelnatý a humus, který je dále metabolizován mikroby. Po 20 měsících v půdě má docházet až k 20 % úbytku molekulové hmotnosti dílu z PLA. Degradace je však do značné míry ovlivněna vlastnostmi vzorku ale také okolním prostředím (Ilyas et al., 2022). O tom, zda jde však opravdu o ekologický, kompostovatelný a v životním prostředí rozložitelný materiál se však vedou bouřlivé diskuse.

Dle Vaškeviče (2019) je nutné se na PLA dívat z širšího úhlu pohledu a je nutné si uvědomit, že celý životní cyklus materiálu se neskládá pouze z jeho odbourávání, ale také výroby. Pro tu je nutné nejprve vypěstovat rostliny ve velkých monokulturách a následně je biotechnologicky a chemicky zpracovat do podoby výsledného polymeru. Stejně tak samotná kompostovatelnost materiálu je náročnější, než se jeví. PLA není možné kompostovat v domácích podmínkách. Kompostování musí probíhat řízeně za kontrolovaných podmínek při teplotě kolem 60 °C, tedy v průmyslových kompostárnách, navíc po dobu několika týdnů. Navíc v případě odchylek od „ideálních podmínek“ se PLA rozkládá na mikroplasty, které se v životním prostředí chovají stejně jako syntetické. Ve volné přírodě se PLA chová navíc jako konvenční plast. Po delším vystavení slunečnímu záření a oxidaci se opět rozloží na mikroplasty. Před domácím kompostováním PLA filamentů a výrobků z nich varuje své zákazníky i Prusa Research a.s. (2022d).

1.3.7 Kompozitní materiály využívané v technologii FDM

Za kompozitní materiál považujeme takový materiál, který kombinuje minimálně dva různé materiály, jejichž vlastnosti se liší. Jednotlivé složky si v kompozitu zachovávají svou identitu, nedochází k jejich rozpouštění ani mísení, přesto však na své okolí působí v součinnosti. Každá z použitých složek však může být identifikována fyzikálně. Kompozit obsahuje minimálně jednu spojitou a dále rozptýlenou fázi. Spojitá fáze zajišťuje soudržnost materiálu a nazývá se *matrice*. Rozptýlená fáze je v kompozitu víceméně rovnoměrně rozmístěná a nazývá se *disperze*. Z hlediska mechanických vlastností je důležité rozhraní mezi disperzí a matricí. Zda a v jaké míře na rozhraní disperze a matrice vzniká vazba, případně jakou má pevnost a charakter. Na mezifázovém rozhraní může vznikat chemická, fyzikální či mechanická vazba. Matrice musí být ze své podstaty pevnou látkou, disperze se však může vyskytovat v pevném, kapalném či plynném skupenství (Černý, 2017).

Pro dosažení výrobku s co nejlepšími funkčními či strukturálními vlastnostmi je i při 3D tisku možné využívat kompozitní materiály. Ke zlepšení vlastností polymerové matrice může být využito například mísení s vyztužovacími částicemi. V případě FDM se takové částice vtačují přímo do filamentů z polymerních materiálů (Wang et al., 2017). Může jít o přidávání částic železa (Fe) či mědi (Cu) do ABS pro zlepšení tepelné vodivosti a snížení tepelné roztažnosti (Nikzad et al., 2011; Hwang et al., 2015) Pro zlepšení dielektrické permitivity a říditelné rezonanční frekvence je možné přidat BaTiO₃ do ABS a CaTiO₃ do PP (Isakov et al., 2016) Pro snížení anizotropie tištěných součástí je možné přidávat do ABS jiné termoplastické elastomery (Torrado Perez et al., 2014). Přidání kovových částic do polymeru se ukázalo jako účinným řešením pro snížení deformace finálních tištěných dílů způsobené tepelnou roztažností polymeru (Wang et al., 2017).

Vlastnosti materiálů s polymerní matricí mohou také významně zlepšit vláknové výztuže. Pro zpracování technologií FDM se polymerní pelety a vlákna nejprve smísí a následně se z nich tvoří filamenty pomocí extrudéru (Wang et al., 2017). Pro zlepšení mechanických vlastností polymerního kompozitu jsou běžně používána jako výztuha krátká skleněná či uhlíková vlákna (Zhong et al., 2001; Tekinalp et al., 2014). Vysoce funkční kompozity pro 3D tisk je možné také vytvořit smísením polymerů s nanomateriály jako uhlík, grafen, grafit, keramika a kovové nanočástice (Wang et al., 2017).

1.4 Extrudace filamentu

Extrudaci, tedy vytlačování lze využít ke zpracování materiálů jako jsou termoplasty, termoplasty vyztužené krátkými vlákny, kovy, technická keramika či cement. Při extrudaci je surovina dodávána do stroje ve formě pelet nebo vlákna (Strano et al., 2021). Vytlačování se široce používá pro kontinuální i přerušovanou výrobu polymerních výrobků, protože umožňuje přípravu vysoce homogenních polymerních tavenin za poměrně krátkou dobu. Nízká tepelná vodivost a vysoká viskozita polymerů znemožňuje vysokorychlostní tavení pomocí vnějších zdrojů tepla, tedy tavení ve velkoobjemových nádobách. Pokud jsou polymery umístěny do velké nádoby a zahřívány, vnější části se taví a zůstávají horké, zatímco vnitřní části zůstávají chladné. To má za následek velké teplotní gradienty v nádobě s polymerem a dlouhou dobu zahřívání, což vede ke špatné teplotní homogenizaci a degradaci vnějších částí, zatímco vnitřní části se pomalu zahřívají a tají. Polymery se účinně taví viskózním rozptylem mechanické energie, tedy v extrudéru. Použití extrudéru umožňuje rychlé tavení polymeru v tenké vrstvě. Tavenina je průběžně odstraňována a uvolňuje místo pro čerstvou pevnou látku k tavení. Extrudér navíc umožňuje vytvořit filament pro následovné použití, například při technologii FDM (Mount, 2011).

Výroba filamentů může probíhat v různých měřítkách, od stolních strojů až po průmyslové linky. Komerční stolní stroje obvykle zabírají maximálně 3 metry na délku, jejich produkce je však značně omezená. Nejvýznamnějšími výrobci komerčních stolních linek jsou 3devo, Filastruder, Filabot či Felfil. Stolní extrudery jsou, v závislosti na typu materiálu, schopny vyprodukovat 1 kg filamentu zhruba za 5–8 hodin, což odpovídá průměrné rychlosti výtisku 1 metru filamentu za minutu. Rozlišná je cena, za kterou je možné stolní extrudery pořídit. Cena Filastruderu začíná na 300 USD, Felfil je možné pořídit za 1359 eur. Cena 3devo, které je na hranici domácího a profesionálního využití, začíná na 5830 euro. Průmyslové extruzní linky jsou schopny produkovat stejné množství filamentu mnohem rychleji. Extruzní linka, kterou nabízí společnost BOCO je schopna produkovat 5–20 kg filamentu za hodinu, rychlost linky je až 100 m/minutu. Cena průmyslových linek se pohybuje řádově ve stovkách tisíc až milionech korun (3devo, 2023; BOCO Pardubice, 2023; Filabot, 2023; Filastruder, 2023; Profi Filaments, 2023).

1.4.1 Princip extrudace

Základem extrudéru (vytlačovacího stroje) je šnek, ten se otáčí v plastikační komoře, která má obvykle podobu ocelového válce. Do válce je přiváděn materiál, který je topnými tělesy na vnější straně válce ohříván na úroveň bodu tání. Přívod materiálu zajišťuje dávkovací mechanismus. Granulát je posouván plastikační komorou pomocí šneku směrem k vytlačovací hlavě (Ausperger, 2015).

V zásadě existují dva typy šnekových extrudérů – jednošnekový a vícešnekový. (obvykle dvoušnekový). Jednošnekové extrudéry se vyrábí již mnoho let a stále jsou primární formou vytlačovacích strojů, zejména díky jejich technické nenáročnosti a díky schopnosti zvládat vysoké kroučící momenty při zpracování polymerů. Vícešnekové extrudery se využívají zejména pro vytlačování polymerních prášků a směsí, které vyžadují disperzní míchání. U dvoušnekových extruderů mohou být šneky buď souběžně anebo protiběžně rotující (Mount, 2011).

V plastikační jednotce vykonává šnek pouze stejnosměrný rotační pohyb. Konstrukce šneku je složena ze třech zón – dopravní, kompresní a homogenizační. Obvykle zabývá dopravní zóna 60 % délky šneku, zbylá část bývá rovnoměrně rozdělena mezi kompresní a homogenizační zónu. Dopravní i homogenizační zóna mají konstantní výšku, v kompresní zóně se výška postupně snižuje na výšku závitů v homogenizační zóně. Rozdíl ve výšce závitů mezi dopravní a kompresní zónou je vyjádřen takzvaným *kompresním poměrem*, které opět v závislosti na průměru šneku bývá 2 až 3:1. Dle zpracovávaného materiálu je upraven profil šneku. Rozdílný profil mají šneky pro roztavení materiálu, intenzivní promíchávání taveniny či pro probarvení nebo rovnoměrné rozložení plniva. Materiály jako PET či PBT nevyžadují hluboké závitů, pro zpracování biopolymerů je však vyžadována vyšší hloubka závitů (Seidl, 2015).

Před vytlačovací hlavou může být tzv. lamač. Ten homogenizuje tlak a rychlost taveniny a rozrušuje také její rotační pohyb způsobený šnekem. Díky průchodu lamačem se všechny částice taveniny pohybují v jednom směru přímočaře. Lamač může být doplněn ještě sítím, které slouží k zachycení nečistot v tavenině. Vytlačovací hlava musí umožňovat plynulý průchod taveniny, z toho důvodu musí být její povrch velmi hladký. Odpovídajícím způsobem musí být také zajištěno zahřívání vytlačovací hlavy. Teplota musí odpovídat zvolenému materiálu, aby nedocházelo k jeho tuhnutí a případnému vracení ve vytlačovací hlavě. Vhodná není ani příliš

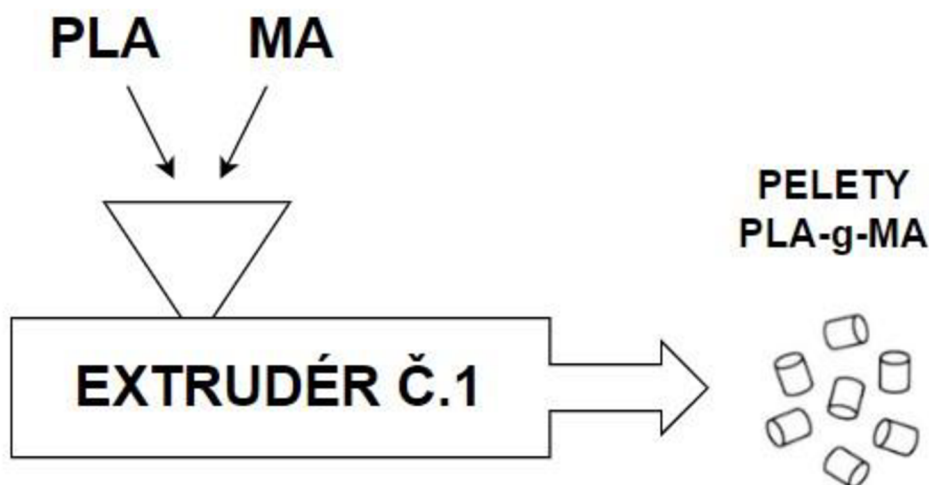
vysoká teplota vytlačovací hlavy, ačkoliv by z ní materiál vytékal plynule, za ní by docházelo k jeho deformaci. Dle tvaru se vytlačovací hlavy dělí na přímé, příčné, šikmé a přesazené. Přímá vytlačovací hlava má vstup i výstup v ose šneku. U příčných vytlačovacích hlav vychází materiál ve směru kolmém na osu šneku. Zpracovávaný materiál musí být v tomto případě dostatečně tekutý, aby prošel vytlačovací hlavou plynule i při změně směru toku. Takové hlavy jsou určeny k oplášt'ování vodičů a výrobě fólií. Vnitřek plastikační komory musí být přesně obrobena, tvrdost se zvyšuje nitridováním. Její vyhřívání bývá zajištěno elektrickými odporovými pásy případně indukci či cirkulujícím médiem. Násypka bývá naopak chlazená (Seidl, 2015).

Cíl práce

Cílem diplomové práce je konstrukčně navrhnout a následně sestrojít zařízení pro extruzi kompozitních materiálů určených pro aditivní výrobu. Přístroj bude primárně sloužit jako testovací zařízení pro další vědecký experiment. Požadované parametry pro konstrukci zařízení lze shrnout do následujících bodů:

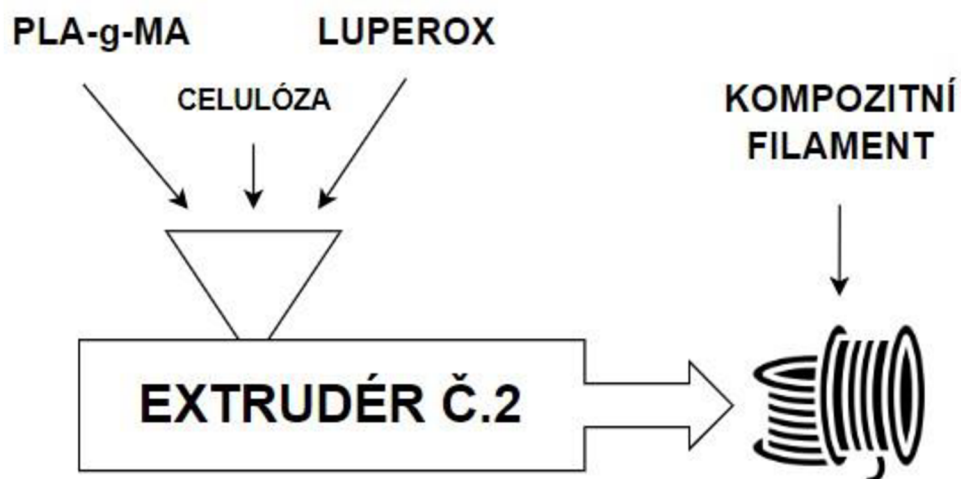
- Zhotovit přístroj za minimální náklady.
- Možnost výměny, nebo náhrady komponent.
- Požadovaná výstupní surovina ve formě pelet.
- Snadná manipulace.
- Snadná obsluha.
- Zamezení vzniku úrazu při používání.

Funkčnost zařízení bude ověřena prostřednictvím provedení testu funkčnosti. Během testu funkčnosti budou použity pelety čistého PLA. Přístroj je vyráběn primárně za účelem výroby experimentálního kompozitního materiálu. V první fázi dalšího experimentu bude vytvořena sloučenina PLA-g-MA. Kyselina maleinová se využívá jako vazebné činidlo při roubování na PLA a zajišťuje lepší adhezi k dalším materiálům. Tato směs materiálu bude vyráběna v extrudačním stroji, který byl v rámci diplomové práce navržen a sestrojen. Na obrázku 1.3 je znázorněný postup, kde je výstupním produktem PLA-g-MA ve formě pelet.



Obrázek 1.3: Postup výroby PLA-g-MA pelet

Po vytvoření pelet PLA-g-MA se bude tento materiál dále extrudovat s Luperoxem a přírodními vlákny v profesionálním extruderu Exo (3D Struna, 2023). Postup výroby je znázorněn na obrázku 1.4. Výsledným cílem experimentu je vytvořit kompozitní filament, který bude oproti běžnému PLA disponovat lepšími mechanickými vlastnostmi a biologickou odbouratelností.

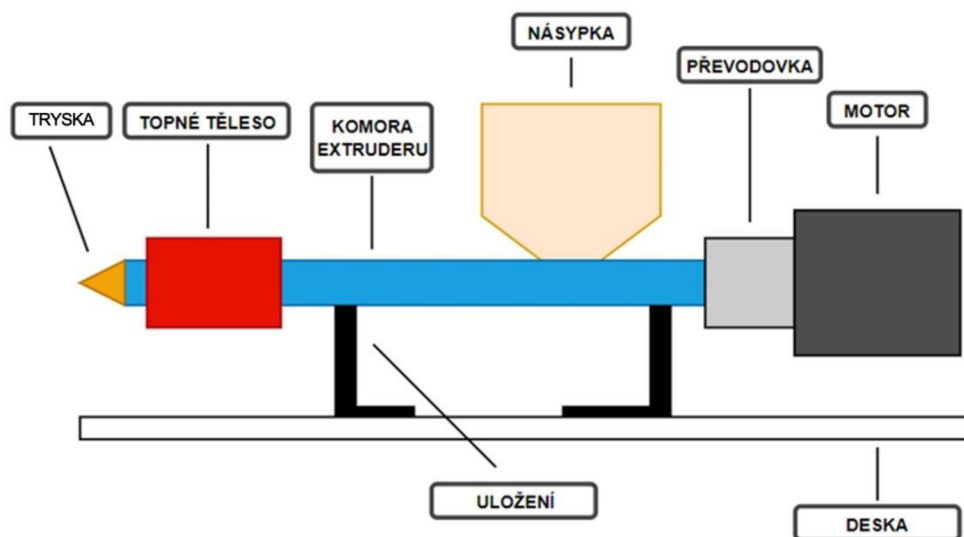


Obrázek 1.4: Postup výroby výsledného filamentu

2 Metodika

2.1 Návrh extrudéru

Samotné realizaci tvorby zařízení pro extrudaci kompozitních materiálů pro aditivní výrobu předcházela návrh projektu. Byly vybrány materiály vhodných vlastností, zatímco konstrukce extrudéru byla zvolena s důrazem na jednoduchost a cenu. Na komerčně dostupných extrudérech pro výrobu struny je patrné, že se konstrukce zařízení jednotlivých výrobců může lišit, nicméně koncepčně je podobná a skládá se z obdobných komponent. Na trhu jsou dostupné stolní i nástěnné verze. Vzhledem k cílům diplomové práce byl zvolen přenosný návrh stolního modelu na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Návrh extrudéru pro zpracování kompozitního materiálu

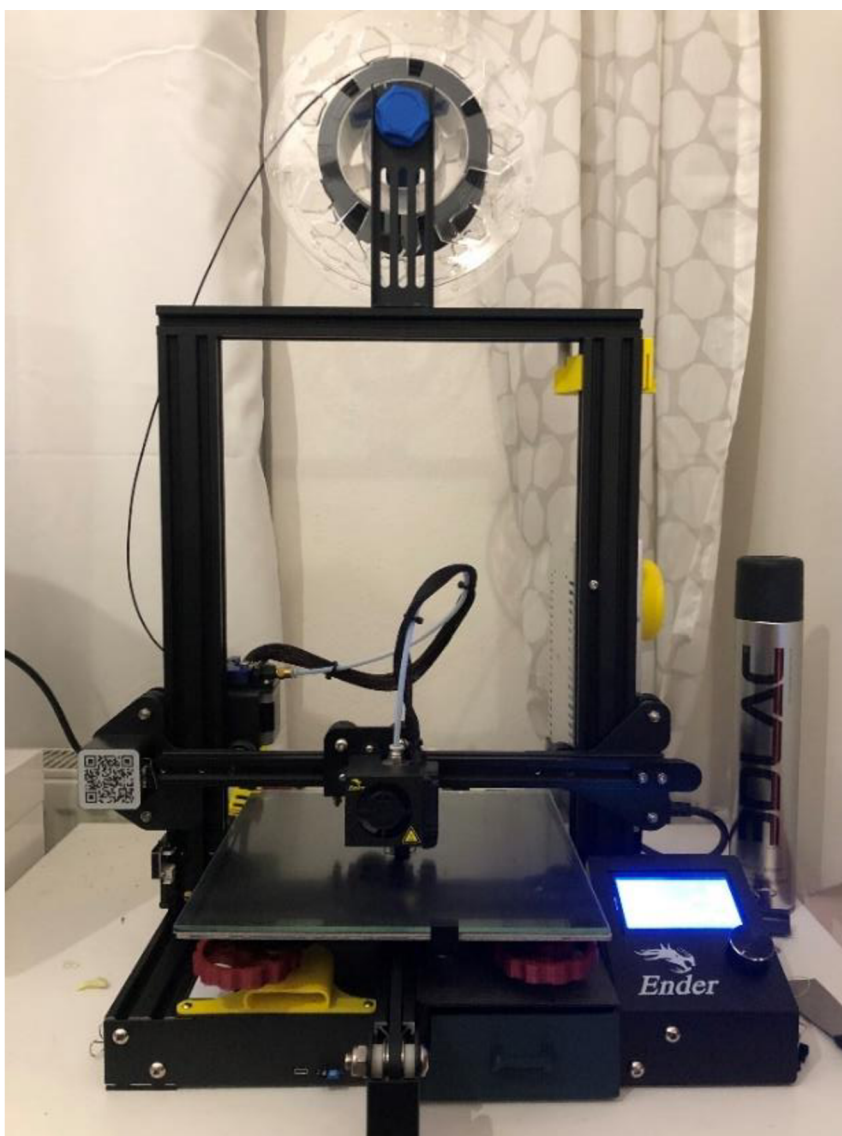
2.2 3D modelace

3D návrh veškerých komponent, včetně pohybové studie celé sestavy byl vytvořen prostřednictvím konstrukčního softwaru od firmy Dassault Systemes, konkrétně SolidWorks 2021-2022.

3D modely byly následně pomocí open-source programu PrusaSlicer od světově proslulé české firmy zabývající se výrobou 3D tiskem a filamentu – Prusa Research a.s., převedené na G-code (jazyk pro automatizované řízení 3D tiskárny).

2.3 FDM tisk

Pro výrobu konstrukčních prvků z polyesteru bylo využito FDM 3D tiskárny Creality Ender 3 (obrázek 2.2). Tato tiskárna byla dodána jako stavebnice od firmy Alza a.s. (Česká republika). Disponuje tiskovou plochou o rozměrech 220 x 220 x 250 mm s maximální doporučenou rychlostí tisku 180 mm.s⁻¹.



Obrázek 2.2: 3D tiskárna Creality Ender 3 při tisku držáku motoru

2.4 Strojírenské úpravy

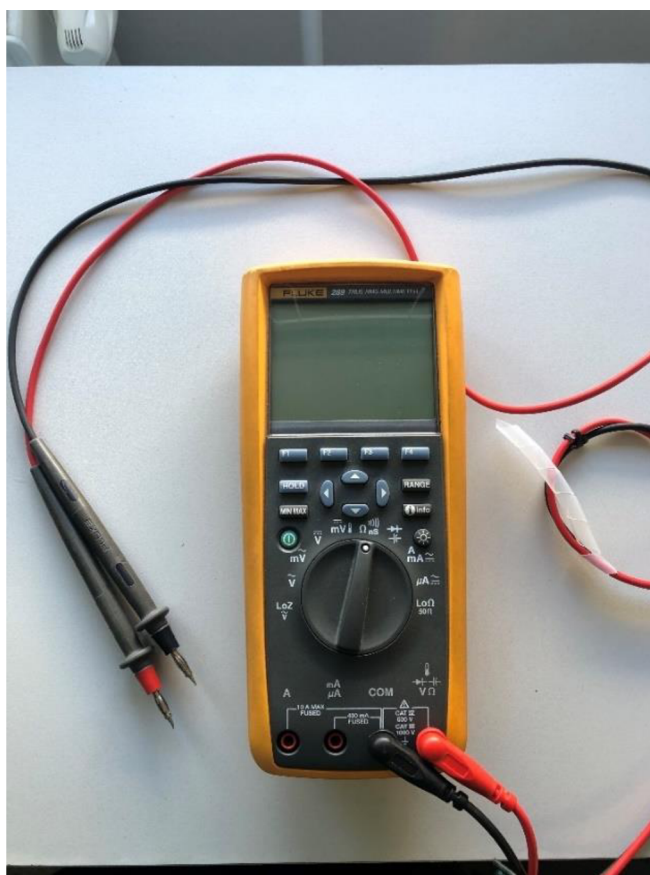
Při návrhu byl kladen důraz na jednoduchou konstrukci celého stroje. Část komponent byla vyráběna z kovových materiálů, které bylo zapotřebí dále obrábět. Obrábění probíhalo v domácí dílně za použití frézky, soustruhu a sloupové vrtačky. Kovové dílce byly následně ojehlené od okují pomocí ručního náradí. Na obrázku 2.3 vlevo je ukázka soustružení na stroji Tos S 32, vpravo vrtání na stoji Tos R45S.



Obrázek 2.3: Obrábění dílců extrudéru

2.5 Elektrotechnické měření

Pro měření elektrických veličin při zapojování elektrické části extruderu byl využit digitální multimetr od značky Fluke (USA), model 289 (obrázek 2.4). Jedná se o drahý průmyslový přístroj, který byl zapůjčen pouze pro účely stavby extruderu, je předimenzovaný a je možné využít i výrazně levnější varianty.



Obrázek 2.4: Multimetr Fluke 289

2.6 Termografie

Pro sledování teplot byla zapůjčená termokamera Seek Thermal ShotPro. Kamera je schopná zaznamenávat teploty v rozsahu -40 až 330 °C při teplotní citlivosti 70 mK.

3 Praktická část

3.1 Pohon extrudéru

Prvotním plánem bylo využít trojfázový asynchronní motor, který byl dostupný na Fakultě zemědělské a technologické, na Katedře techniky a kybernetiky. Jednalo se o motor Siemens 1LA7060-4AB11. Z výrobního štítku viz tabulka 3.1 je patrné, že nominální otáčky motoru jsou 1350 ot.min^{-1} . Pro účel extrudéru jsou tyto otáčky mnohonásobně vyšší než požadované a převodování by bylo v případě koupě převodovky nákladné. Pro testování je důležitá možnost regulace otáček. Ty lze u asynchronních motorů regulovat pomocí elektrického napětí nebo změnou frekvence. Vhodnějším a přesnějším způsobem je řízení pomocí změny frekvence, které je možné realizovat za pomoci frekvenčního měniče.

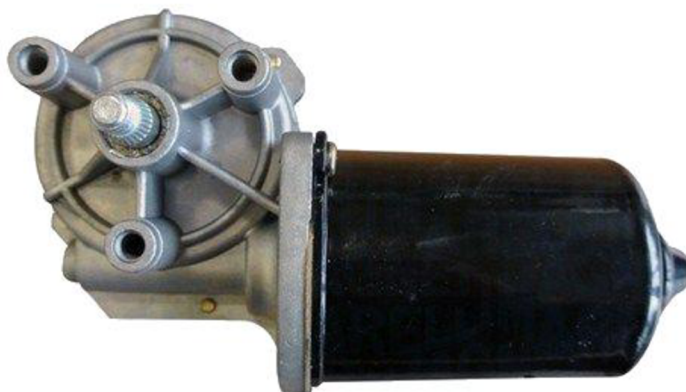
Tabulka 3.1 Štítek motoru Siemens 1LA7060-4AB11

Parametr	Hodnota
Výkon (kw)	0,12
Otáčky (ot.min^{-1})	1350
Počet pólů (pól)	4
Krytí	IP55
Třída izolace	F
Základní napětí (V)	400Y/230D 50Hz, 460Y 60Hz
Jmenovitý vstupní proud (A)	0,42/0,73
Hmotnost (kg)	3,6

S ohledem na výše zmíněné nevýhody byl zvolen 12 V stejnosměrný motor Magneti Marelli. Pořizovací náklady byly nulové, neboť se jedná o motor využívaný pro pohon stěračů v automobilech a byl demontován z vraku dodávky. Všeobecně mají motory využívané v těchto autech zvýšený točivý moment, a to z důvodu rozsáhlejší plochy pro stírání. Převod zajišťuje planetová převodovka. Přesné specifikace jsou nedohledatelné, ale dá se předpokládat, že motor disponuje točivým momentem v jednotkách Nm a převodovým poměrem $\sim 1:40$.

Řízení otáček u stejnosměrného motorů bylo realizováno pomocí pulzně šířkové modulace tzv. PWM. Ta funguje na principu cyklicky se opakujících impulzů, které

mění hodnotu signálu z maximální na minimální v různých časových intervalech k řízení výkonu výstupního zařízení. Rychlost otáček lze regulovat také za pomoci změny elektrického napětí. Obdobně jako u motorů asynchronních je tento typ regulace nevhodný, neboť se snižuje celkový výkon a přesnost regulace. Z těchto důvodů byl zvolen PWM regulátor konstruovaný na napětí 9-60 V. Stejnoseměrný motor Magnetti Marelli je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Stejnoseměrný motor Magnetti Marelli

3.2 Stejnoseměrný napájecí zdroj

Pro minimalizaci nákladů byl zvolen počítačový ATX zdroj Eurocase (obrázek 3.2). Na výrobních štítkách zdrojů jsou vždy uvedené veškeré elektrické veličiny, včetně elektrických proudů v jednotlivých větvích. Použitý zdroj je schopen dodávat proud až 14 A při napětí 12 V. K napájení motoru jsou tyto hodnoty naprosto dostačující.



Obrázek 3.2: ATX zdroj

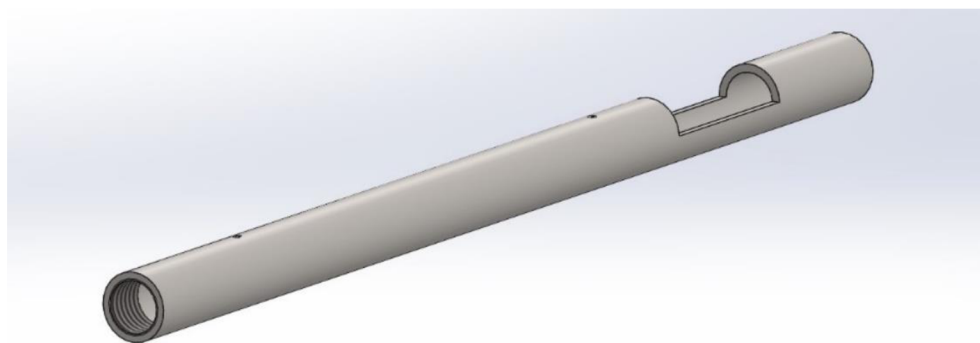
Zdroj bylo nutné upravit pro schopnost sepnutí i bez připojení k základní desce. Zapojení se může u jednotlivých výrobců lišit a přesné schéma vnitřních obvodů je možné dohledat na webových stránkách výrobce.

K získání dobrého přístupu k elektronice uvnitř bylo nutné nejprve sejmout kryt. Následně byly odřezány koncovky kabelů určené pro napájení veškerých komponentů v počítači. Pro lepší přehlednost byly z vnitřního zapojení odpájeny také přebytečné vodiče. Pro sepnutí 12 V větve byl zelený vodič spojen s pinem nuly. Při úpravách bylo nutné dbát na zvýšenou opatrnost, ve vnitřních obvodech se při zapojení do sítě vyskytuje napětí 230 V.

3.3 Komora extruderu

Pro konstrukci komory extruderu bylo možné využít buď odpadní odřezek ocelové bezešvé trubky, anebo trubky vyrobené z hliníkové slitiny. Ačkoliv slitina hliníku se vyznačuje řadou podstatných výhod jako je dobrá tepelná vodivost, obrábělnost či hmotnost, nakonec byla zvolena ocelová trubka. Volba materiálu je zdůvodněna zejména možností vzniku otěrových částic v komoře vlivem otáčení šneku.

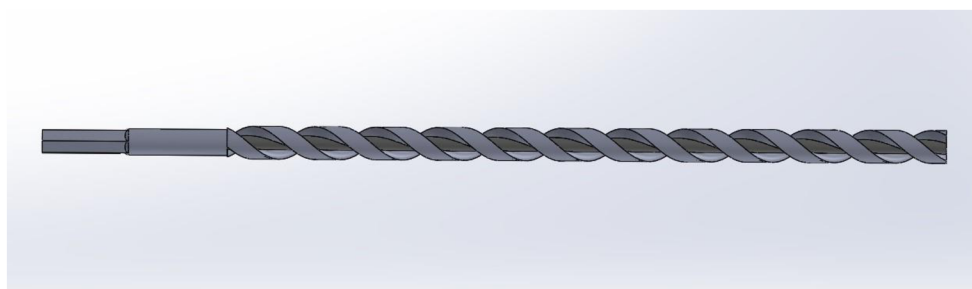
Na ocelová trubce o rozměrech 21 x 2,5 mm a délce 380 mm byl vysoustružen otvor 48 x 16 mm pro přívod materiálu určeného k extrudaci. Na jednom konci je závit M18 pro natočení trysky. Důlčíky na vrchní straně komory jsou určeny pro zafixování rotace. Pro tvorbu pelet byla na spodní hraně extruzní komory vyvrtána díra o rozměru 3 mm, kudy bude materiál vytlačován. Každá otáčka hadovitěho vrtáku by měla způsobit seříznutí vytlačovaného materiálu na peletu. Je nutné otestovat správný poměr otáček a teploty, aby vysoká smáčivost materiálu nezpůsobila vykapávání, nebo naopak neucpávala komoru. Model komory extruderu je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Model komory extruderu

3.4 Šnek extrudéru

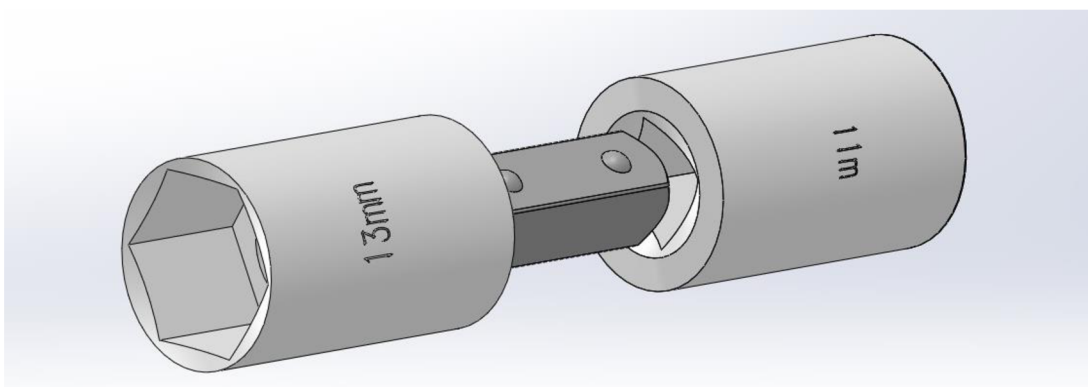
Ideální volbou pro tvorbu extrudéru by byl speciálně navržený šnek, který je využíván v průmyslových strojích. Takový šnek je rozdělen do několika sekcí – vstupní, kompresní a výstupní a každá zóna má jiný rozměr jádra a závitu. Při poptávce byl šnek potřebných parametrů naceněn na několik tisíc korun. Jako cenově dostupnější náhrada za třízónový šnek byl použit hadovitý vrták do dřeva vyrobený z nástrojové oceli o rozměrech 16 x 380 mm. Samostředící hrot bylo nutné pomocí úhlové brusky seříznout. Model vrtáku je na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Model vrtáku

3.5 Spojka

Vhodným návrhem bylo vysoustružit hřídel motoru a šestihrannou koncovku vrtáku, použitého namísto šneku na stejný průměr a použít pružnou spojku. To by znamenalo motor rozebrat a vyrobit novou vývodovou hřídel, která by se v planetové převodovce nahradila za původní. Nástrojová ocel, ze které je vyrobený vrták se náročně obrábí, a proto bylo nutné vymyslet jednodušší řešení, které je zobrazeno na obrázku 3.5.



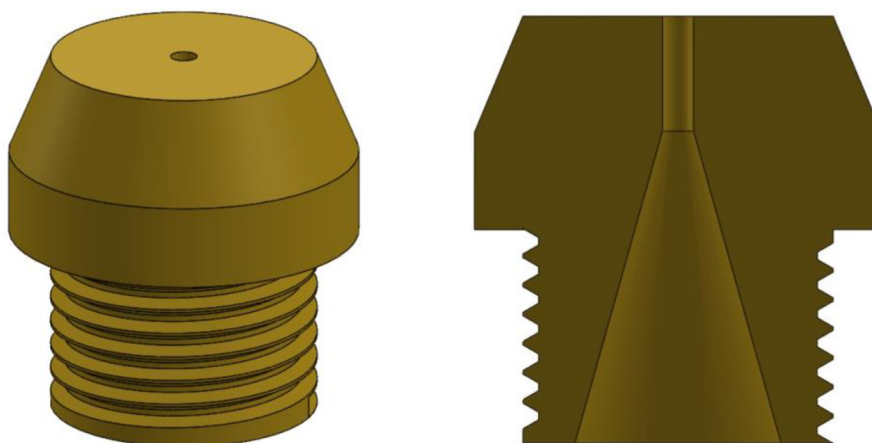
Obrázek 3.5: Model sestavy spojky

Vývodová hřídel šnekové převodovky má délku 30 mm a je na ní závit M8. Na závit byla natočena spojovací matice závitových tyčí M8. Matice má tvar šestihranu, na který pasuje nástrčný klíč velikosti 13 mm. Vrták je upínán pomocí šestihranu, který odpovídá nástrčnému klíči velikosti 11 mm. Spojení ořechů je realizováno pomocí unifikovaného čtvrtcoulového čtyřhranu, který je běžně dostupný v prodejnách náradí.

Vrták je konstruovaný tak, aby se otáčel směrem doprava a odváděl odebíraný materiál směrem od vrtaného otvoru. V tomto případě je záměrem přivádět materiál přes topnou zónu směrem k trysce. Z tohoto důvodu je motor polovaný tak, aby hřídel otáčel směrem doleva. Levotočivý pohyb vrtáku by při zatížení vyvolal sílu, která by působila ve směru povolování matice na hřídeli motoru. Zabránění vytáčení matice bylo realizováno pomocí dvou svarů.

3.6 Tryska extrudéru

K uzavření komory extrudéru bylo navrženo mosazné víčko (obrázek 3.6), které slouží jako zátka a je závitem M18 upevněno k extruzní komoře. V případě, že by stroj byl využíván k výrobě filamentu, je na víčku vyražen důlčík pro navrtání otvoru, který by sloužil jako tryska. Mosaz se pro extruzi vlákna využívá i v 3D tiskárnách, zejména pro její dobrou tepelnou vodivost. Pro případné vrtání je doporučeno využít stupňovitý vrták pro zajištění kónického tvaru viz obrázek 3.6.



Obrázek 3.6: Náhled trysky (vlevo boční pohled, vpravo řez tryskou)

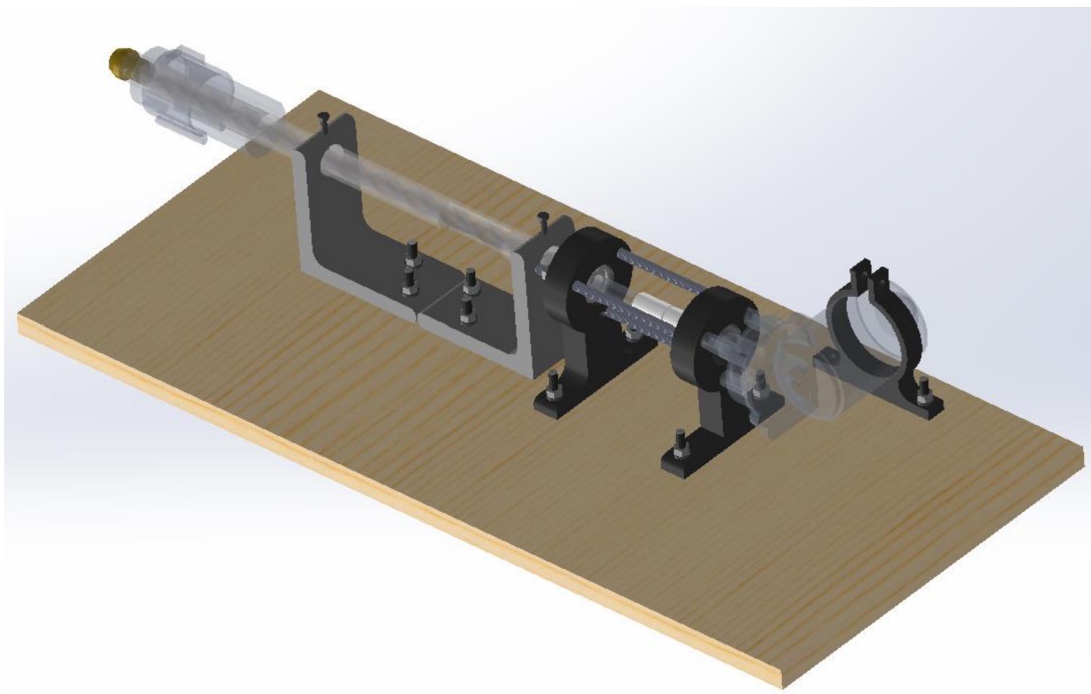
3.7 Základna pro uložení stroje

Koncepční návrh základny byl považován za klíčový faktor při sestavování celého přístroje. Plánem bylo navrhnout základnu tak, aby veškeré elektrické přístroje a ovládací prvky bylo možné schovat pod desku. Toto řešení by však bylo náročné na obsluhu v případě demontáže, výměně či čištění.

Deska, na které je celý přístroj včetně ovládacích prvků uložený byla navržena z překližkové desky o tloušťce 18 mm. Na desce bylo pro sjednocenost použito pozinkovaných šestihranných šroubů o velikosti M6 x 35 mm, které jsou připevněny ze spodní strany desky pro lepší přístupnost k maticím.

3.7.1 Uložení extruzní komory

Z podniku zpracovávající hutní materiál byly poskytnuty odřezky železných úhelníků. Do nich jsou vyvrtány otvory o průměru 22 mm. Pro zachování souososti vložené extrudační komory bylo nutné vrtat držáky ve společném upnutí. Z horní strany jsou vyvrtány díry se závitem M4 pro fixaci extruzní komory. Držáky pro připevnění komponent na základnu jsou znázorněny na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Držáky pro připevnění komponentů extrudéru na desku

3.7.2 Uložení pohonu

Aby bylo dosaženo souososti vrtáku s extruzní komorou, bylo na 3D tiskárně vytisknuto pouzdro pro kuličková ložiska z materiálu Prusament PLA. Pevně upevněná ložiska zabraňují vzniku radiálních sil, které by mohli způsobit vznik vibrací, nebo nadměrnému otěru vrtáku o stěny komory. Kuličková ložiska v pouzdře zajišťují hladký a stabilní pohyb, což přispívá ke spolehlivé funkci

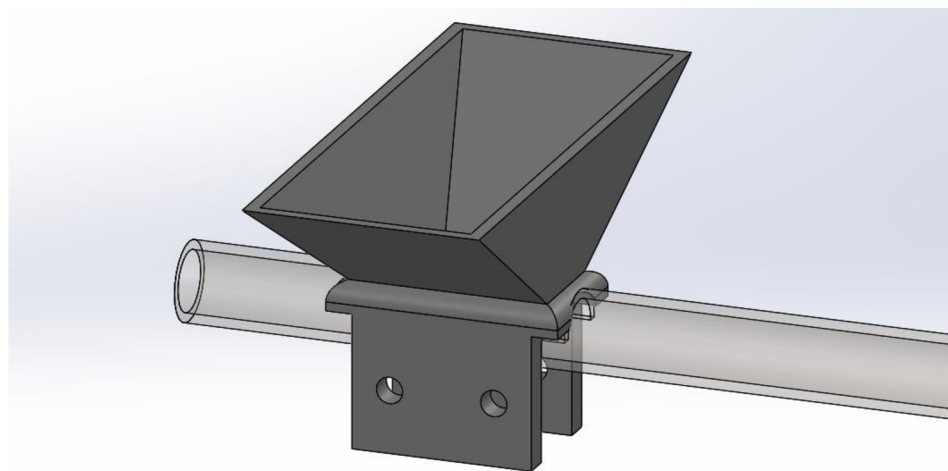
Stejně jako pouzdro ložiska byl vytisknut i držák pro motor. Vlivem vytlačování materiálu by ve vrtáku vznikala axiální síla, která by se přes spojku a hřídel přenesla na motor.

Pro zvýšení pevnosti je držák motoru společně s pouzdem ložisek spojen závitovou tyčí a maticemi M6. Tento spoj zajišťuje snadné odpojení v případě, že by nastala závada a bylo by nutné motor odpojit.

Na obrázku 3.7 můžeme vidět kompletní uložení pohonu, včetně podpěry fixující motor.

3.8 Násypka

Přívod směsi materiálů k extrudaci byl realizován pomocí násypky (obrázek 3.8) vytisknuté na 3D tiskárně z materiálu Prusament ASA, který má oproti PLA větší teplotní odolnost – až 93 °C. Přestože je tepelná vodivost oceli nízká, při delším nahřívání by se na dosedací ploše mohla vyskytnout teplota, která by násypku deformovala. Plnění komory probíhá pomocí gravitace – tzv. záplavové plnění.



Obrázek 3.8: Násypka připevněna na komoře extrudéru

3.9 Topná část

Vyráběný extrudér je navržený tak, aby byl schopný extrudovat termoplasty a kompozitní materiály s různými teplotami tavení. Teplota uvnitř extrudéru musí zajistit postupné tavení pro ideální viskozitu v celé jeho délce. Pro dosažení ideálních teplot byla navržena tepelná regulace.

3.9.1 Topná objímka

Výběr topné objímky byl závislý na skladové dostupnosti jednotlivých prodejců. Z velké většiny se jedná o zakázkovou výrobu, což se odráží v ceně i dlouhé dodací lhůtě. Poptáno bylo několik tuzemských výrobců, cena topného tělesa však byla několikanásobně vyšší než skladové kusy. Hlavním parametrem při výběru byl dostatečný výkon, neboť byl od Pedagogické fakulty JU zapůjčen PID regulátor pouze s jedním regulovatelným výstupem. Komponenta byla zakoupená u anglického výrobce a distributora elektrotechniky RS components.

Topné těleso pracuje na principu elektrického odporu. Disponuje výkonem 345 W a je schopné dosahovat teplot až 600 °C. Potřebné napájecí napětí je 230 V. Slídová izolace zajišťuje ochranu proti úrazu elektrickým proudem, či ochranu proti vlhkosti. Cenově přijatelné objímky s vyšším výkonem jsou vyráběny jen ve větších rozměrech, než je vnější průměr trubky.

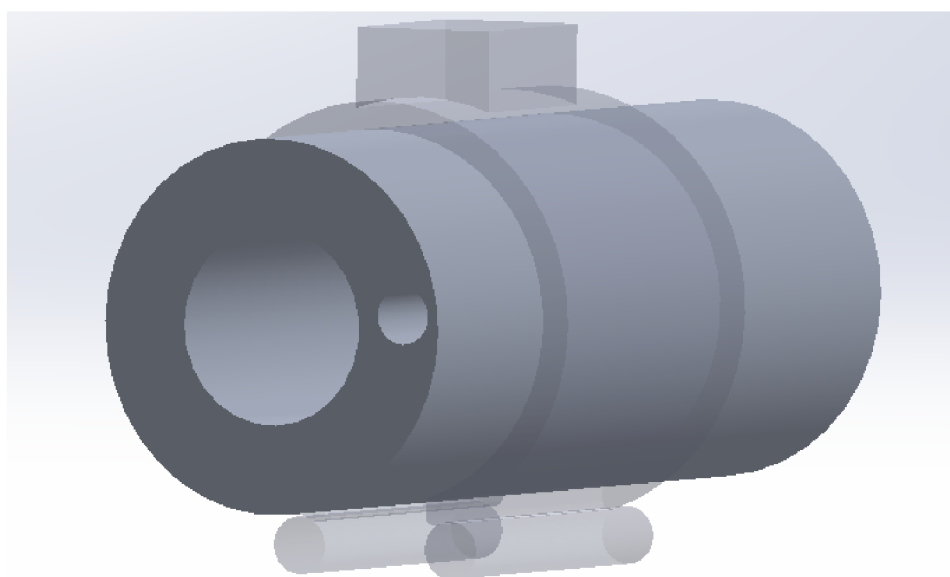


Obrázek 3.9: Topná objímka (RS Online, 2023).

3.9.2 Redukce topné objímky

Průměr topné objímky je podstatně větší, než je průměr ocelové trubky. Bylo tedy nutné vyrobit redukci, která spolehlivě předá teplo až do extruzní komory. Model redukce je na obrázku 3.10.

Z odřezku hliníkové trubky o průměru 40 mm byl pomocí soustruhu vypíchnut otvor, do kterého je nasunuta topná sekce komory. Výhodou hliníkové redukce je dobrá tepelná vodivost a teplotní soudržnost. Délka redukce je úmyslně delší než topné těleso z důvodu lepšího prohřátí materiálu uvnitř komory. Do čela redukce byla vyvrtána díra o průměru 7 mm, která slouží jako uložení pro snímač teploty.



Obrázek 3.10: Model redukce topného tělesa

3.9.3 PID regulátor

PID regulátor byl dodán vedoucím práce. Jednalo se o regulátor HT60B (obrázek 3.11) s označím TA-RR-000. Toto zařízení, zajišťující automatizovanou regulaci teploty na konstantní hodnotu. Porovnává měřící signál s požadovaným stavem a spíná integrované relé. Regulátor má jeden vstup pro teplotní čidlo a výstup s elektromechanickým relé.



Obrázek 3.11: PID regulátor HT60B (HTH8, 2023).

3.9.4 Odporový snímač teploty

K PID regulátoru byl dodán i čtyř vodičový odporový snímač teploty PT100, který se hojně využívá pro měření teplot. Je vyroben z platiny, která zajišťuje velice rychlou a přesnou odezvu. Vodiče snímače jsou obaleny teflonovou tkaninou. Ta zabraňuje poškození vodičů při vysokých teplotách. Umístěn byl do otvoru v hliníkové redukci topné objímky.

Odporový snímač (obrázek 3.12) byl dodán vedoucím práce. Původní navrhovanou součástí pro měření teplot byl termočlánek typu J s teplotním rozsahem $-210\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jeho cena je nižší a měřící přesnost $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ je pro tento přístroj dostačující.



Obrázek 3.12: Odporový snímač teploty

3.9.5 Tepelná izolace

Topné těleso bylo společně s redukcí obaleno nehořlavou vatou, která se využívá ve stavebnictví pro tepelnou izolaci komínů. Její schopnost je odolávat teplotám až 600 °C a společně s hliníkovou páskou zajišťují, aby efektivita topného tělesa byla co největší a nevznikali tepelné ztráty. Zároveň chrání před možným popálením při obsluze extrudéru.

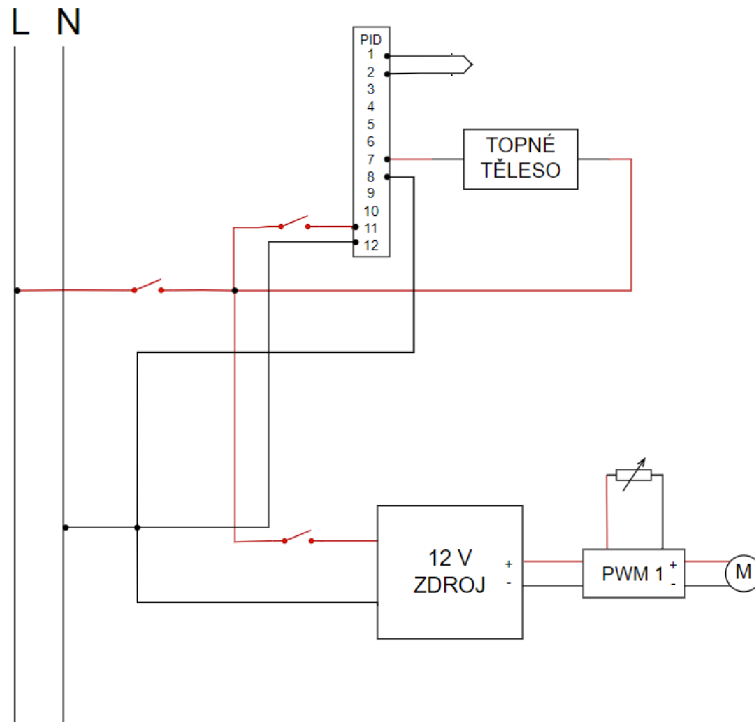


Obrázek 3.13 Fotografie izolace topného článku

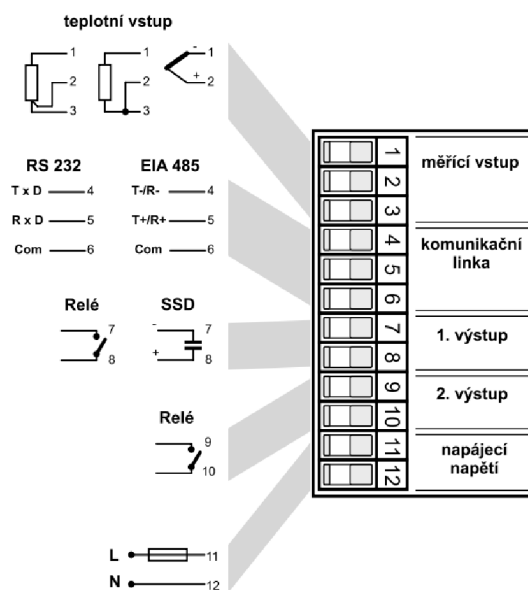
3.10 Elektrotechnické zapojení

Regulátor má vstup pro dvojvodičové nebo čtyrvodičové zapojení, přičemž odporový snímač má čtyrvodičové provedení, tudíž bylo nutné řešit zapojení s elektrikářem pro správné zapojení a měření reálných hodnot.

Na obrázku 3.14 je ze schématu patrné, že topné těleso je zapojeno do sítě sériově s výstupem PID regulátoru. V regulátoru mezi výstupem 7 a 8 je galvanicky oddělené elektromagnetické relé, které spíná dle nastavené teplotní hodnoty viz. obrázek 3.15.



Obrázek 3.14: Elektrotechnické schéma zapojení extrudéru

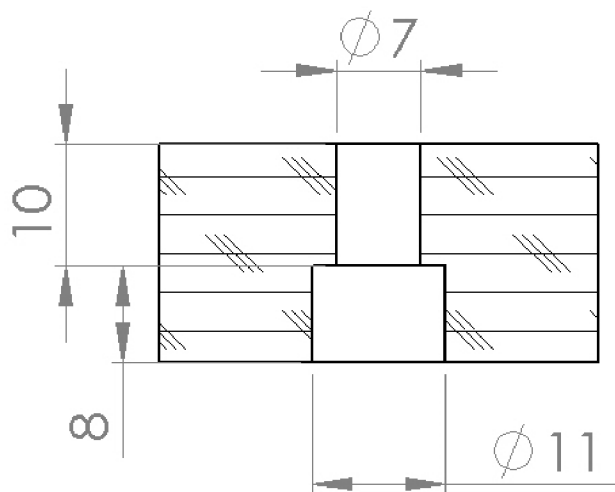


Obrázek 3.15: Detail svorkovnice PID regulátoru (HTH8, 2023).

3.11 Sestava jednotlivých komponent

Při skládání komponent nastal problém při snaze vložit vrták do extruzní komory. Zakoupený vrták nebyl souosý v celé své délce a bylo nutné ho upnout do soustruhu a pomocí brusného papíru zbrusit, aby jej bylo možné vložit do komory bez velkého třecího odporu.

Z obrázku 3.7 je patrné, že veškeré komponenty byly k desce připevněny pomocí šestihranných šroubů M6 x 35 mm, pro které byly vrtány díry o průměru 7 mm, které se následně převrtávaly na 11 mm do hloubky 8 mm pro fixaci šestihranných šroubů. Na obrázku 3.16 je znázorněn řez deskou.

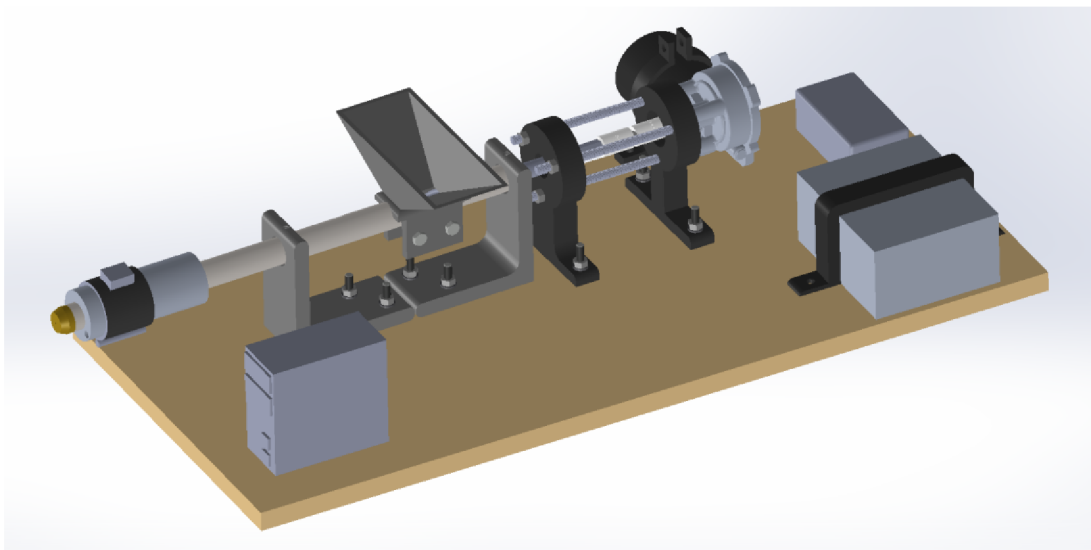


Obrázek 3.16: Řez dírou pro šroub na základně extrudéru

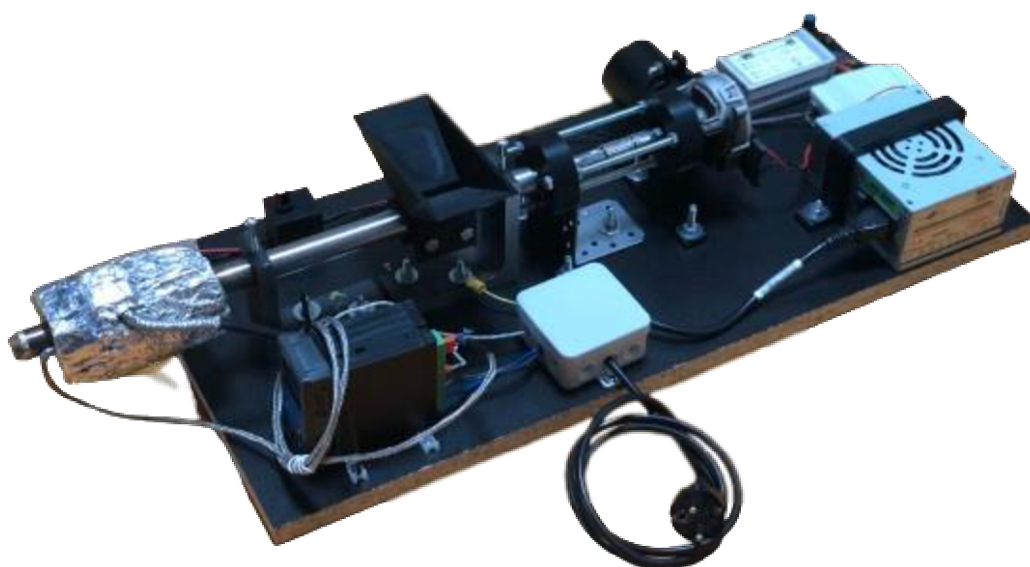
Pro zajištění bezpečnosti a bezporuchovosti elektrické části extruderu byly na desku instalovány elektrikářské montážní krabičky, do kterých byly vloženy Wago svorky s vodiči. Elektrické vodiče byly pomocí pájecí pistole přiletovány k elektrickým vstupům jednotlivých přístrojů.

PWM regulace motoru je ovládaná pomocí lineárního potenciometru, pro který byl na 3D tiskárně vytisknut fixační držák, který je k desce přidělány samořeznými vruty.

Na obrázku 3.17 a 3.18 je možné porovnat modelu oproti fotografii zhotoveného stroje.



Obrázek 3.17 : 3D model sestavy celého přístroje



Obrázek 3.18: Fotografie zhotoveného extrudéru

3.12 Cenová sumarizace

V tabulce jsou uvedené celkové náklady na sestavení extrudéru. Položky s nulovou cenou byly obstarány zdarma. Ceny uvedené v závorkách jsou předpokládané ceny v případě nákupu.

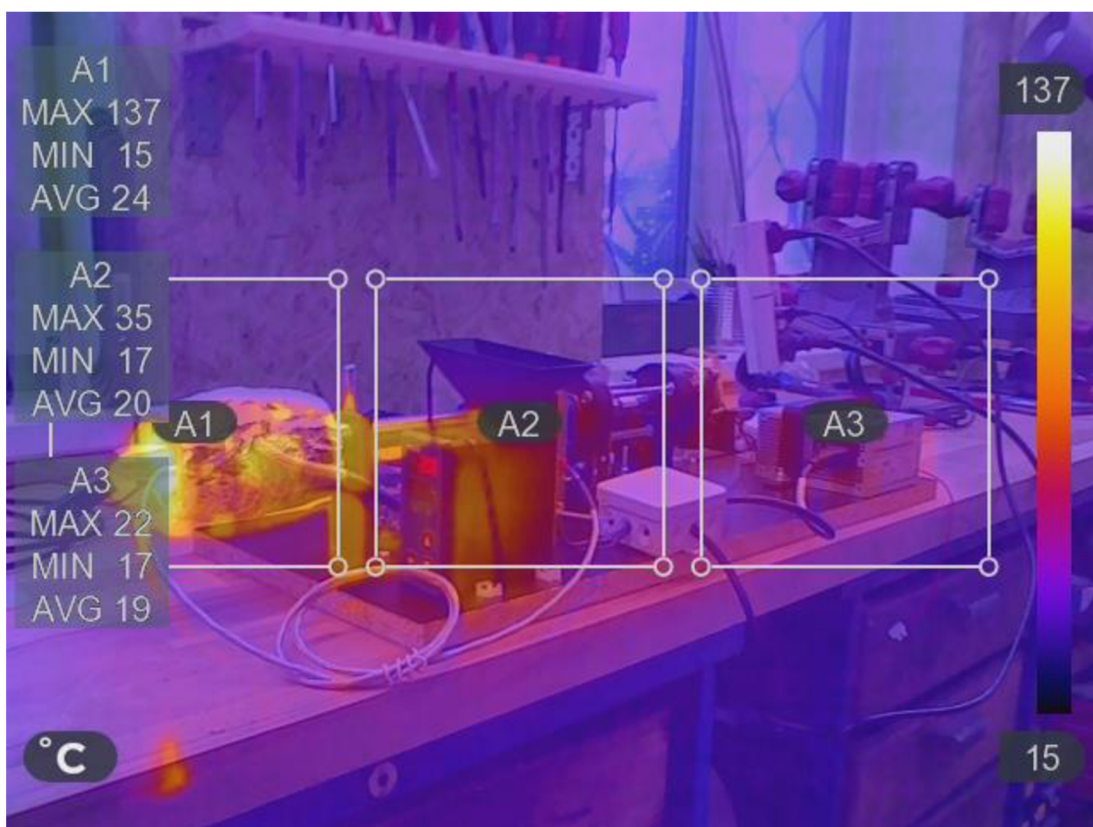
Tabulka 3.2: Cena použitého materiálu

Položka	Použití	Cena s DPH [Kč]
Bezešvá trubka 21 x 2,5 mm	Komora extrudéru	~ 120
Filament PLA	Uložení motoru	~ 70
Filament ASA	Násypka	~ 50
Spojovací materiál	Uchycení	~ 150
Elektromateriál	Řízení a napájení stroje	~ 200
Topná objímka	Topná část stroje	830
Mosazná tyč	Tryska extrudéru	180
Vrták 16 mm	Šnek extrudéru	130
PWM regulátor	Regulace otáček motoru	140
Hliníková tyč	Redukce topné objímky	50
ATX zdroj	Napájení motoru	0 (~ 100)
Překližková deska	Základna	0 (~ 60)
Skelná vata + páska	Izolace topné objímky	0 (~ 30)
Úhelníky	Podpěra komory extrudéru	0 (~ 150)
12 V motor	Pohon šneku	0 (~ 800)
PID + snímač	Regulace teploty	zapůjčeno
Celkem		~1920 (3060)

4 Testování extrudačního zařízení

4.1 První test zařízení

Při prvním testování byla testována celková funkčnost přístroje. Po zapojení přístroje do sítě byl zapnut PID regulátor, na kterém byla nastavena teplota 220 °C. Po přepnutí kolébkového spínače na zdroji byl zprovozněn i motor a pomocí PWM regulace se přístroj roztočil naprázdno. Na obrázku 4.1 je snímek z termokamery, kde je možné sledovat teploty ve třech různých zónách při nahřívání extruderu.



Obrázek 4.1: Snímek extrudéru z termokamery

Po dosažení nastavené teploty byla násypka naplněná peletami PLA o rozměru 3 x 3 mm. Použitá velikost pelet byla nevhodná, jelikož se jednotlivé pelety na hraně mezi extruzní komorou a hranou vrtáku začaly zasekávat. Zaseknutá peleta je zachycen na obrázku 4.2. Zasekávání pelet způsobilo prohýbání celého motorového uložení, zpříčení vrtáku a neplynulý pohyb motoru.



Obrázek 4.2: Zaseknutá peleta při demontáži násypky

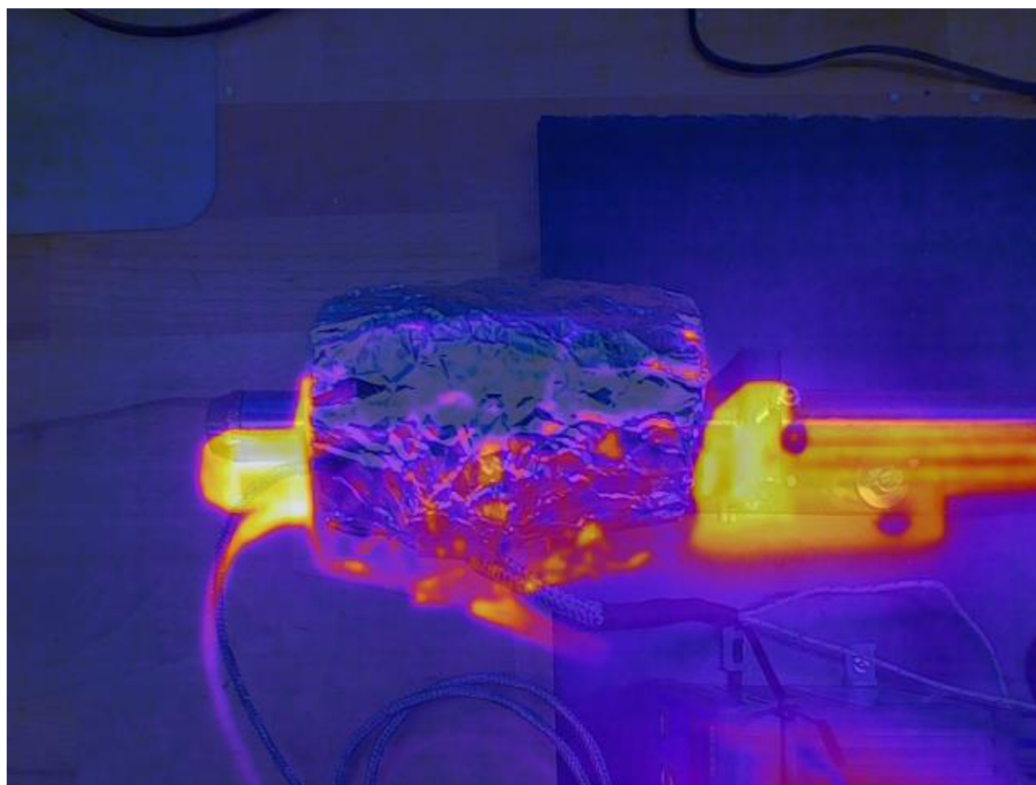
I přes zmíněné problémy bylo možné testovat chování extrudéru při různých teplotách a rychlosti otáčení vrtáku. Po několika vteřinách pelety PLA doputovaly do topné zóny, kde se úspěšně nahřály na dostatečnou teplotu a v podobě struny byly vytlačovány ven. Prvních pár centimetrů byla struna zanesena kovovým prachem, který v komoře zbyl po opravě.

Z obrázku 4.3 je patrné, že předpoklad, že se materiál bude vlivem otáčení vrtáku stříhat na pelety byl mylný. Přestože struna projevovala známky stříhu, nebyla zcela oddělena ani při nižších teplotách. Při měření vytlačené struny bylo zjištěno, že průměr je podstatně větší, než je požadovaný pro zpracování druhým extrudérem.



Obrázek 4.3: Struna vznikající při prvním testování přístroje

V průběhu prvního testu byla také sledována funkčnost tepelné izolace. Záběr z termokamery na obrázku 4.4 ukazuje, že tepelná izolace extruderu je funkční.



Obrázek 4.4: Snímek tepelné izolace z termokamery

4.1.1 Konstrukční úpravy

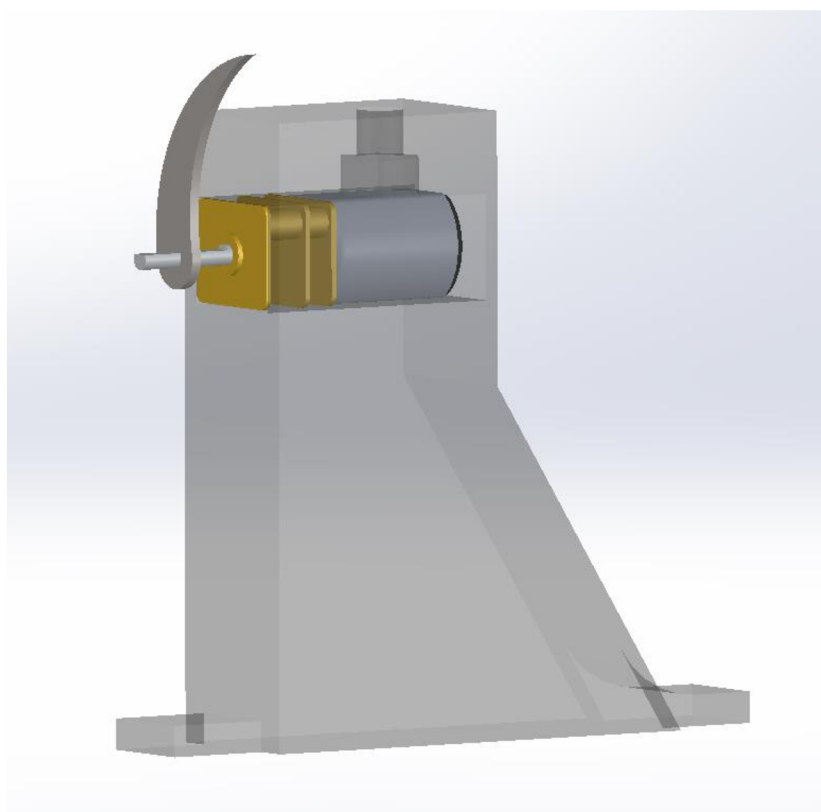
Zmíněné nedostatky bylo nutné před druhým testem opravit, avšak bez zásadnější změny konceptu. Po doporučení vedoucího diplomové práce byla navržena nová násypka na pelety. Ta byla oproti první verzi upravena ve spodní části, a to tím způsobem, že přísun pelet probíhal jen na jedné polovině otvoru v komoře. Zamezilo se tak nadměrnému dávkování. Hrana vrtáku byla společně s extruzní komorou v místě stříhu pelet zabroušena, aby nedocházelo ke stříhání pelet.

Pro zabránění prohýbání a spolehlivější upevnění motoru byl za držák ložiska připevněn pozinkovaný železný L profil o rozměrech 70 x 70 x 2 mm, který eliminuje axiální síly působící na hřídel motoru.

Po zjištění, že vrták materiál nedělí byla původní díra na spodní straně komory extruderu vyplněna svarem a přeteklý kořen svaru zabroušen. Do mosazné trysky byla vyvrtána díra o průměru 1,5 mm dle obrázku 3.6.

Pro dělení struny na pelety bylo navrženo přídavné zařízení, které je navrženo, jako rotující břitva upevněna na 12 V motoru, který pochází z nefunkčního RC modelu auta. Počet otáček je přímo úměrný uříznuté délce pelety a pro testování je třeba otáčky regulovat. Napájení bylo vyvedeno ze stejného zdroje jako pro pohon vrtáku.

Držák motoru byl vytisknutý na 3D tiskárně a obrázku 4.5 je zobrazen model držáku.



Obrázek 4.5: Držák motoru pro řezání pelet

4.2 Druhý test zařízení

Při druhém testu se konstrukční opravy extrudéru ukázaly jako funkční a bylo možné provést plnohodnotné testy pro různé poměry výkonu otáček a teploty. Návrh řezáku na pelety však nefungoval dle očekávání. Materiál se pro velkou viskozitu lepil na zátku a břitvu řezáku a byl proto v průběhu testu demontován.

PLA byly pro každý test pomocí digitální váhy odváženy po 50 g. Testování proběhlo při třech různých teplotách 200 °C, 220 °C a 250°C. Ve všech třech variantách teplot byly nastaveny otáčky na 30 ot.min⁻¹ při chodu na prázdno, neboť při nižších otáčkách po naplnění násypky docházelo k úplnému zastavení otáčení vrtáku

vlivem nedostatečného výkonu motoru. Po dobu testu začaly otáčky stoupat a klesat na hodnoty v rozmezí 10-15 ot.min⁻¹.

Na obrázku 4.6 je zachycen druhý test extrudace filamentu při teplotě 200 °C, která se jevila jako nejvhodnější. Vlákno se extrudovalo po dobu celého testu plynule.



Obrázek 4.6: Druhý test extrudace

Výsledkem druhého testu je filament na obrázku 4.7, který byl extrudován při teplotě 200 °C. Při měření průměru filamentu byly naměřeny hodnoty, které se v délce 5 m lišily o $\pm 0,3$ mm.



Obrázek 4.7: Vyrobený filament

Na obrázku 4.8 je zobrazen vrták společně s komorou extrudéru, který byl po kompletním vychladnutí stroje vytažen. K vytažení je zapotřebí povolit dva šrouby na držáku a odšroubovat čelní trysku. Zbytek materiálu, který nebyl vytlačen lze snadno odstranit a připravit tak stroj na další použití.



Obrázek 4.8: Demontovaný vrták a komora extrudéru

5 Diskuze

Po prvním testování vyšlo najevo několik nedostatků konstrukčního návrhu. Nedostatky byly operativně odstraněny změnou návrhu násypky a zabroušením stykových hran vrtáku a komory extrudéru. Ideálním řešením by bylo změnit koncept na vertikální variantu a plnit komoru peletami z konce extrudační komory.

Další problém nastal při snaze dělit materiál na pelety přímo na trysce extrudéru. Tryska při chodu zařízení dosahuje vysokých teplot a materiál nestíhá chladnout. Problém nebyl odstraněn ani přidáním rotující břitvy, jelikož vlivem nízké viskozity materiálu dochází k jeho rozmazávání po jejím ostří. Řešením by mohlo být dodatečné chlazení struny. Například společnost Filabot, která se zabývá výrobou profesionálních extrudérů nabízí přístroj určeným pro peletizaci společně s chladicí stanicí na principu proudění vzduchu (Filabot, 2023). Společnost Wellzoom nabízí obdobnou chladicí stanicí, kde je filament chlazen ve vodní lázni (Wellzoom, 2023). K sestrojení vlastní chladicí stanice by bylo možno využít například ventilátoru. Stroj k peletizaci se skládá z komponent náročné na výrobu a podstatně by zvýšil náklady na výrobu soustrojí. Pro výzkumný experiment bude pro dělení materiálu využito drtiče.

Náklady na výrobu stoje byly ~1920 Kč. Celkovou cenu však snížila možnost zapůjčení PID regulátoru teploty. V porovnání s komerčně dostupnými extrudéry je cena podstatně nižší. Například přístroj Wellzoom desktop filament extruder B se prodává za 588 USD (zhruba 12460 Kč), přičemž jde o jednoho z nejlevnějších výrobců (Wellzoom, 2023). Výhodou vyrobeného stroje, oproti komerčním extrudérům jako například Exo struder, který je dostupný na fakultě, je také nenáročný servis. Sestrojený extrudér je možné využívat i případech, kde hrozí poškození některých z komponent. Veškeré části stoje je možné nahradit a v případě zablokování extrudační komory i snadno vyčistit. Cena náhradních dílů je zároveň velmi nízká.

Hlavním nedostatkem stoje je nízký výkon motoru, který způsobuje kolísání a nepřesnou regulaci otáček. Tento problém je možný vyřešit výměnou za silnější motor, nebo přidáním externího převodu na výstupní hřídeli.

V případě vyřešení problému s pohonem by se v budoucnu mohl stroj doplnit o navíjecí zařízení na filament. Pro správnou funkčnost je nutné navíjecí zařízení navrhnout tak, aby k navíjení docházelo postupně v celé délce filamentu.

Závěr

Literární rešerše diplomové práce shrnuje dosavadní poznatky o 3D tisku, zejména pak o technologii zvané Fused Deposition Modeling. Tato technologie využívá řadu materiálů, které jsou dodávány ve formě tiskové struny – filamentu. Vzhledem k rapidnímu rozvoji 3D tisku je kladen stále vyšší důraz na biodegradabilitu, recyklovatelnost a celkovou ekologickou nezávadnost materiálů. Za příklad hojně využívaného biodegradabilního materiálu je uváděna například kyselina polymlečná (PLA), která je v oblasti 3D tisku poměrně rozšířena.

Cílem diplomové práce bylo konstrukčně navrhnout a následně sestrojít zařízení pro extruzi kompozitních materiálů určených pro aditivní výrobu. Základními požadavky na přístroj byly minimální náklady, jednoduchá možnost výměny či náhrady komponent, snadná obsluha i manipulace a bezpečnost. Funkčnost zařízení byla ověřena prostřednictvím provedení testu funkčnosti. Během testu funkčnosti byly použity pelety PLA.

Ačkoliv bylo během prvního testování přístroje odhaleno několik nedostatků, po jejich odstranění a lehké úpravě konstrukčního návrhu se podařilo vyrobit funkční stroj. Nespornou výhodou vyrobeného stroje jsou minimální náklady na výrobu, nenáročný servis a dostupnost náhradních dílů. Stroj je navíc možné poměrně jednoduše modifikovat dle aktuálních požadavků.

I přes zmíněné nedostatky je stroj připravený pro experimentální testování výroby kompozitní směsi kyseliny polymlečné a přírodních vláken. Odchylka průměru extrudovaného filamentu je v případě drcení a přípravy směsi pro profesionální extrudér zanedbatelná.

Seznam použité literatury

- 3devo. (2023). *Shop Now - Filament Maker, GP20 Plastic Shredder, and More* | 3devo. <https://www.3devo.com/shop>
- 3D Struna. (2023). *EXO extrudér - 3D struna*. <https://www.3dstruna.cz/exo-extruder/>
- Agrawaal, H., & Thompson, J. E. (2021). Additive manufacturing (3D printing) for analytical chemistry. *Talanta Open*, 3, 100036. <https://doi.org/10.1016/J.TALO.2021.100036>
- Apricia Pharmaceuticals, L. (2022). *Making Medicine Using 3D Printing - SPRITAM*® (*levetiracetam*). <https://spritam.com/making-medicine-using-3d-printing/>
- Ausperger, A. (2015). *Technologie zpracování plastů*. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
- Awasthi, P., & Banerjee, S. S. (2021). Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities. *Additive Manufacturing*, 46, 102177. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.102177>
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(1–4), 389–405. <https://doi.org/10.1007/S00170-015-7576-2/METRICS>
- BOCO Pardubice. (2023). *Extruzní linka na výrobu strun - filamentu pro 3D tiskárny, svařovacích drátů, strun pro zahradní techniku. Jednošnekový extruder*. <https://www.boco.cz/extruzni-linka-na-vyrobu-strun>
- Crump, S. S. (1992). *Patent Number 5 121 329: Apparatus and method for creating three-dimensional objects*.
- Cuiffo, M. A., Snyder, J., Elliott, A. M., Romero, N., Kannan, S., & Halada, G. P. (2017). Impact of the fused deposition (FDM) printing process on polylactic acid (PLA) chemistry and structure. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/app7060579>
- Černý, P. (2017). *Plazmochemické úpravy za účelem funkcionalizace povrchu. Disertační práce*. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
- Derakhshanfard, F., & Mehralizadeh, Amir. (2020). Characterization of polyethylene terephthalate wastes/ Acrylonitril-Butadiene styrene (PETW/ABS) composites with applications of artificial neural networks. *SN Applied Sciences*, 2(1730). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03546-9>
-

-
- Enumo, A., Gross, I. P., Saatkamp, R. H., Pires, A. T. N., & Parize, A. L. (2020). Evaluation of mechanical, thermal and morphological properties of PLA films plasticized with maleic acid and its propyl ester derivatives. *Polymer Testing*, 88, 106552. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2020.106552>
- Filabot. (2023). *Filament Maker - Recycle Filament for Any 3D Printer – Filabot*. <https://www.filabot.com/>
- Filastruder. (2023). *Filastruder Kit*. <https://www.filastruder.com/collections/filastruders-accessories/products/filastruder-kit?variant=323882043>
- HTH8. (2023). *Ht60B - Jednoduchý PID regulátor*. <https://www.hth8.cz/cs/41-pid-regulatory/8-ht60b.html>
- Hwang, S., Reyes, E. I., Moon, K. sik, Rumpf, R. C., & Kim, N. S. (2015). Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process. *Journal of Electronic Materials*, 44(3), 771–777. <https://doi.org/10.1007/S11664-014-3425-6/METRICS>
- Ilyas, R. A., Zuhri, M. Y. M., Aisyah, H. A., Asyraf, M. R. M., Hassan, S. A., Zainudin, E. S., Sapuan, S. M., Sharma, S., Bangar, S. P., Jumaidin, R., Nawab, Y., Faudzi, A. A. M., Abrial, H., Asrofi, M., Syafri, E., & Sari, N. H. (2022). Natural Fiber-Reinforced Polylactic Acid, Polylactic Acid Blends and Their Composites for Advanced Applications. In *Polymers* (Roč. 14, Číslo 1). <https://doi.org/10.3390/polym14010202>
- Isakov, D. V., Lei, Q., Castles, F., Stevens, C. J., Grovenor, C. R. M., & Grant, P. S. (2016). 3D printed anisotropic dielectric composite with meta-material features. *Materials & Design*, 93, 423–430. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.12.176>
- Jasveer, S., & Jianbin, X. (2018). Comparison of Different Types of 3D Printing Technologies. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 8(4). <https://doi.org/10.29322/IJSRP.8.4.2018.p7602>
- Koh, J. J., Zhang, X., & He, C. (2018). Fully biodegradable Poly(lactic acid)/Starch blends: A review of toughening strategies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 99–113. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2017.12.048>
-

-
- Kováčová, M., Kozakovičová, J., Procházka, M., Janigová, I., Vysopal, M., Černičková, I., Krajčovič, J., & Špitalský, Z. (2020). Novel hybrid PETG composites for 3D printing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/app10093062>
- Lee, J. (2021). A 3d food printing process for the new normal era: A review. In *Processes* (Roč. 9, Číslo 9). <https://doi.org/10.3390/pr9091495>
- Liu, Z., Zhao, D., Wang, P., Yan, M., Yang, C., Chen, Z., Lu, J., & Lu, Z. (2022). Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control. *Journal of Materials Science & Technology*, 100, 224–236. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2021.06.011>
- Mazurchevici, A. D., Nedelcu, D., & Popa, R. (2020). Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 27(2), 179–192. <https://doi.org/10.56042/IJEMS.V27I2.45920>
- Mount, E. M. (2011). Extrusion Processes. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, 227–266. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10015-7>
- Mwema, F. M., & Akinlabi, E. T. (2020). Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, 1–15. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48259-6_1/FIGURES/4
- Nikzad, M., Masood, S. H., & Sbarski, I. (2011). Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling. *Materials & Design*, 32(6), 3448–3456. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.01.056>
- Nofar, M., Sacligil, D., Carreau, P. J., Kamal, M. R., & Heuzey, M. C. (2019). Poly (lactic acid) blends: Processing, properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125, 307–360. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.12.002>
- Profi Filaments. (2023). *Domáci Extrúder na 3D filamenty*. <https://www.profi-filaments.sk/cz/p/345/domaci-extruder-felfil>
- Prusa Research. (2023). *Částečně sestavená 3D tiskárna Original Prusa MINI+ | 3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši*. <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/castecne-sestavena-3d-tiskarna-original-prusa-mini-4/>
-

-
- Prusa Research a.s. (2022a). *Průvodce materiály. ABS*.
https://help.prusa3d.com/cs/article/abs_2058
- Prusa Research a.s. (2022b). *Průvodce materiály. ASA*.
https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809
- Prusa Research a.s. (2022c). *Průvodce materiály. PETG*.
https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059
- Prusa Research a.s. (2022d). *Průvodce materiály. PLA*.
https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062
- Prusa Research a.s. (2022e). *Průvodce materiály. Polypropylen (PP)*.
https://help.prusa3d.com/cs/article/polypropylen-pp_167126
- Prusa Research a.s. (2023). *Průvodce materiály. Flexibilní materiály*.
https://help.prusa3d.com/cs/article/flexibilni-materialy_2057
- Quintana, R., Persenaire, O., Lemmouchi, Y., Bonnaud, L., & Dubois, P. (2016). Compatibilization of co-plasticized cellulose acetate/water soluble polymers blends by reactive extrusion. *Polymer Degradation and Stability*, 126, 31–38.
<https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2015.12.023>
- RS Online. (2023). *Topné těleso 345 W 230 V AC | RS*. <https://bit.ly/43sbscF>
- Saleh, A., & Elfatah, A. (2019). 3D Printing in Architecture, Engineering and Construction. *Ahmed Saleh /Engineering Research Journal*, 162, 1–18.
<https://www.archdaily.com/890494/interior-design-and-3d->
- Savini, A., & Savini, G. G. (2015). A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *Proceedings of the 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference, HISTELCON 2015: The 4th IEEE Region 8 Conference on the History of Electrotechnologies*. <https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2015.7307314>
- Seidl, M. (2015). *Stroje pro zpracování polymerních materiálů*. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
- Sells, E., Bailard, S., Smith, Z., Bowyer, A., & Olliver, V. (2009). RepRap: The replicating rapid prototyper: Maximizing customizability by breeding the means of production. In *Handbook of Research in Mass Customization and Personalization*. https://doi.org/10.1142/9789814280280_0028
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia*
-

<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.06.089>

- Shi, Y., Yan, C., Zhou, Y., Wu, J., Wang, Y., Yu, S., & Chen, Y. (2021). Polymer materials for additive manufacturing—powder materials. *Materials for Additive Manufacturing*, 9–189. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819302-0.00002-X>
- Singh, P., Katiyar, P., & Singh, H. (2022). Impact of compatibilization on polypropylene (PP) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) blend: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.01.350>
- Singhvi, M. S., Zinjarde, S. S., Gokhale, D. v., & Singhvi, S. (2019). *Polylactic acid: synthesis and biomedical applications*. <https://doi.org/10.1111/jam.14290>
- Strano, M., Rane, K., Farid, M. A., Mussi, V., Zaragoza, V., & Monno, M. (2021). Extrusion-based additive manufacturing of forming and molding tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(7–8), 2059–2071. <https://doi.org/10.1007/S00170-021-07162-8/FIGURES/18>
- Stříteský, O., Průša, J., & Bach, M. (2019). *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* (První vydání). Prusa Research a.s.
- Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., Blue, C. A., & Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144–150. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2014.10.009>
- Torrado Perez, A. R., Roberson, D. A., & Wicker, R. B. (2014). Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. In *Journal of Failure Analysis and Prevention* (Roč. 14, Číslo 3). <https://doi.org/10.1007/s11668-014-9803-9>
- Vaškevič, Š. (2019, listopad 7). *Nové bioplasty se v Česku ukázaly jako slepá cesta* . <https://zajimej.se/nove-bioplasty-se-v-cesku-ukazaly-jako-slepa-cesta/>
- Vaz, V. M., & Kumar, L. (2021). 3D Printing as a Promising Tool in Personalized Medicine. *AAPS PharmSciTech*, 22(1), 1–20. <https://doi.org/10.1208/S12249-020-01905-8/TABLES/3>
- Vyavahare, S., Teraiya, S., Panghal, D., & Kumar, S. (2020). Fused deposition modelling: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 26(1), 176–201. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106>
-

-
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, *110*, 442–458. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.11.034>
- Wellzoom. (2023). *Wellzoom – Wellzoom desktop filament extruder*. <http://wellzoomextruder.com/>
- Wellzoom. (2023). *Wellzoom desktop filament extruder B – Wellzoom*. <http://bit.ly/43uCT5H>
- Yang, Y., Zhou, Y., Lin, X., Yang, Q., & Yang, G. (2020). Printability of External and Internal Structures Based on Digital Light Processing 3D Printing Technique. *Pharmaceutics*, *12*(207). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12030207>
- Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L., & Li, Z. (2001). Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. *Materials Science and Engineering: A*, *301*(2), 125–130. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01810-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01810-4)
-

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Schéma 3D tisku (upraveno podle Agrawaal & Thompson, 2021).....	10
Obrázek 1.2: Princip FDM technologie podle Mwema & Akinlabi, 2020).....	17
Obrázek 1.3: Postup výroby PLA-g-MA pelet	29
Obrázek 1.4: Postup výroby výsledného filamentu	30
Obrázek 2.1: Návrh extrudéru pro zpracování kompozitního materiálu.....	31
Obrázek 2.2: 3D tiskárna Creality Ender 3 při tisku držáku motoru	32
Obrázek 2.3: Obrábění dílců extrudéru.....	33
Obrázek 2.4: Multimetr Fluke 289.....	34
Obrázek 3.1: Stejnoseměrný motor Magnetti Marelli	36
Obrázek 3.2: ATX zdroj.....	36
Obrázek 3.3: Model komory extrudéru.....	37
Obrázek 3.4: Model vrtáku	38
Obrázek 3.5: Model sestavy spojky	38
Obrázek 3.6: Náhled trysky (vlevo boční pohled, vpravo řez tryskou)	39
Obrázek 3.7: Držáky pro připevnění komponentů extrudéru na desku	40
Obrázek 3.8: Násypka připevněna na komoře extrudéru	41
Obrázek 3.9: Topná objímka (RS Online, 2023).	42
Obrázek 3.10: Model redukce topného tělesa	43
Obrázek 3.11: PID regulátor HT60B (HTH8, 2023).	44
Obrázek 3.12: Odporový snímač teploty	44
Obrázek 3.13 Fotografie izolace topného článku.....	45
Obrázek 3.14: Elektrotechnické schéma zapojení extrudéru	46
Obrázek 3.15: Detail svorkovnice PID regulátoru (HTH8, 2023).	46
Obrázek 3.16: Řez dírou pro šroub na základně extrudéru.....	47
Obrázek 3.17 : 3D model sestavy celého přístroje.....	48
Obrázek 3.18: Fotografie zhotoveného extrudéru.....	48
Obrázek 4.1: Snímek extrudéru z termokamery	50
Obrázek 4.2: Zaseknutá peleta při demontáži násypky.....	51
Obrázek 4.3: Struna vznikající při prvním testování přístroje	51
Obrázek 4.4: Snímek tepelné izolace z termokamery	52
Obrázek 4.5: Držák motoru pro řezání pelet.....	53
Obrázek 4.6: Druhý test extrudace.....	54

Obrázek 4.7: Vyrobený filament.....	55
Obrázek 4.8: Demontovaný vrták a komora extrudéru.....	55

Seznam tabulek

Tabulka 3.1 Štítek motoru Siemens 1LA7060-4AB11	35
Tabulka 4.1: Cena použitého materiálu	49