VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

3D TISKÁRNA TYPU COREXY

COREXY 3D PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Jan Doubrava
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Tomáš Marada, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	**Jan Doubrava**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	**Ing. Tomáš Marada, Ph.D.**
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

3D tiskárna typu CoreXY

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh a realizace 3D tiskárny s konstrukcí typu CoreXY. Tiskárna bude vymodelována pomocí parametrického programu Autodesk Inventor a poté sestavena ze zakoupených či vytištěných dílů. Součástí práce budou návrhy a nastavení jednotlivých parametrů 3D tisku tak, aby tisk odpovídal kladeným a reálným požadavkům na výrobu funkčních modelů. V práci bude proveden návrh technických úprav 3D tiskárny pro dosažení kvalitního tisku. Práce bude ukončena technicko–ekonomickým zhodnocením.

Cíle bakalářské práce:

Seznamte se s principem 3D tisku a dostupnými 3D tiskárnami na internetu.

Proveďte popis aditivní technologie Rapid Prototyping.

Proveďte návrh 3D tiskárny, vytvořte model v SW Autodesk Inventor a navržené řešení realizujte.

Experimentální část.

Proveďte technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

VODA, Zbyšek. Průvodce světem Arduina. Bučovice: Martin Stříž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.

REBEL 3D • Portal. REBEL 3D • Portal [online]. Copyright © 2009 [cit. 01.12.2016]. Dostupné z: http://www.rebelove.org/

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
ředitel ústavu	děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá tématikou 3D tiskáren, konkrétně konstrukcí kinematického typu CoreXY. Obsahuje přehled základních technologií 3D tisku a seznamuje čtenáře s technologií Fused Deposition Modeling. Věnuje se také nejpoužívanějším materiálům pro tuto technologii. Dále jsou popsány typy konstrukcí a komponenty 3D tiskárny. Je proveden návrh a vytvořen model v modelovacím programu Autodesk Inventor. Práce obsahuje popis realizace tohoto řešení a je zakončena zhodnocením.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the topic of 3D printers, namely the kinematic type of CoreXY. It includes an overview of basic 3D printing technologies and introduces the Fused Deposition Modeling technology. It also deals with the most used materials for this technology. There are types of 3D printer constructions and components described. The design and the model are created in the Autodesk Inventor modeling software. The work contains a description of the realization and is completed by the evaluation.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tiskárna, FDM, CoreXY, Rapid Prototyping, konstrukční návrh

KEYWORDS

3D printing, FDM, CoreXY, Rapid Prototyping, engineering design

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOUBRAVA, J. 3D tiskárna typu CoreXY. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 77 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval vedoucímu Ing. Tomášovi Maradovi, Ph.D. za trpělivé vedení. Dále Ing. Lence Doubravové/Havlíčkové a Ing. Filipovi Havlíčkovi za finanční pomoc a nedocenitelné rady. Velice oceňuji pomoc Ing. Hynka Štětiny, Ing. Martiny Šebkové a kolegů z 3D station s.r.o. za materiální i psychickou podporu. Nesmím zde opomenout ani Ing. Marii Zukalovou a tým Solidify 3D s.r.o. za další materiální podporu.

Další velký dík patří celému týmu FabLab Brno za poskytnuté zázemí, psychickou a informační podporu.

Největší dík patří mé partnerce Mgr. Ivě Maarové za nekonečnou trpělivost.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Tomáše Marady, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 25. 5. 2018 ……

Jan Doubrava

OBSAH

1 ÚVOD 15

2 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ 17
2.1 Aditivní technologie rapid prototyping 17
2.2 Co je to 3D tiskárna 17
2.3 Metody 3D tisku 17
2.3.1 Fused Deposition Modeling 18
2.3.2 Stereolitografie 19
2.3.3 Selektivní laserové sinterování 20
2.3.4 Ostatní metody 21
2.4 Proces FDM 3D tisku 22
2.5 Materiály pro FDM 23
2.5.1 ABS, ASA 24
2.5.2 PLA 25
2.5.3 PETG, CPE 25
2.5.4 Podpůrné materiály 26
2.5.5 Flex a Nylon 27
2.6 Typy konstrukcí 28
2.6.1 Kartézský 28
2.6.2 Delta 28
2.6.3 Polární 29
2.7 Další kartézské typy konstrukcí 30
2.7.1 Průša i3 30
2.7.2 Ultimaker 31
2.8 Dostupné tiskárny 32
2.8.1 Průša i3 MK3 33
2.8.2 Ultimaker S5 35
2.8.3 Eclips 3D2 36
2.8.4 Formlabs Form 2 37

3 NÁVRH ŘEŠENÍ 38
3.1 Cíle práce 38
3.2 Dílčí součásti tiskárny 38
3.2.1 Konstrukce 39
3.2.2 Rám 39
3.2.3 Kinematické uspořádání 40
3.2.4 Hotend 42
3.2.5 Extrudér 44
3.2.6 Heatbed a kalibrace 45
3.2.7 Řídící elektronika a Firmware 46
3.3 Návrh parametrického modelu konstrukce 49
3.3.1 Návrh první 49
3.3.2 Návrh druhý 50

4 REALIZACE ŘEŠENÍ 53
4.1 Sestrojování 53
4.1.1 Sestavení první 53
4.1.2 Sestavení druhé 54

4.2 Elektrické zapojení 56
4.3 Konfigurace 57
4.3.1 Firmware 58
4.3.2 Slicer 58
5 TESTOVÁNÍ A ZHODNOCENÍ 60
6 ZÁVĚR 63
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 65
8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK 69
9 SEZNAM PŘÍLOH 71

1 ÚVOD

Práce se zabývá moderním tématem 3D tisku, které autora zaujalo natolik, že se rozhodl do něj proniknout sestavením své vlastní 3D tiskárny. Práce tedy čtenáře seznamuje s obecnými znalostmi o oboru – co je to 3D tisk, k jakým technologiím se řadí a jaké jsou jeho technologické principy, a to tak, aby čtenáři zajistila dostatečný rozhled v problematice. Práce se podrobněji zabývá metodou Fused Deposition Modeling (FDM), která byla zvolena kvůli své rozšířenosti a dostupnosti. Čtenář je detailněji seznámen s procesem tisku touto metodou a se základní charakteristikou používaných materiálů.

Jelikož práce primárně směřuje k návrhu tiskárny pro její sestavení, následuje pasáž, která rozebírá typy používaných konstrukcí 3D tiskáren a seznamuje čtenáře s vybranými zástupci dostupných tiskáren na trhu.

Práce následně přechází k postupnému návrhu řešení. Prvním krokem bylo pro autora specifikovat požadavky na výsledné řešení. Poté následuje obsáhlejší část rozebírající detailněji dílčí komponenty 3D tiskáren, přestavuje dostupná dílčí řešení na trhu v těchto oblastech a vybírá z nich na základě zvolených kritérií. Po dokončení výběru součástí následuje krátká kapitola shrnující postup návrhu parametrického modelu stoje, doplněný o další volby z oblasti dílů a řešení konstrukčních úloh.

Návrh řešení je rozložen do dvou fází, přičemž druhý návrh upravuje zjištěné nedostatky plynoucí z konstrukce prvního návrhu. V tomtéž duchu pokračuje také další kapitola věnující se popisu realizace zvoleného (druhého) řešení. V ní jsou také reflektovány nedostatky návrhu a zvolených komponent a také jejich případné odstranění. Dále práce obsahuje popis zapojení a oživení stoje, seznámení se s konfigurací řídícího softwaru tiskárny a s nastavením softwaru připravujícím data pro tiskárnu v počítači.

V poslední kapitole lze najít ukázky testovacích výtisků a technicko-ekonomické srovnání s komerčním řešením. Kapitola také předkládá návrhy pro další rozšíření tiskárny.

2 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ

Tato kapitola popisuje základní znalosti o technologii 3D tisku, jeho technologiích a věnuje se současnému stavu trhu s 3D tiskárnami, dostupnými běžným spotřebitelům.

2.1 Aditivní technologie rapid prototyping

Rapid prototyping – rychlé prototypování je soubor metod technologií sloužícím k rychlé výrobě prototypů. Cílem těchto technologií je tedy primárně zjednodušit, zlevnit a zrychlit výrobu prototypů. Dělí se na subtraktivní a aditivní technologie. Subtraktivní metody jsou založené na odebírání materiálu z polotovaru a řadíme sem například obrábění. Aditivní metody jsou založené na postupném přidávání, nanášení materiálu na specifické místo, většinou po jednotlivých vrstvách, kde se spojí s již naneseným materiálem, buďto tepelně nebo za pomoci pojiva, dokud nevznikne požadovaný tvar. [1]

Additive manufacturing

Pojmem additive manufacturing (= aditivní výroba) se označuje soubor metod také nazývaný 3D tisk. „3D tisk je proces, při kterém se z digitální předlohy (3D model) vytváří fyzický model.“ [2] píše Průša ve své publikaci Základy 3D tisku. Proces lze tedy analogicky přirovnat k 2D tisku, kdy se z 2D obrazu, ať už jde o text nebo obrázek, stává fyzický objekt, v podobě potištěného papíru. Produktem 3D tisku je tedy fyzický objekt, jehož fyzikální, chemické a funkční vlastnosti, stejně tak jako věrnost předloze závisí na použité technologii 3D tisku, materiálu či materiálů a nemálo také i na nastavení samotného tisku.

2.2 Co je to 3D tiskárna

3D tiskárna je stroj typu CNC, tedy počítačově řízený číslicový stroj, určený pro aditivní výrobu. Většina v této práci popisovaných 3D tiskáren pracuje s pohybem ve třech základních osách, i když přístup k souřadným systémům je v této oblasti rozmanitý. [2] V průmyslové praxi a ve výzkumu se však lze setkat i s průmyslovými roboty a více-osými tiskárnami, které nejsou popisovány v této práci. [3]

2.3 Metody 3D tisku

Jak již bylo dříve zmíněno, pojem 3D tisk je souborem technologií z celku technologií Rapid prototyping. 3D tisk spadá do kategorie technologií aditivní výroby. Aditivní technologie fungují na principu postupného nanášení materiálu ve vrstvách. Každá z následujících technologií však přistupuje k tvorbě samotné vrstvy jiným způsobem.

Existuje však pracovní postup, který mají tyto technologie společné. Z něj budeme dále vycházet při testování výsledků této práce:

1. Tvorba počítačového 3D modelu
2. Zpracování a úpravy modelu vzhledem k použité technologii
3. Rozřezání a zpracování cest a instrukcí pro stroj v řezacím programu
4. Příprava stroje k práci a nahrání souboru instrukcí nebo navázání spojení
5. Spuštění stroje, který model tvoří po vrstvách
6. Vyjmutí výrobku ze stroje, odstranění přebytečného materiálu
7. Následné zpracování výrobku (vytvrzení, obrobení atd.)

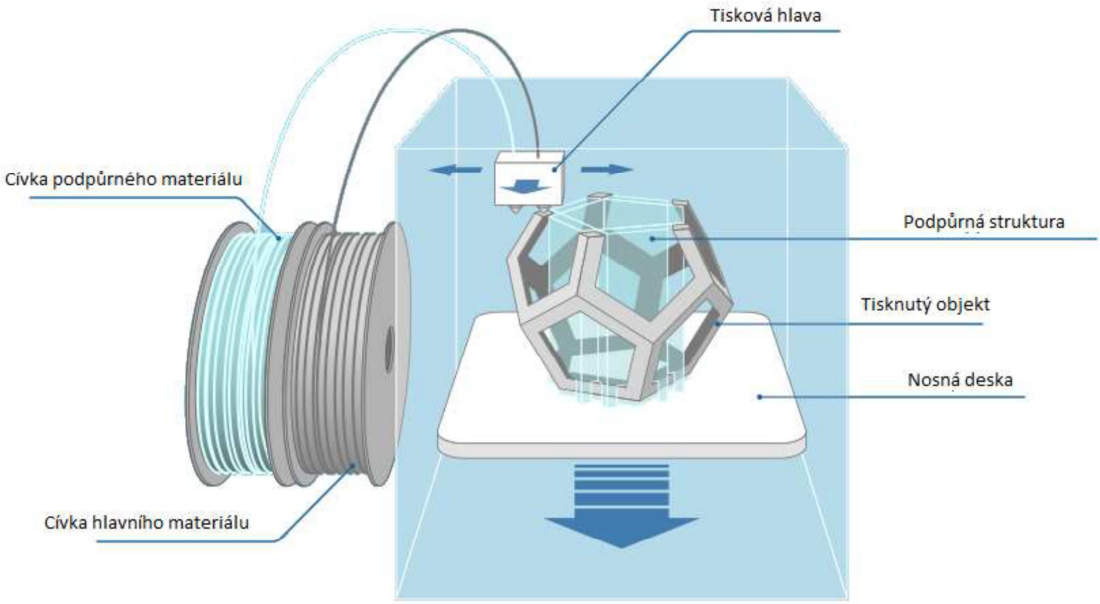
Výše popsaný postup lze uplatnit při použití většiny níže popsaných technologií, záleží však primárně na konkrétním použitém stroji, jelikož v praxi se lze setkat se spoustou omezení, převážně u komerčních strojů. [4]

2.3.1 Fused Deposition Modeling

Hovoříme-li o běžně dostupném 3D tisku kterým se zabývá tato práce, je třeba začít technologií ze všech nejrozšířenější, a to metodou Fused Deposition Modeling, nazývanou též Fused Filament Fabrication (FFF) z licenčních důvodů.

Metoda FDM je v principu jednou z nejjednodušších metod 3D tisku, při níž se taví tenké (1,75 nebo 2,85 mm) vlákno nazývané filament specifického termoplastu, uvnitř horké trysky, kam je tlačeno extrudujícím motorem. Tryska je pak součástí tiskové hlavy, která se pohybuje ve třech osách vůči tiskové podložce, kam se odspodu vrství po malých vrstvách tištěný objekt. Jednoduchost této metody spočívá převážně v nenáročnosti řízení pohybu – v nejjednodušším provedení si lze vystačit se čtyřmi krokovými motory. Tři ovládají základní osy a jeden vhání materiál do trysky, tedy ovládá pomyslnou čtvrtou osu vytlačeného materiálu. [4, 5]

Druhým a možná zásadnějším bodem jednoduchosti je fakt že, technologicky metoda staví na primitivním zahřívání materiálu těsně před bodem aplikace, kde svou teplotou nataví okolní, již nanesený materiál, se kterým se tímto spojí, a následným samovolným vychladnutím ztuhne v požadované poloze. Metoda tedy staví převážně na vlastnostech použitých materiálů, termoplastů, které jsou svým chováním k tomuto použití vhodné. Taví se při relativně nízké teplotě, při které se ve stavu relativní viskozity dokáží spojovat s již nanesenou vrstvou téhož nebo podobného materiálu, i při pokojové teplotě. Metoda se vyznačuje průměrnou kvalitou výrobku, přesnost výsledku je běžně v řádech desetiny milimetru. Oproti ostatním metodám je rychlá, levná a dostupná. Výrobky mají dobré tepelné i mechanické vlastnosti. Jsou stabilní, vhodné pro funkční prototypy, výrobní nástroje, i jako produkt malosériové výroby. [6, 7]



Obr. 1: Metoda Fused Deposition Modeling [5]

2.3.2 Stereolitografie

Nejstarší metodou 3D tisku je Stereolitografie (SLA), která je založená na vytvrzování fotocitlivé pryskyřice UV laserem. Fotocitlivá pryskyřice se v kapalném stavu nachází v kádi, do které je ponořena i tisková platforma, na kterou se výrobek tiskne. UV laserový paprsek je nasměřován přes soustavu zrcadel a čoček tak, aby postupně vykreslil bod po bodu celou vrstvu tištěného objektu s tím, že je zaostřen mezi již stávající vrstvu a hladinu kapalného materiálu. Poté se vždy platforma sníží tak, aby přes tiskový prostor mohlo přejet rameno, které zajišťuje rovnoměrnou vrstvu kapalné pryskyřice na již vytvrzené vrstvě. To je nutné ke správnému vytvrzení další vrstvy a bez pomoci ramene by nemuselo (díky nízké viskozitě materiálu) dojít ke správnému zalití nové vrstvy. [4]

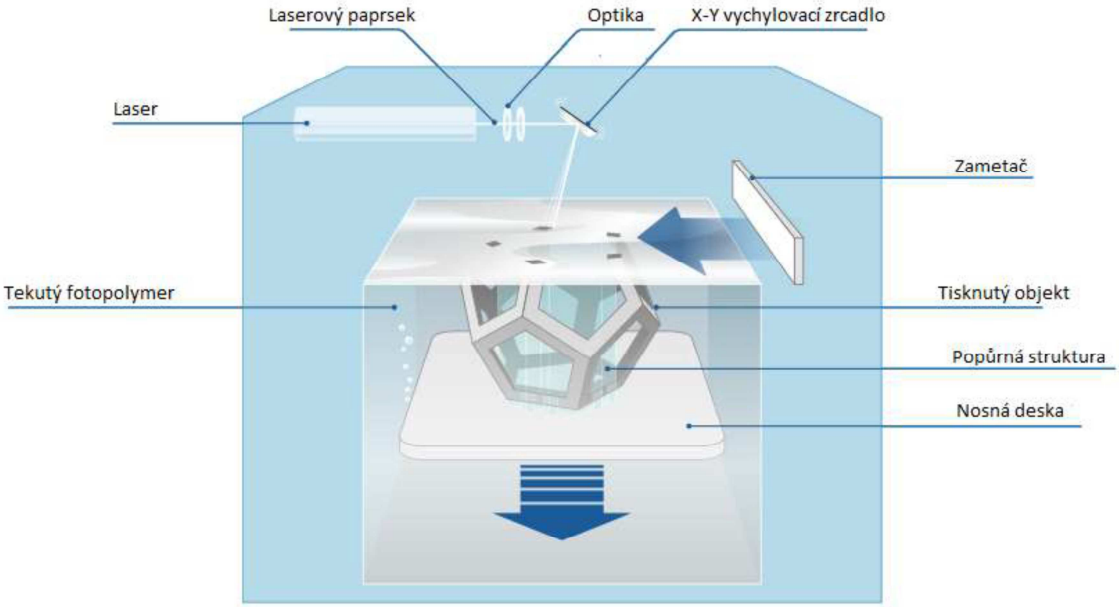
Toto uskupení pohybových os bývá převážně použito u průmyslových tiskáren. Je sice šetrnější k výtisku samotnému, avšak svou orientací omezuje tiskový prostor na velikost kádě, do které zajíždí tisková platforma. Ve spotřebitelských tiskárnách často najdeme upořádání os takové, že tisková platforma vyjíždí směrem nahoru z kádě a osvěcující laser se nachází pod průsvitným dnem této kádě. Toto uspořádání eliminuje omezení zmíněné dříve, velikost kádě již tedy nedefinuje maximální tiskový prostor. Při dokončení vrstvy, která se tvoří mezi dnem a již vzniklou vrstvou nebo tiskovou platformou, se vrstva musí ode dna oddělit a vysunout tak, aby opět došlo k rovnoměrnému zalití prostoru pro novou vrstvu. [5, 6]

Díky precizní optice lze touto metodou dosahovat vysoké přesnosti rozlišení tisku, běžné jsou výšky vrstvy od 0,05-0,15 mm. Dosáhnout se však dá i výšek 0,015 mm a běžná přesnost v XY se udává 0,15 mm; opět lze dosáhnout i vyšší. [7]

Nevýhodou používání této metody jsou vysoké pořizovací i provozní náklady, převážně porovnáváme-li v sektoru spotřebitelských tiskáren, mezi FDM a SLA tiskárnami. [8] Toto je dáno převážně kvalitním optickým aparátem, který je zapotřebí

k vysoké přesnosti této technologie, dále je to i vysoká cena spotřebního materiálu, která udává poměrně vysokou provozní cenu této technologie.

Dceřinou technologií je označováno DLP – digitální zpracování světla, které využívá k ozařování speciální projektor a řízenou matrici mikro-zrcadel. Výhodou bývá rychlost, jelikož projektor ozařuje celou vrstvu naráz. [5]



Obr. 2: Stereolitografie [5]

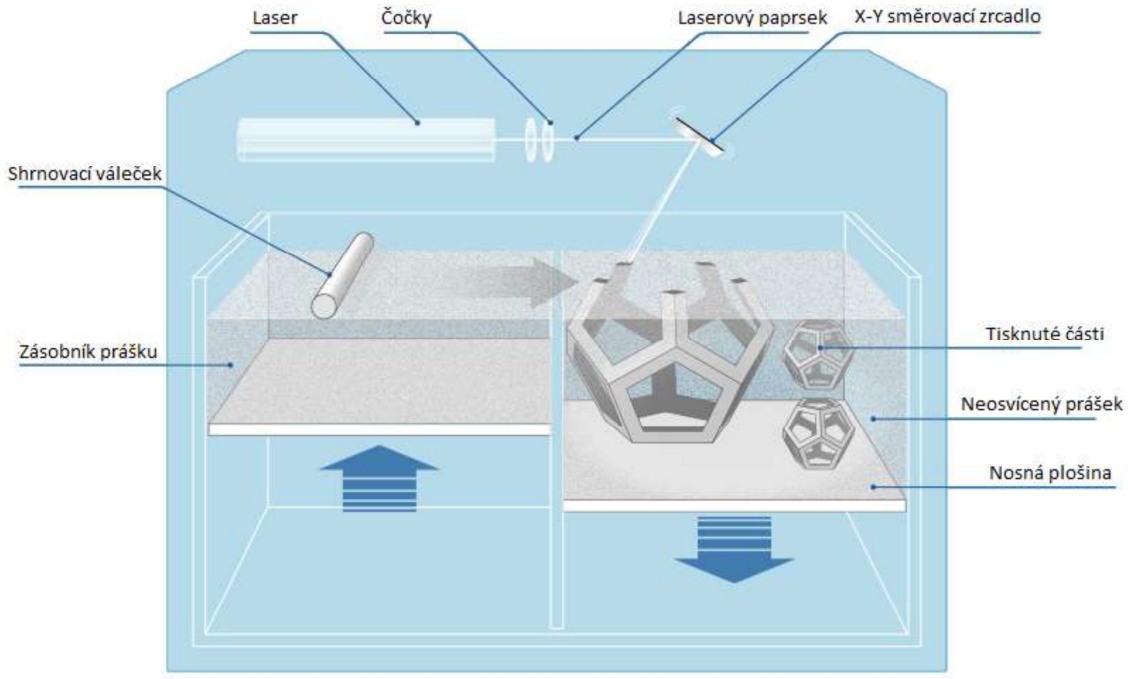
2.3.3 Selektivní laserové sinterování

Selektivní laserové sinterování neboli spékání (SLS), je metoda pracující s práškovým materiálem, který je podobně jako u stereolitografie ozařován laserem. Avšak místo spouštění polymerizace zde dochází ke spojování materiálu na úrovni prachových částic, za pomoci teploty a tlaku. Běžně se používá nylonový prach bází PA6, PA11, PA12. [4]

Vnitřní objem tiskárny musí být uzavřený, je totiž celý vyhřátý těsně pod teplotu tání polymeru. Vnitřní prostor se skládá z tiskového prostoru, kde se nachází tisková platforma, která zajíždí během tisku směrem dolů, dovnitř tiskového prostoru. A dále je rotujícím ramenem dávkován ze zásobníku nebo zásobníků po stranách tiskového prostoru pracovní materiál do tiskového prostoru tak, aby utvořil jednotnou rovinnou vrstvu o specifické výšce, vždy po každé vytvořené vrstvě modelu. Tu tvoří laser nebo soustava laserů, zaměřovaných na specifické body vrstvy optickou aparaturou. Jakmile je vrstva hotová, platforma se zasune dolů a je nanesena nová vrstva materiálu. Nezpracovaný materiál pak zůstává v tiskovém prostoru a působí zde jako podpůrný materiál. Toto chování je jednou z největších výhod práškových metod, kdy není potřeba podpor pro náročné geometrie, a zároveň je možné vyplnit celý tiskový prostor i vertikálně a vrstvit objekty na sebe bez ztráty kvality nebo zbytečného materiálu. [5, 6]

Výška vrstvy se pohybuje mezi 0,06-0,15 mm. S běžnou přesností nad 0,3 mm. Nevýhodou je větší tiskový čas a pórovitost tisku, která se odvíjí od velikosti prachových částic, se kterými se aktuálně pracuje. [7]

Zatím neexistuje běžně dostupná tiskárna na této metodě. Důvodem je vysoká náročnost procesu a s ní spojené pořizovací náklady. Je zapotřebí uzavřeného designu, aktivního vyhřívání a přesné a kvalitní optiky. Dále pak přesné a jemné mechaniky. Použitý materiál je také mnohem dražší než materiály pro FDM. [8]



Obr. 3: Selektivní laserové spékání (Selective Laser Sintering) [5]

2.3.4 Ostatní metody

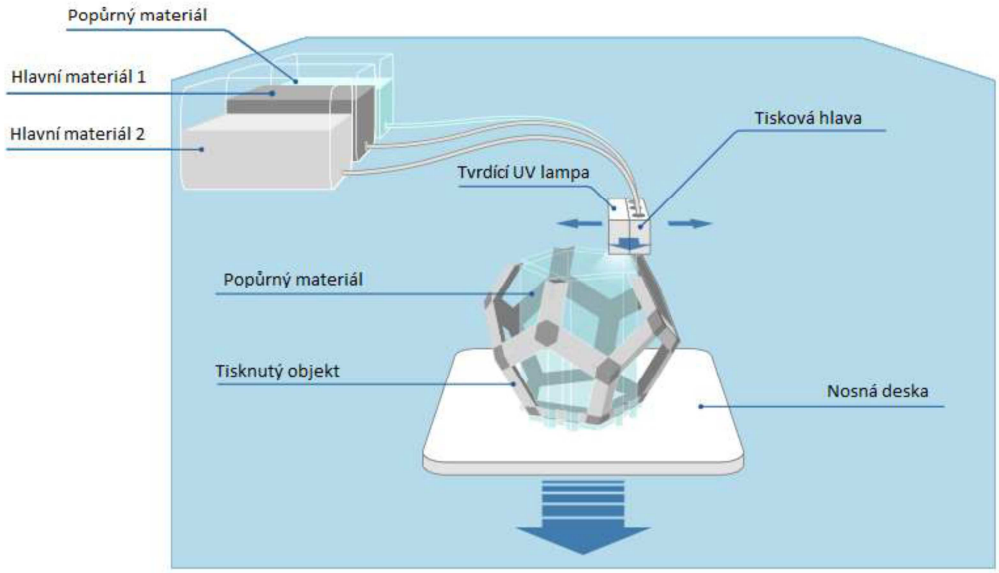
Existují i další metody 3D tisku které stojí za zmínku, jejich použití je však výhradně pro průmyslové použití, tedy jsou pro tuto práci nerelevantní. Bývají často velmi drahé jak po stránce pořizovacích nákladů, tak provozu. Až na výjimky je drahý i zpracovávaný materiál což v konečném důsledku omezuje použití, jen na specifické aplikace.

Za zmínku jistě stojí metoda zpracování kovů Direct Metal Laser Sintering, tedy spékání kovového prášku, které je velmi podobné SLS, a také Selective Laser Melting, kdy se materiál nespéká, ale taví. [4, 5]

Zajímavou výjimku tvoří Layer Object Manufacturing, kde je jako základní materiál použit papír. Do něj je za pomoci laseru nebo nože, vyřezáván požadovaný tvar vrstvy. Ty mohou být dobarvovány stejně jako v obyčejné tiskárně a následně spojeny dohromady za pomoci pojiva. Metoda však tvoří množství zbytkového materiálu

a výtisky nemají dostatečné mechanické vlastnosti, hodí se tedy spíše jako vizuální a dekorativní produkty. Cenově však může být pro specifické aplikace zajímavá. [9]

Metod zpracovávající polymery je však více, než je zde zmíněno, bývají však komplikovanější. Například skupina metod Photopolymer Jetting, která pracuje s fotocitlivým materiálem, který nanáší pomocí tiskové hlavy podobné v inkoustových tiskárnách a následně je pak vytvrzován UV lampou na tiskové hlavě. [5]



Obr. 4: Metoda Photopolymer Jetting [5]

2.4 Proces FDM 3D tisku

V této kapitole bude podrobněji popsán postup při tisku, zvláště pak při použití FDM technologie, která byla vybrána pro tuto práci. Tato podkapitola je důležitá pro pochopení problematiky ze softwarového a procesního pohledu. Podkapitola čerpá zejména ze zdroje [10] a je doplněna poznatky z praxe.

Jako první je zapotřebí předloha, v našem případě 3D model. Ten lze získat modelováním v libovolném modelovacím softwaru (SW), v našem případě bude použit SW Autodesk Inventor, je však zapotřebí dodržet základní požadavky pro 3D tisk a mít na paměti schopnosti a použité technologie. Konkrétně je potřeba, aby byl model uzavřený, tedy aby polygonní síť, vzniklá exportem našeho modelu do potřebného formátu (nejčastěji *.STL-polygonní síť, *.STEP, *.OBJ a další), byla uzavřená. Nedodržením této zásady, ať již chybou programů při vzniku modelu, nebo jeho exportu do polygonní sítě (či jiného formátu srozumitelného pro další zpracování), může dojít ke špatnému zpracování v dalším kroku, nebo úplnému odmítnutí zpracování dalším programem v řadě, jímž je takzvaný slicer.

Slicer neboli řezač je program, který obstarává vrstvu zpracování mezi 3D modelem z modelovacího softwaru a řídícím softwarem 3D tiskárny. Jeho úkolem je nařezání modelu na vrstvy a jejich zpracování podle použité technologie. Výstupem tohoto programu je G-CODE, soubor příkazů o pohybech např. tiskové hlavy (u FDM), kterým rozumí řídící elektronika numericky řízených strojů, tedy i 3D tiskárna.

Pokud je hotový soubor *.gcode a je připravená tiskárna, stačí jen spustit plnění G-CODU, ať už prostřednictvím počítače přímo spojeného s tiskárnou, nebo prostřednictvím webového rozhraní zprostředkovaného např. programem Octoprint, nebo přímo na 3D tiskárně spuštěním z SD karty (pokud to zařízení umožňuje).

Po dokončení tisku přichází fáze post-processingu nebo-li postprodukce. V této fázi se vyjme výtisk z tiskárny a podle potřeby se např. odstraní podpůrný materiál, chemicky či mechanicky se vyhladí či jinak upravují finální vlastnosti výrobku.

Rekapitulace – postup 3D tisku:

1. Tvorba 3D modelu. Zde je třeba zahrnout vlastnosti dále použité technologie a základní požadavky na úspěšný tisk.
2. Export modelu do formátu podporovaného programem pro zpracování dat pro danou 3D tiskárnu. Nejčastěji formát STL.
3. Nastavení sliceru pro konkrétní tisk a následné zpracování virtuálního objektu slicerem. Výstupem je G-CODE.
4. Příprava tiskárny – např. předehřev tiskové hlavy a podložky u FDM. Kontrola a doplnění zpracovávaného materiálu.
5. Spuštění tisku. Předchází mu např. nahrání kódu na zařízení nebo párování s počítačem.
6. Samotný tisk. Dle použité technologie a nastavení stroje může trvat i dny.
7. Post-processing. Úprava výtisku do finální podoby, ať už jde o čištění od podpůrného materiálu, nebo o další strojní či ruční zpracování pro splnění výstupních požadavků výrobku.

2.5 Materiály pro FDM

Jak již bylo zmíněno v popisu technologie, metoda FDM se odvíjí od chování materiálů, které zpracovává. Na rozdíl od kovů, termoplasty používané pro FDM se zvyšující teplotou postupně měknou. [11] Lze tedy pomocí teploty ovlivňovat pro 3D tisk důležitý parametr viskozity. V začátcích FMD nebylo dostupné velké spektrum materiálů, šlo prakticky pouze o ABS a PLA. S rozmachem této technologie přišla i velká poptávka po různých materiálech, s rozličnými vlastnostmi, které by se daly prakticky využít, a v poslední době najdeme na trhu široké spektrum nových materiálů. V této podkapitole se seznámíme s nejzákladnějšími z těchto materiálů, převážně z hlediska jejich tiskových, fyzikálních a materiálových vlastností, které pak budou potřebné k závěrečnému zhodnocení.

Tyto materiály pro použití v 3D tisku se nazývají filament a prodávají se ve formě vlákna navinutého na špulku o nominálním průměru nejčastěji 1,75 mm nebo o průměru 2,85 mm používaného převážně dříve. Vlákno je navinuto na plastovou nebo kartonovou cívku standardizované velikosti, v metráži podle prodejní hmotnosti. V Česku se můžeme nejčastěji setkat s 1 kg balením od firmy Plasty Mladeč, nebo s 0,75 kg balením od firmy Fillamentum.

2.5.1 ABS, ASA

První materiálem, který bude popsán, je také chronologicky první materiál používaný FDM. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) je stále ještě populárním materiálem v 3D tisku, také díky obecně známému názvu. Jedná se o amorfní termoplast, vzniklý polymerizací styrenu (40-60%) Akrylonitrilu (15-35%) a polybutadienu (5-30%). Výsledkem je látka kombinující vlastnosti všech svých složek tedy, ABS je silnější než samotný polystyren, ten dodává směsi lesklý plastický nepropustný povrch, butadien pružnost a houževnatost, a akrylonitril povrchovou tvrdost. [12]

ABS má teplotu skelného přechodu dle poměru směsi nad 100°C a díky vysoké nárazové pevnosti lze tento materiál efektivně použít v rozmezí -20°C až +80°C. Je to tedy materiál s ideálními fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, pro použití na funkční prototypy a namáhané části. Bohužel jsou tyto vlastnosti kompenzovány požadavky kladenými na vlastnosti tiskárny a náročnost samotného tisku. [12, 13]

Díky vysoké teplotě skelného přechodu a přilnavým vlastnostem, je nutností tisknout ABS na vyhřívané platformě o teplotě 100°C s adhezivní mezivrstvou, ta je tvořena v nejideálnějším případě filmem z rozpuštěného ABS v acetonu. Lze však s omezeným úspěchem použít lepidlo, nebo univerzální folii PEI. Další nevýhodou je vysoká tisková smrštivost způsobená velkou roztažností při zahřívání, díky ní je důležitá i okolní teplota v tiskovém prostoru a geometrie tištěného modelu. Čím větší rozdíl teplot, tím více se výtisk nerovnoměrně smršťuje a vzniklé pnutí může způsobit tzv. warping – zvedání rohů a míst s vysokým pnutím způsobujícím další deformace až do úplného odtržení modelu od podložky, nebo tzv. delaminaci – efekt, při kterém se oddělují od sebe vrstvy modelu až do jeho úplného roztrhání. Oběma těmto nechtěným efektům lze do jisté míry předcházet, stabilizací teploty uvnitř tiskového prostoru, přirozeně vyhřívaného tiskovou platformou, nebo dalšími sofistikovanými řešeními jako jsou pasivní nebo aktivní vyhřívaná komora regulující teplotu uvnitř tiskového prostoru. [13, 14]

ABS má přirozeně bílou neprůhlednou mírně nahnědlou barvu, tiskne se při teplotě mezi 220-250°C, lze jej brousit a dále opracovávat, je chemicky málo aktivní a rozpouští se v acetonu. Nejvýraznější po-tiskovou nevýhodou je jeho nízká odolnost vůči UV záření, na kterém silně degraduje – ztrácí svoje fyzikální a mechanické vlastnosti v období 1-2 let, v závislosti na podmínkách vystavení UV. Tuto nevýhodu kompenzuje poměrně nový materiál dostupný k 3D tisku ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile), což je materiál nejpodobnější ABS a prodlužuje toto degradační období na zhruba 10 let. [13, 14]

2.5.2 PLA

Druhý materiálem, který bude popsán, je nejpopulárnější materiál pro 3D tisk PLA (Polylactic Acid). Kyselina polymléčná je termoplast vyrobený, na rozdíl od jiných zde zmíněných materiálů, z obnovitelných zdrojů jako cukrová třtina nebo kukuřičný škrob. Díky tomu je také za specifických podmínek plně odbouratelný a tím se řadí mezi nejekologičtější materiály pro 3D tisk. [15]

Jeho popularita spočívá převážně v jednoduchosti práci s tímto materiálem, která je dána hned několika faktory. Prvním z nich je velmi nízká teplota tisku – ideálních výsledků (podle rychlosti tisku) dosahuje v rozmezí 190-230°C s nejběžnější teplotou 210°C. Nízká tisková teplota se však váže i na nízkou teplotu skelného přechodu, která se u PLA udává kolem 50-60°C a určuje tak nejpodstatnější slabinu tohoto materiálu. Díky tomu nelze PLA použít při venkovních instalacích na přímém ani zprostředkovaném slunci, v případech zvýšené nebo cyklické změny teploty, ani v případech kdy by součást byla předmětem zvýšeného tření. [11, 13]

PLA samo o sobě netuhne při tisku dostatečně rychle a může způsobovat řadu problémů, tato vlastnost se však snadno kompenzuje přídavným chlazením materiálu hned, co opustí trysku, čili ventilátorem na tiskové hlavě. Chladící výtisk se tedy brzy stal standardem 3D tiskáren, bez něj jsou výtisky z PLA nepěkné a často nejdou ani vytisknout. Díky nízké teplotě skelného přechodu a pomalému tuhnutí materiálu, není téměř potřeba vyhřívané tiskové platformy, PLA se dá tisknout na podložce o 0-60°C, opatřené adhezivní vrstvou v podobě malířské pásky nebo vrstvy lepidla, či vrstvou PEI folie. [13]

Další faktor, který přispěl k oblíbenosti tohoto materiálu je jeho nízká smrštivost a kroucení během tisku v porovnání s ostatními zde popisovanými materiály. To je způsobeno nízkým rozpínáním při zahřívání a tuhnutí. Díky těmto vlastnostem je tento materiál nejjednodušeji tisknutelný v rámci FDM 3D tisku. Za použití dodatečného chlazení lze dosáhnout lepší povrchové a vizuální kvality než u jiných materiálů. [14]

Výtisky z PLA jsou jedny z nejtužších, ale jsou křehčí než z ABS. Díky velké rozšířenosti materiálu, velké barevné škále a řadě materiálů se základem PLA s příměsí kovů nebo dřeva a jeho cenové dostupnosti, se materiál používá převážně na pohledové modely, testovací výtisky různých geometrií a tvarů a na běžný tisk.

2.5.3 PETG, CPE

PETG (polyetyléntereftalát – glykol), a další ko-polyestery jsou další kategorií materiálů používaných při 3D tisku, převážně proto, že jejich vlastnosti je řadí na pomyslném žebříčku oblíbenosti mezi uživatelsky přívětivé PLA a odolné ABS. Některé vlastnosti s nimi sdílí, jiné jsou naprosto odlišné.

Teplotně je PETG s bodem skelného přechodu na 80°C přesně mezi PLA a ABS a řadí se tím tedy spíše na stranu materiálů již teplotně odolnějších. Teplota platformy se doporučuje podle konkrétního materiálu mezi 60-90°C, a konkrétně pro PETG 70-80°C. Tisková teplota bývá kolem 230-240°C a u CPE od firmy Fillamentum až 265°C. Tiskovou teplotou se tedy řadí do vyšší kategorie. Další tiskové vlastnosti jsou

především nízká smrštivost oproti ABS, a tedy absence s tím spojených problémů, nevýhodou však je, že díky glykolu je materiál při tisku velmi přilnavý nejen k sobě ale také k trysce a tvoří tzv. stringing – tedy efekt, kdy tryska tahá drobná vlákna při přesunech, výtisk pak vypadá, jako by měl na sobě pavučiny. Tohoto efektu se nedá u PETG úplně zbavit, dá se jen snížit na minimum optimalizací retrakce a snížením množství přejezdů přes perimetry. [13]

PETG je pružnější a povrchově měkčí než předchozí materiály, je však houževnatější a díky vysoké mezi-vrstevní přilnavosti také všesměrově silnější, izotropní. Díky tomu také velmi dobře drží na tiskové podložce, je tedy potřeba opatrnosti při snímání výtisku. Tato vlastnost bohužel komplikuje, až znemožňuje takový tisk, kdy je k podpůrným strukturám využíván totožný materiál, jelikož takto vytvořené podpory lze jen těžko odstraňovat. PETG je velmi chemicky odolné a běžně se udává, že je vhodné ke kontaktu s potravinami, i když přímo certifikovaných materiálů není mnoho. [14]

Přírodní PETG je bezbarvé a transparentní, spousta základních barev je tedy dodávána jako poloprůhledná zabarvená struna. Materiál však při změně teploty mění svou transparentnost dle teploty zahřátí, průsvitné výtisky tedy vyžadují velice přesné teplotní tiskové nastavení. Jsou k dostání i neprůsvitné plné barvy, a dokonce příměsové typy doplněné např. o uhlíkové vlákno, dodávající větší tuhost a odolnost. [14]

CPE je přírůstek do této kategorie materiálů od firmy Fillamentum. Jedná se o ko-polyester, založený na kyselině tetraftalové. Jde o úplnou novinku a v duchu ASA, která nahradila ABS, se snaží vylepšit již stávající sortiment PETG. Má výrazně vyšší doporučenou tiskovou teplotu 255-275°C, a ačkoli přejímá většinu vlastností obyčejného PETG jako „stringing“ a vysokou přilnavost, má vylepšené mechanické vlastnosti. [14, 16]

2.5.4 Podpůrné materiály

Následující skupina materiálů díky svým vlastnostem našla specifické využití v 3D tisku. Jsou to materiály, které jsou jednak přilnavé k jiným materiálům při tisku, jednak jsou za správných podmínek jednoduše rozpustné ve vodě či jiných specifických rozpouštědlech. Používají se tedy v tiskárnách uzpůsobených k tisku dvěma či více materiály v jedné vrstvě jako podpůrná struktura s přímým napojením na základní materiál. Tímto se dá docílit násobně lepších vizuálních a mechanických výsledků.

Jedním z těchto materiálů je PVA (Polyvinyl Alcohol). Je to syntetický termoplastický polymer, který se rozpouští ve vodě i za pokojové teploty. Tiskne se ve stejném rozmezí teplot jako PLA, výborně se pojí jak k PLA, tak k ABS, je netoxický a biologicky odbouratelný. Nevýhodou je jeho vysoká nasákavost (hydroskopičnost), je tedy nutné jej skladovat v suchém prostředí. Druhou jeho nevýhodou je vysoká cena v porovnání s jinými materiály. [13]

HIPS (High Impact Polystyrene) je houževnatý polystyrén, kopolymer ze směsi polystyrénu a kaučuku, která na rozdíl od čistého polystyrénu je pevná a houževnatá. Materiál se také velmi dobře tiskne, nemá velké požadavky na tisková nastavení. Tiskne

se při teplotě mezi 220-240°C s vyhřívanou platformou přes 100°C. Dá se velmi dobře opracovávat, jak mechanicky, tak chemicky. Dá se použít i jako základní materiál, bohužel je na trhu nyní malá barevná dostupnost. Rozpouští se v limonenu (dipentenu). [14, 17]

2.5.5 Flex a Nylon

Poslední kategorií materiálů v této práci jsou materiály méně používané, které však stojí za zmínku kvůli jejich unikátním vlastnostem. Málo používané jsou především kvůli nárokům na tiskárnu a náročnosti tisku a také bývají často výrazně dražší než materiály běžně používané jako PLA nebo ABS.

První skupinou jsou flexibilní materiály, které se při běžné teplotě nacházejí v oblasti kaučukovitého stavu, jsou tedy měkké a elastické a flexibilní oproti ostatním materiálům. Celkově se tato skupina materiálů označuje jako TPE – termoplastické elastomery, z nichž dnes nejpoužívanější skupinou jsou TPU – termoplastické polyuretany, a to díky jejich dobré přilnavosti k ostatním materiálům a také kvůli lepší tisknutelnosti v porovnání s dřívějšími materiály v této skupině. Celkově jsou však všechny flexibilní materiály velmi náročné na tisk. Nevyžadují sice vyhřívanou platformu (běžně 45-60°C), tisknou se při teplotě 225-245°C, ale dodávají se v různých stupních tvrdosti, kde platí, že čím tvrdší materiál je, tím lépe se tiskne. Tvrdost totiž ovlivňuje přilnavost filamentu k podložce a také chování filamentu při průchodu extrudérem. Flexibilní materiály vyžadují vypnutou retrakci (zpětný chod extrudéru) a snížení tiskových rychlostí. Přilnavost k podložce také bývá problematická a často je vyžadována adhezivní mezi-vrstva na tiskové podložce. [13]

Druhou skupinou jsou filamenty nylonové (polyamid) známé pro svou houževnatost, pružnost, odolnost proti otěru a trvanlivost. Dle typu (dostupné tři typy bází PA6.6, PA6, PA12) se taví při teplotách v rozmezí 220-265°C. Vyžadují vyhřívanou platformu o teplotě 70-90°C opatřenou PEI folií nebo PVA lepidlem. Bohužel trpí „warpingem“ jako i jiné vysokoteplotní polymery. Hlavní nevýhodou je vysoká hygroskopičnost, se kterou je třeba počítat jak při skladování filamentu, tak finálního výrobku. Budou-li vytisknuté díly vystaveny vlhkosti, budou tuto vlhkost absorbovat a měnit svoje mechanické vlastnosti, stanou se tedy flexibilnější a měkčí. [13, 14]

	Teplota trysky	Teplota podložky	Uzavřená komora	Povrch podložky	Chlazení výtisku	Ostatní vlastnosti
ABS	220-250°C	100°C	vhodná	PEI, film z ABS	ne	odolný materiál
PLA	190-230°C	60°C	ne	PEI, lepidlo	ano	snadný tisk
PETG	230-260°C	90°C	ne	lepidlo, 3M páska	ano	chemická odolnost
PVA	185-200°C	60°C	ne	PEI, 3M páska	ano	vodou rozpustný
HIPS	220-240°C	100°C	vhodná	PEI, lepidlo	ne	chemicky rozpustný
FLEX	225-245°C	60°C	ne	PEI, 3M páska	ano	vysoce flexibilní
Nylon	220-265°C	90°C	vhodná	PEI, lepidlo	ne	otěru odolný

Tab. 1: Vlastnosti filamentů pro FDM [13]

2.6 Typy konstrukcí

V následující kapitole budou přiblíženy nejběžnější typy konstrukcí 3D tiskáren fungujících na principu FDM. Začneme u typů konstrukce kvůli jejich zásadnímu vlivu na ostatní vlastnosti a parametry celé 3D tiskárny. Prvním rozdělení bude uvedeno dle parametru, jaký používá tiskárna souřadný systém a s tím spojený pohyb jednotlivých os.

2.6.1 Kartézský

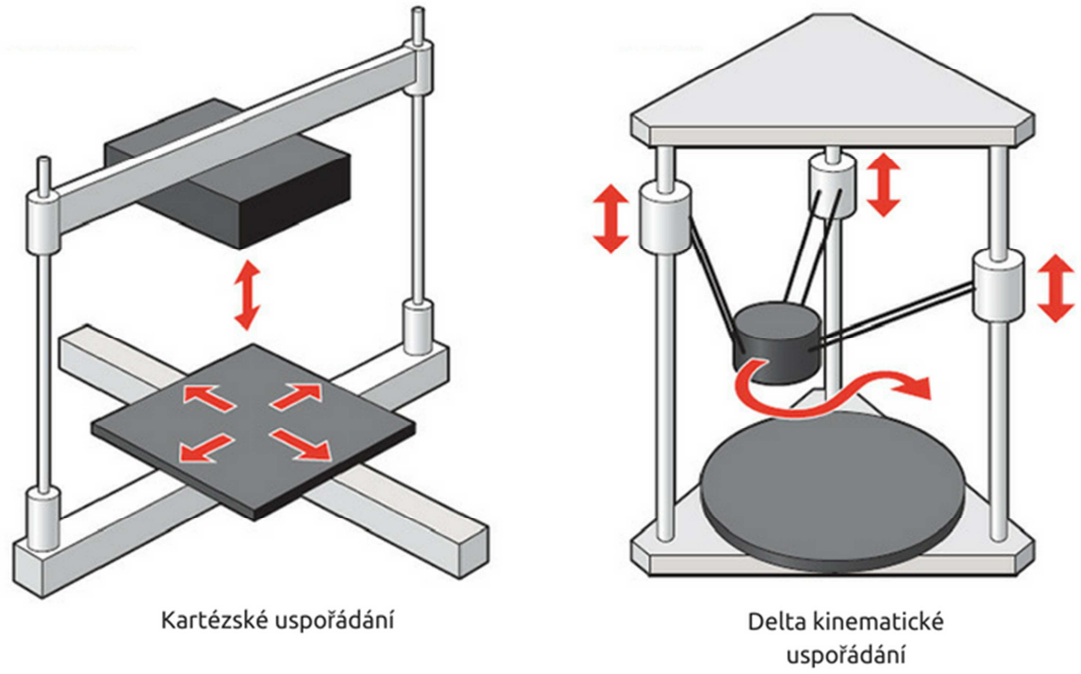
Tento typ tiskárny pracuje v kartézském souřadném systému, tedy systému tří na sebe kolmých os. Každá komponenta, navázaná na jednotlivou osu, se pohybuje lineárně, můžeme tedy jednoduše určit kladný a záporný směr pohybu. Jednotlivé komponenty (hlava či podložka) se mohou pohybovat po jedné či dvou osách současně dle provedení. Výrazným rysem této skupiny je pravoúhlá tisková podložka a tiskový prostor rovnoběžnostěnu. Obsah takového tiskového prostoru se jednoduše určí vynásobením šířky a délky tiskové podložky a výšky pohybu v ose Z. Z této vlastnosti a v závislosti na použití lineárních kolmých os vychází celá konstrukce tiskárny, která se skládá z pravoúhlých bloků, jako například kvádrový tvar konstrukce CoreXY. [18, 19]

2.6.2 Delta

Konstrukce typu delta stále používá kartézský souřadný systém, ale vzhledem jej připomíná jen málo. Prvním zřetelným rozdílem je kruhová tisková podložka, která je fixně upevněna k rámu. Ten bývá tvaru trojbokého hranolu s hranami tvořenými průmyslovými hliníkovými profily, na kterých jsou upevněny pojezdy tří lineárních nosičů, které udávají pohyb a polohu tiskové hlavy, která je upevněna mezi nimi na šesti pevných ramenech. Jsou to tedy tři lineární pohyby kolmé k ose Z, které vymezují tiskový prostor. Každý nosič je spojen v rovnoběžníkovém smyslu dvěma rameny se středovou částí nazývanou efektor. Díky tomuto uspořádání lze s efektorem

za pomoci lineárního pohybu nosičů pohybovat definovaně uvnitř tiskového prostoru, avšak efektor zůstává vždy rovnoběžný s podložkou, kolmý k ose Z. [18, 19]

Toto uspořádání má dvě hlavní výhody: tisková podložka nepohybuje a nepohybuje se ani žádný z motorů ovládajících polohu tiskové hlavy. Často je také motor pohánějící filament upevněn k rámu a s tiskovou hlavou je spojen pružnou teflonovou trubičkou v uspořádání nazývaném bowdenové vedení. Tímto je tedy dosaženo minimální váhy všech pohybujících se součástí tiskárny, která hraje klíčovou roli v rychlostech a zrychlení, kterých je tiskárna schopna dosáhnout. Také lze použít větších, a tedy silnějších motorů a dosáhnout výsledků ještě lepších. Nevýhodou jsou však větší nároky na řídící elektroniku, protože ta musí přepočítávat kartézské souřadnice na pohyb pojezdů. Dále pak větší nároky na tuhost rámu, přesnost komponentů – zvláště pak kloubové spoje ramen efektoru a nosičů, protože nepřesnosti se propisují do celého tiskového prostoru. Je také třeba počítat s neideálním využitím prostoru stroje, kdy uspořádání ramen a efektoru zabírá značný prostor na průměr tiskového prostoru. Tiskový prostor je válcovitého tvaru, udává se tedy v průměru a výšce. [18, 19]

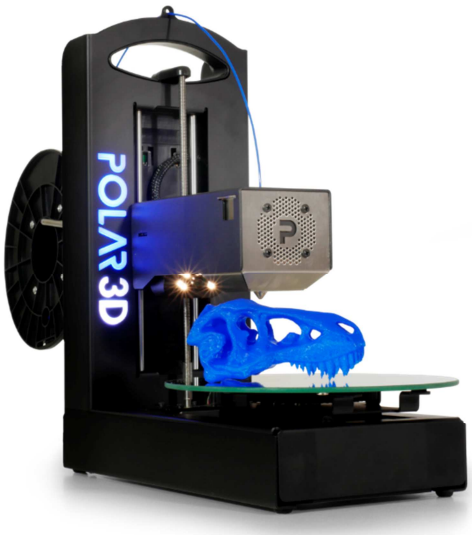


Obr. 5: Kartézské a delta kinematické uspořádání [20]

2.6.3 Polární

Polární typ konstrukce pracuje v polárních souřadnicích, je pro něj tedy typická rotující tisková podložka kruhového tvaru. Je to jediná konstrukce, kterou lze řídit pouze pomocí dvou motorů, kdy jeden motor řídí rotaci a zároveň pohyb podložky v ose vzdálenosti od středu (r), a druhý motor hýbe s tiskovou hlavou v ose Z. Tato varianta je ovšem velmi omezující a konstrukčně náročná. Běžnější je konstrukce se třemi

motory, kde dva motory řídí pozici tiskové hlavy, a to v ose Z a ose r, a třetí motor řídí natočení podložky. Konstrukce je velmi minimalistická, bývá poměrně lehká ale poměrně náročná na ovládání. Je potřeba mít specifická nastavení již pro slicer a rozlišení klesá se vzdáleností od středu, takže výsledek nemá stejnoměrnou kvalitu po celém objemu.



Obr. 6: Polární 3D tiskárna [21]

2.7 Další kartézské typy konstrukcí

V této kapitole budou přiblíženy vybrané typy konstrukcí. Budou popsány charakteristiky jednotlivých řešení, jejich výhody a nevýhody.

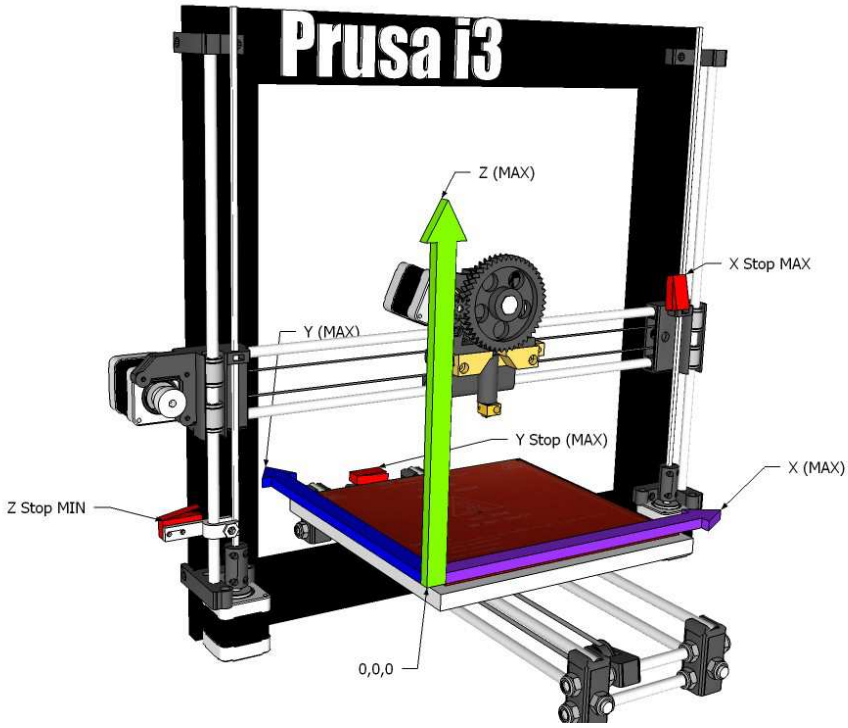
2.7.1 Průša i3

Nejvíce ikonickým představitelem dnešního, jak hobby, tak profesního 3D tisku je tiskárna typu Průša i3. Jedná se o třetí iteraci (proto i3) RepRap projektu modelu Mendel. Navazuje tedy na úplný začátek projektu, který má za cíl přiblížit tuto technologii široké veřejnosti, a to zjednodušením a dostupností. Konstrukce a konkrétní řešení je populární právě díky naplnění těchto požadavků. Původní konstrukce Mendel se značně zjednodušila – nyní má tiskovou platformu (podložku) pohyblivou v ose Y, která tvoří spodní, horizontální část rámu. K tomu je zhruba za polovinou připevněn charakteristický vertikální rám, na kterém je připevněna mostová konstrukce osy X, která se též pohybuje v ose Z, podél vertikálního rámu. Na mostovce je umístěna tisková hlava s přímým extrudérem. [22]

Stroj je řízen celkově pěti krokovými motory. Dva zpravidla menší motory, řízené paralelně, pohání osu Z, hýbou tedy s mostovkou ve vertikálním směru. Přesné polohy a vysokého rozlišení se dosahuje použitím trapézových šroubů se stoupáním 8 mm na otáčku. Díky tomuto má při použití krokových motorů s rozlišením 200 kroků

na otáčku rozlišení v pohybu osy 0,04 mm na přirozený krok. Tiskárna však pracuje se zjemňováním kroku pomocí mikro-krokování, které bude zmíněno dále, a je tak schopna dosáhnout ještě většího rozlišení. Jeden motor ovládá osu X a jeden osu Y. Y motor je připevněn k horizontálnímu rámu, zatímco X motor je připevněn k vertikální mostovce, tudíž se během práce tiskárny pohybuje spolu s mostovkou. Tyto motory předávají svůj pohyb pomocí ozubených časovacích řemenů, konkrétně typu GT2, šíře 6 mm s odstupem zubů 2 mm. Dle počtu zubů na použitých kladkách, běžně používaných 20 zubových, je dáno rozlišení těchto os na přirozený krok motoru. V tomto případě jde o 0,2 mm na krok, opět však platí, že je tiskárna ještě zjemňuje. [22]

Motory jsou řízeny elektronikou, založenou na Arduino Mega, která obsahuje 8-mi bitový mikrokontrolerem, který je rozšířen deskou RAMPS. RAMPS je rozhraní mezi mikrokontrolerem, ovladači krokových motorů a dalšími periferiemi 3D tiskárny, jako jsou topná tělesa, čidla a chladící ventilátory. [22]

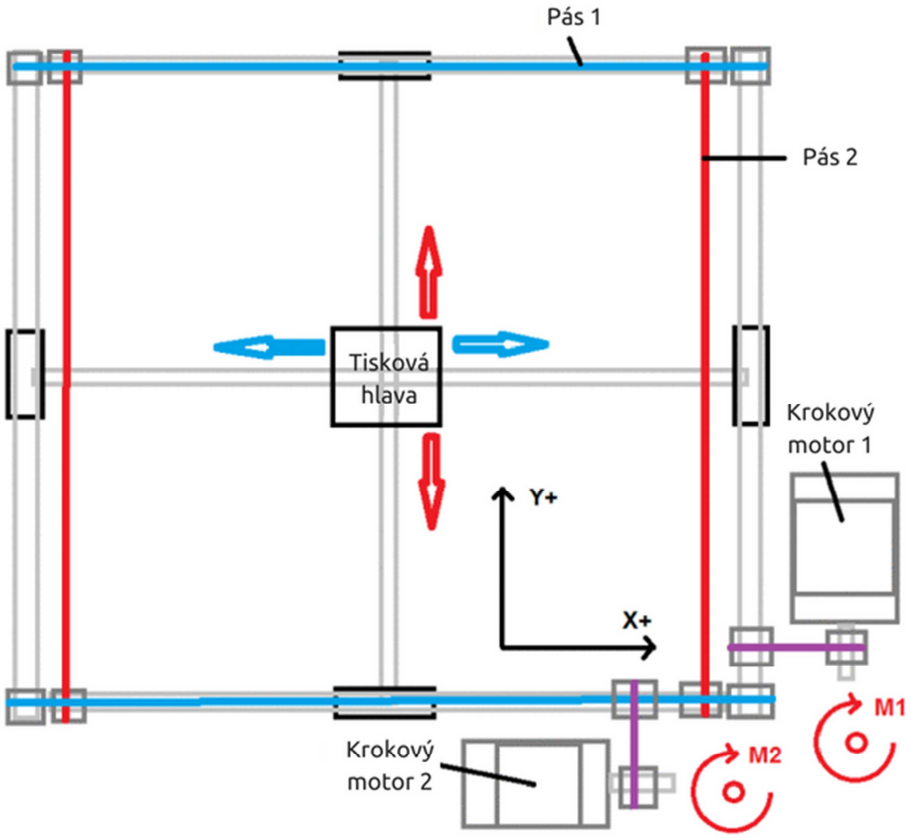


Obr. 7: Průša i3 [23]

2.7.2 Ultimaker

Konstrukce Ultimakeru je první zde popisovanou konstrukcí krychle nebo kvádru, anglicky označovanou jako „cube“. Tento typ konstrukce má základní výhodu v efektivním využití prostoru a často také v tuhosti rámu, který ji svým tvarem charakterizuje. V tomto uspořádání bývá zvykem, že osy X a Y se pohybují v jedné rovině, zde konkrétně v horní rovině krychle, a Z osa reprezentovaná tiskovou podložkou se pohybuje vertikálně ve vnitřním objemu. [18]

U této konstrukce je však zajímavý pohyb os X a Y. Každá je řízena jedním stacionárním motorem připevněným k rámu pomocí řemenů, které jsou upevněny ke dvěma křížícím se pohyblivým vodícím tyčím uvnitř tiskového prostoru a čtyřmi (dvěma na každé straně) rotujícími tyčemi. Obě trojice jsou vzájemné rovnoběžné a na sebe navzájem kolmé. Křížící se pohyblivé tyče nesou na sobě tiskovou hlavu, která na nich volně klouže. Rotující tyče zároveň nesou pohyblivé tyče druhé osy. Na obrázku č. 8 jsou osy rozlišeny barevně, hnací motory jsou propojeny skrze krátké uzavřené řemeny a jsou znázorněny fialově. [18]



Obr. 8: Paralelní (Ultimaker) kinematika [18]

2.8 Dostupné tiskárny

V následující kapitole budou přiblížena již hotová a dostupná řešení v oblasti 3D tisku. Budou popsány konstrukce těchto řešení, jejich vlastnosti, přednosti i nedostatky. Byli vybráni takové představitelé, kteří nejblíže reprezentují oblast zájmu této práce. Tito také nejvíce tuto práci ovlivnili a značnou měrou se od nich konečné řešení odvíjí.

Rozdělení dle dodaného stavu

Dostupné tiskárny lze předem rozdělit do tří rozeznatelných kategorií podle stavu, v jakém jsou dodány a jak je může uživatel dále upravovat:

- **DIY udělej si sám, stavebnice**

Velmi oblíbenou variantou domácích kutilů, modelářů a obyčejných spotřebitelů volí právě z této varianty, a to kvůli nízké ceně. V této kategorii lze najít často čínské stavebnice, které kopírují nějaký oblíbený design nebo z něj vychází. Balíček dorazí jako krabice plná dílů, kterou si uživatel nejenom musí poskládat sám, ale často musí i přijít na to jak. Záruky a zákaznická podpora obvykle neexistuje, a proto se nákup v této kategorii často nevyplácí. Další částí této kategorie jsou stavebnice projektu RepRap, které tvoří výjimku v dodávané dokumentaci, ale zde se velmi liší kvalita kus od kusu. Tiskárny stojí v rozmezí od 5 000 Kč do 20 000 Kč.

- **Otevřené designy**

Další kategorií jsou řešení, která jsou dodávána buď jako stavebnice, nebo jako již sestavené funkční stroje. Velkým rozdílem je zde však kvalita, záruka a zákaznický servis. Stavebnice mají spíše naplňovat roli levnější varianty spolehlivého řešení a nebývají primárním obchodním záměrem. Klíčovým pro tuto kategorii je otevřená licence, díky které je možné dostat se ke zdrojovým kódům, modelům a výkresům. Tiskárnu si díky nim lze upravit, opravit nebo vylepšit podle sebe. Do této kategorie spadají např. Original Průša nebo Ultimaker, či Formlabs. Ceny se pohybují od 20 000 Kč do 200 000 Kč.

- **Uzavřené a profesionální**

Poslední kategorií jsou tiskárny uzavřené. Dodávají se pouze jako hotová a neměnná zařízení určená pro okamžité použití. Mohou to být jak tiskárny určené široké laické veřejnosti, tak pro čistě profesionální a průmyslové použití. Tento typ tiskáren není svým zaměřením a nedostatkem dostupných informací pro tuto práci příliš relevantní. Za zmínku ale jistě stojí firmy jako Stratasys nebo 3Dsystems či český Ysoft. Velkých firem v této oblasti je však více, převážně kvůli množství technologií, které nacházejí v průmyslu uplatnění. Ceny se zde mohou pohybovat mezi 10 000 Kč – 200 000 Kč pro laické tiskárny, průmyslové tiskárny se mohou lehce vyšplhat s cenou i na desítky milionů Kč.

2.8.1 Průša i3 MK3

Nejnovější verze tiskárny Průša i3 Mk3 vyšla oficiálně v září 2017. Konstrukčně se liší od přechozí verze jen málo, zůstává její charakteristický tvar. Mění se však zpracování spodního rámu a osy Y, která je nyní tvořena hliníkovými profily a frézovaným hliníkem, což jí velmi přidává na tuhosti. Největším zlepšením je odnímatelná tisková podložka, která je tvořena ocelovým plátem z obou stran opatřeným PEI fólií. Ten se připevňuje k vyhřívané podložce pomocí magnetů, které jsou uloženy ve vyfrézovaných kapsách, zespodu podložky. Ocelový plát je flexibilní a je možné z něj hotové výtisky sundat prohnutím plátu. [24]

Dalším velkým zlepšením prošel extrudér, který má nyní podávací kolečka od firmy Bondtech. Kolečka jsou spřažena ozubením, působí tak na filament rovnoměrně z obou stran. Dále pak je zde přítomný optický senzor pohybu filamentu,

který dokáže detekovat mnoho běžných problémových situací při běhu tiskárny, jako například zaseknutí filamentu, docházející filament nebo ucpanou trysku. Vylepšení se také dočkal chladící ventilátor hotendu, nově je na tomto místě 40 mm ventilátor firmy Noctua s extrémně tichým chodem a zpětnou informací o otáčkách. Taktéž chladící ventilátor výtisku má zpětnou informaci o otáčkách a dostalo se mu i vylepšeného rozvodu vzduchu, takže teď chladí výtisk rovnoměrně v půlkruhovém otvoru. Nově je také indukční sonda vybavena vnitřním teploměrem a je tedy schopna kompenzovat tepelnou dilataci měření. [24]

V neposlední radě je zde vylepšená elektronika – nyní napájena 24V místo předchozích 12V. Umí detekovat výpadek proudu a obnovit po něm svoji práci. Je zde nová základní deska EINSY RAMBo, osazená ovladači krokových motorů od firmy Trinamic typu 2130, které dokážou vnitřně interpolovat mikro-krokování z 1/16 na 1/256. Dále pak dokáží detekovat ztrátu kroků a přes sběrnici SPI toto reportovat mikrokontroleru. Ten se díky tomu dokáže jednak obnovit ze ztráty pozice uprostřed tisku, jednak dokáže takto najít svoji výchozí pozici. Tyto ovladače také přinášejí velké ztišení přístroje, právě díky vysokému mikro-krokování. [24]

Tato tiskárna je k dostání ve formě stavebnice za 19.990 Kč, nebo jako hotový sestavený stroj za 26.990 Kč. Liší se také v poskytované zákaznické podpoře a záručních podmínkách. [24]

	Průša i3 MK3
Výrobní prostor	250 × 210 × 210 mm
Typ kinematiky	kartézská Mendel
Rozlišení vrstvy	50-300 µm
Tisková podložka	PEI (Ultem)
Kalibrace	automatická
Průměr trysky	0.4 mm (E3D V6)
Uzavřená komora	ne
Materiály	PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Ninjaflex, Laywood, Laybrick, Nylon, Bamboofill, Bronzefill, ASA, T-Glase, filamenty s uhlíkovým vláknem, polykarbonát...
Průměr struny	1.75 mm
Počet extrudérů	1
Cena	26 990 Kč (složená) 19 990 Kč (stavebnice)

Tab. 2: Vlastnosti tiskárny Průša i3 MK3 [24]

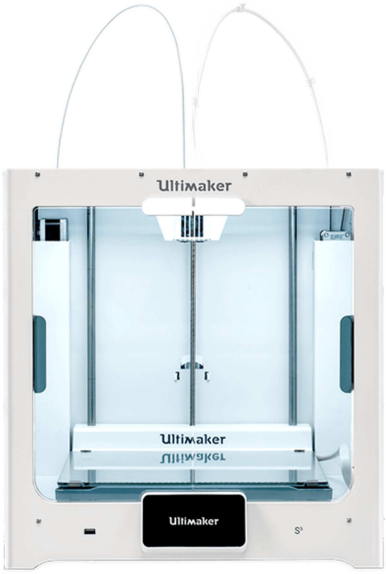
Obr. 9: Průša i3 MK3 [24]

2.8.2 Ultimaker S5

Nový model tiskárny od Ultimakeru S5 staví na ověřeném konceptu Ultimakeru. Přináší inkrementální zlepšení v mnoha vlastnostech oproti předcházející verzi 3. Větší tiskový prostor, plně automatická kalibrace podložky a polouzavřená komora jsou nejvýraznější z těchto změn. Dva extrudéry s mechanismem přizvedání neaktivní trysky a výměnná tisková jádra s tryskami 0.25/0.4/0.8 mm splňují potřeby detailních i rychlých tisků. Samozřejmostí je i barevný dotykový display s intuitivním ovládáním, možnost ovládat tiskárnu přes telefon či Wifi a v neposlední řadě i kamera ke sledování průběhu tisku. Model S5 je profesionálním řešením splňujícím potřeby různorodých uživatelů. [25]

	Ultimaker S5
Výrobní prostor	330 × 240 × 300 mm
Typ kinematiky	Paralelní Ultimaker
Rozlišení vrstvy	20-600 µm
Tisková podložka	Sklo/hliník
Kalibrace	automatická
Průměr trysky	0.25mm/ 0.4 mm/ 0.8 mm
Uzavřená komora	částečně
Materiály	Tough PLA, Nylon, ABS, PLA, PC, CPE/CPE+, PP, TPU 95A, PVA, Breakaway
Průměr struny	2.85 mm
Počet extrudérů	2
Cena	173 000 Kč

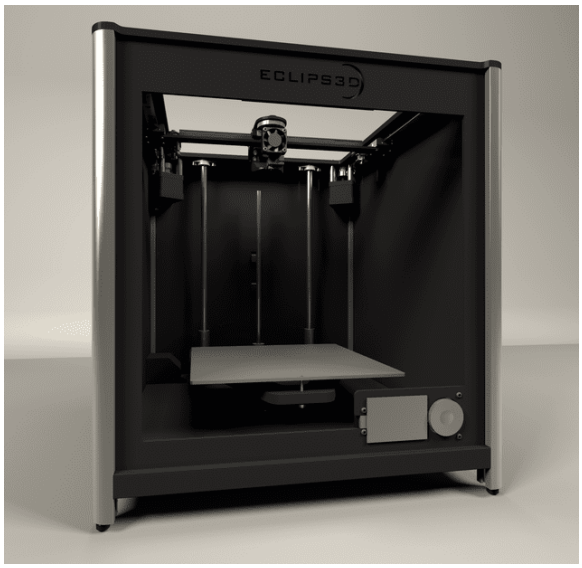
Tab. 3: Vlastnosti tiskárny Ultimaker S5 [25]



Obr. 10: Ultimaker S5 [25]

2.8.3 Eclips 3D2

Tato tiskárna se v mnoha ohledech odlišuje od ostatních v tomto seznamu. Je jediným zástupcem tiskáren DIY – prodává se jako částečná stavebnice, kde zbytek dílů je potřeba dokoupit samostatně. Vyžaduje tedy velké znalosti v oblasti 3D tisku a konstrukce tiskáren. Existuje kompletní model i seznam dílů, taktéž konfigurační soubor firmwaru a návod na sestavení a oživení. Tím však podpora ze strany prodávajícího a tvůrce oficiálně končí. Disponuje relativně malým tiskovým prostorem a kupující si musí být těchto skutečností předem vědom. Dále je to představitel kinematického uspořádání CoreXY, a díky tomu se také dostal na tento list. Autorovi této práce je velkou inspirací a slouží tak tedy jako základ tohoto projektu. [26]



Obr. 11: Eclips 3D2 [26]

	Eclips 3D2
Výrobní prostor	200 × 200 × 260 mm
Typ kinematiky	kartézská CoreXY
Rozlišení vrstvy	40 µm
Tisková podložka	BuildTak
Kalibrace	manuální
Průměr trysky	0.4 mm (E3D V6)
Uzavřená komora	částečně
Materiály	PLA, ABS, PET, HIPS, Flex PP, Ninjaflex, Laywood, Laybrick, Nylon, Bamboofill, Bronzefill, ASA, T-Glase, filamenty s uhlíkovým vláknem, polykarbonát...
Průměr struny	1.75 mm
Počet extrudérů	1
Cena	675 US$ (základní balíček) 550 US$ (další díly)

Tab. 4: Vlastnosti tiskárny Eclips 3D2 [26]

2.8.4 Formlabs Form 2

Výjimkou v tomto seznamu je tiskárna Form 2, pracující na principu SLA technologie. Je to jeden z nejdostupnějších zástupců, a proto se s ním lze setkat i v hobby dílnách a podnicích nespecializovaných jen na 3D tisk. Hlavním důvodem jsou nízké pořizovací náklady na stroj, které jsou kolem 100.000 Kč. Formlabs nabízí i řadu doplňkového vybavení jako je čistící stroj a vytvrzovací stroj. Nevýhodou je omezení použitelných materiálů na značku Formlabs, které nejsou nejlevnější na trhu. [27]

Obr. 12: Formlabs Form 2

3 NÁVRH ŘEŠENÍ

Tato kapitola se věnuje cílům tohoto projektu a předkládá návrhy řešení. Obsahuje rozbor dílčích součástí stroje a jejich zpracování dostupné na trhu a předkládá argumenty pro výběr jednotlivých komponentů pro realizační část.

3.1 Cíle práce

Cílem práce bylo navrhnout a sestrojit tiskárnu s konstrukcí pohybu os CoreXY s důrazem na kvalitu tištěných dílů. Důležitým faktorem bylo, že všechny díly a práce na konstrukci by měly jednoduše uchopitelné a proveditelné i laickou veřejností. Tiskárnu, praktický výstup tohoto projektu, si autor financoval sám a bylo tedy potřeba v návrhu počítat i s omezeným rozpočtem a s dostupnými možnostmi výrobních technologií v jeho lokalitě. Cílem také bylo zkonstruovat tiskárnu s největším možným potenciálem v oblasti kvality tisku a v oblasti funkčnosti tiskárny s možností stávající funkce rozšiřovat podle finančních možností majitele a potřeb vyplývajících z nároků kladených na kvalitu tisku.

Cíle práce a vlastnosti konečného zařízení by měly být následující:

- Dostatečný výrobní prostor vzhledem k ostatním parametrům
- Kinematické uspořádání typu CoreXY
- Efektivní využití vnitřního prostoru tiskárny
- Konstrukce s možností později uzavřít tiskový prostor pro lepší vnitřní tepelnou regulaci
- Dostatečně naddimenzovaná tisková hlava pro dva extrudéry
- Tisk celou běžně dostupnou škálou materiálů
- Tisková rychlost ideálně až 100 mm/s
- Rychlost posuvu až 250 mm/s
- Dostatečné rozlišení os pro kvalitní tisk
- Spolehlivost a trvanlivost stroje
- Tuhost rámu na úrovni komerčních tiskáren
- Finanční rozpočet 20.000 Kč

3.2 Dílčí součásti tiskárny

Následující kapitola se zabývá důkladnějším popisem jednotlivých dílčích součástí tiskárny, vzhledem k cílů a požadavkům této práce. Nastiňuje také dostupná hotová řešení a vysvětluje, proč bylo které zvoleno. Zabývá se také vlivem těchto součástí na kvalitu a parametry tisku, jejich vzájemnou kompatibilitu a ovlivňování dalších komponent. Čtenář zde dostane důležitá porovnání a může si tak přizpůsobit své řešení jeho situaci a potřebám.

3.2.1 Konstrukce

Tato podkapitola se věnuje návrhu nejvhodnější konstrukce. Vzhledem tomu, že se konstrukcemi zabývala již kapitola 2.6, bude následující text na získaných informacích stavět.

Vzhledem k zadání a požadavkům na tiskárnu vychází jako nejvhodnější konstrukce kartézská typu „cube“, která přináší velkou tuhost rámu, lehce uzavíratelný vnitřní prostor, je vhodná pro kinematiku CoreXY a při správném použití lze dosáhnout velmi efektivního využití vnitřního prostoru.

Delta a polární kinematické konstrukce stojí mimo rámec zadání, proto pro účely této práce nejsou vhodné. Konstrukce typu Průša nevyhovuje požadavkům na efektivní využití vnitřního prostoru a je také obtížné tuto konstrukci dodatečně uzavírat pro tepelnou regulaci tak, aby byla zachována jednotvárnost stroje. Důvody pro ne-výběr dalších kinematických uspořádání v rámci konstrukce typu „cube“ (Ultimaker a H-bot) řeší podkapitola č. 3.2.3.

3.2.2 Rám

V oblasti materiálů pro zpracování rámu, bylo na počátku na výběr mnoho možností, většina z nich však nesplňovala základní požadavky tuhosti a bezpečnosti. Níže je shrnuto, jaké možnosti byly na výběr a jaké měly přednosti a nedostatky:

- Tištěné díly: nehodící se jak pro použití na základní materiál rámu, tak ani jako spojovací a přechodový materiál uvnitř tiskárny. Jejich neideální mechanické vlastnosti a nízká tepelná odolnost zamezuje jejich použití uvnitř vyhřívané komory.
- Dřevo: cenová dostupnost a jednoduché zpracování běžným ručním nářadím nevyvažuje bezpečnostní rizika spojená s použitím dřeva při vyšších teplotách.
- Plexisklo: zpracování plexiskla je náročnější než u dřeva, nedisponuje velkou teplotní odolností a modularita je omezená vnášeným pnutím při vrtání způsobující štípání.
- Ohýbaný svařovaný plech: za vyšší náklady lze získat dostatečnou tuhost rámu, který dostává profesionální vzhled, ale modularita je značně omezena náročností zpracování.
- Hliníkové profily: vynikají modularitou a možností upínání, poskytují dostatečnou tuhost a teplotní odolnost. Nevýhodou jsou jejich vysoké pořizovací náklady.

V konečném výběru tedy zvítězily hliníkové profily, které poskytují rámu velkou tuhost, profesionální způsob upínání dalších komponent tiskárny a dodávají profesionální vzhled. Jsou také dostatečně tepelně odolné pro použití s vyhřívanou komorou a nepředstavují bezpečnostní riziko v případě požáru. Jsou tedy jasnou volbou i pro jiné typy konstrukcí a i zde budou kombinovány s ostatními materiály pro dosažení specifických požadavků.

Velikost tiskového prostoru

Otázka velikosti tiskového prostoru nabývá na komplikovanosti, zjistíme-li, kolik různých faktorů ovlivňuje. Samozřejmě čím větší tiskový prostor, tím větší díly, nebo více stejných menších dílů je stroj schopen vytisknout. Co však nemusí být na první pohled zřejmé, je zvětšující se okolní rám a pojezdy tiskárny, aby měly dostatečný rozsah v tiskovém prostoru. S tím se však také musí zvětšovat tuhost komponentů tak, aby byla zachována celková tuhost a tolerance stroje. [28] Toto výrazně navyšuje cenu stroje, jak je vidět například na obřím stroji bigrep-one [29] s tiskovým prostorem přes jeden kubický metr a cenou okolo milionu korun.

Se stejným tiskovým rozlišením se zvyšuje i délka tisku. Obecně platí, že zvětšením objektu v jedné ose dvakrát se tiskový čas zdvojnásobí. Z toho plyne, že zvětšíme-li objekt ve třech osách, tiskový čas se zosmínásobí. Analogicky toto platí i pro tiskový prostor. [28] Pro potřeby této práce se vycházelo ze standardní velikosti tiskové podložky 200x200 mm, kterou používá např. Průša i3. Vzhledem k zamýšleným vlastnostem tiskárny bylo ovšem rozhodnuto tiskový prostor co možná nejvíce zvětšit. O finální velikosti podložky 300x300 mm rozhodla kompatibilita dalších dílů. Velikost tak splňuje požadavky na větší funkční díly než 200 mm ve dvou osách, a zároveň je dostatečně malá pro pozdější uzavření stroje a aplikaci vyhřívané komory.

3.2.3 Kinematické uspořádání

Kinematické uspořádání tiskárny Core XY sice bylo dáno prvotním zadáním, avšak autor po přezkoumání ostatních možností došel k závěru, že jej zvolí pro aplikaci nejen kvůli zadání, ale také díky jeho vlastnostem. Některé kinematické systémy byly již představeny v přechozích kapitolách, tato část se bude detailněji věnovat uspořádání CoreXY a H-bot.

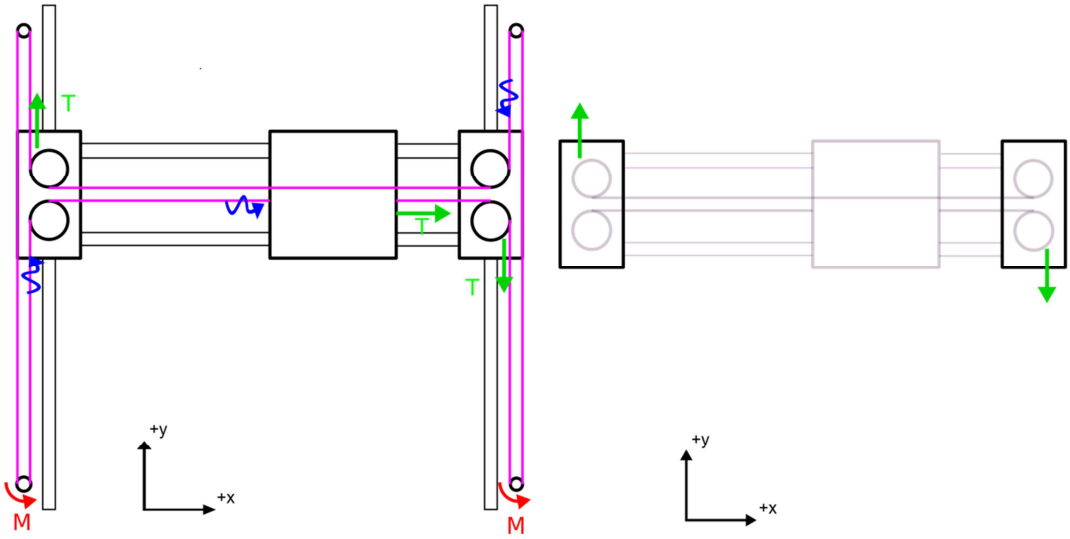
Paralelní uspořádání Ultimaker

Toto uspořádání představuje jednoduchost v přímém převodu mezi motorem a osou. Je to ověřené uspořádání ve spolehlivých tiskárnách firmy Ultimaker. Má nízkou váhu pohybujících se prvků a stacionárně uložené motory. Používá hlazené lineární vodící tyče, které jsou v nejvyšší kvalitě levnější, než jiná řešení ve stejné kvalitě. Jednotlivé uzavřené řemeny jsou také kratší, než u jiných řešení, avšak celkové délky řemenů jsou u CoreXY i Ultimaker stejné. H-bot má řemen celkově o ¼ kratší. Nevýhodu představuje náročné vypínání delších řemenů, celková komplexnost a obtížná modifikovatelnost upořádání. Velmi náročnou komponentou jsou ložiska, která musí být schopna lineárního a rotačního pohybu zároveň. [18]

Uspořádání H-bot

Uspořádání je založené na jednom dlouhém řemeni a rameni, které spojuje dva rovnoběžné lineární posuny. Na rameni se nachází další lineární posun, na kterém je upevněna tisková hlava. Dva stacionární motory ovládají přes soustavu kladek (v rozích prostoru a na rameni) pozici tiskové hlavy. Systém je poněkud složitější, protože každý z motorů pohybuje tiskovou hlavou v obou osách rovnoměrně, tedy

k získání pohybu v jedné ose se musí složit pohyb obou motorů. Z obrázku č. 13 je však patrný největší problém tohoto uspořádání, a to při pohybech v ose X, kdy napínané řemeny vytváří kroutící moment na rameno, které se může na nedostatečně tuhých rámech zaseknout.

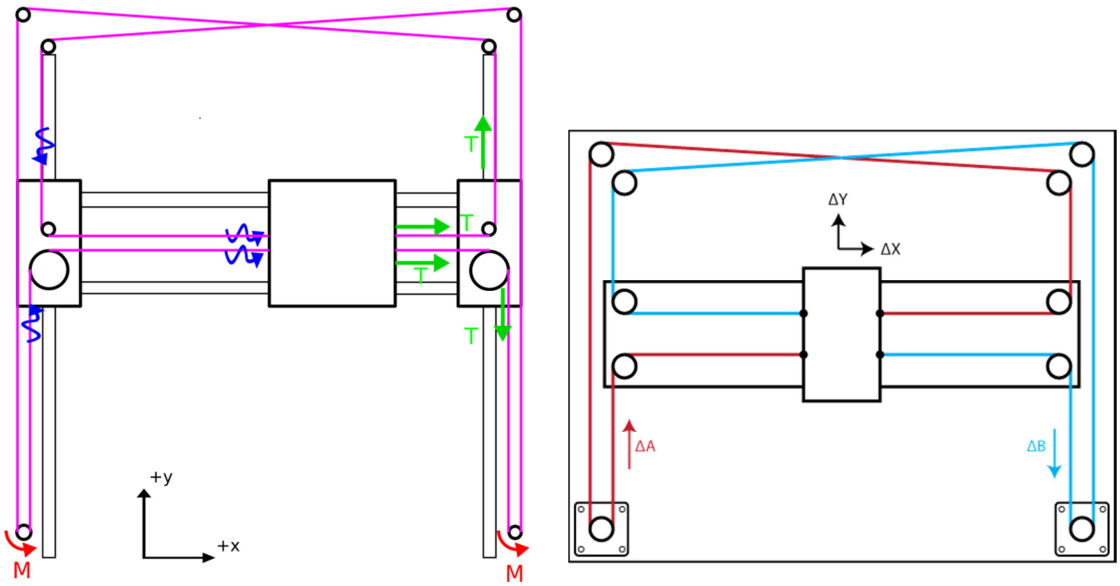


Obr. 13: Uspořádání H-bot [30]

Uspořádání CoreXY

Uspořádání vychází z H-bot s tím, že řeší jeho inherentní problém – křížení ramene. Toho se dosahuje dvěma nezávislými smyčkami řemenů, které jsou pevně spojeny s tiskovou hlavou. Z obrázku č. 14 je patrné křížení řemenů. Řeší se umístěním řemenů do dvou rovnoběžných rovin – křížení při pohybu po rameni již nevzniká, jak je patrné z obrázku. Z následující rovnice je patrný výpočet pohybu os z pohybů motorů. [31]

$$(1)\ \Delta A = \Delta X + \Delta Y, \Delta B = \Delta X - \Delta Y$$



Obr. 14: Uspořádání CoreXY [30, 31]

Uspořádání CoreXY bylo tedy zvoleno vzhledem k jednoduchosti jeho rozměrové modifikace a pozitivním vlastnostem, jako je nenáročnost na použité komponenty, rychlost a lehkost tiskové hlavy, stacionární motory a práce s kartézskými souřadnicemi.

Z hlediska komponent použitých ke stavbě lineárního vedení byly k dostání dvě základní řešení: lineární vodící tyče a lineární kolejnicové vedení. Jak již bylo zmíněno vodící tyče jsou v porovnání s kolejnicemi levnější ve stejné kvalitativní třídě. Byly však zvoleny kolejnice kvůli jednoduchosti způsobu montáže na hliníkové profily a také k ušetření místa na rameni uspořádání. Vodící kolejnice má jen jeden stupeň volnosti oproti dvěma, které má vodící tyč. Na rameni by tedy musely být použity dvě vodící tyče, což celou konstrukci zbytečně komplikuje. Nenáročnost uspořádání na křížení dovoluje použít i vedení nižší kvality.

Na osu Z byl použit nejprve jeden motor s trapézovým šroubem a dvě vodící tyče pro vymezení pohybu. Následující testování však ukázalo, že zvolené řešení není dostatečné, tedy pohybový aparát osy Z byl zdvojnásoben na čtyři vodící tyče a dva trapézové šrouby se dvěma paralelně spřaženými motory.

3.2.4 Hotend

Hotend – horký konec je klíčovou součástí tiskárny FDM. V něm se zahřívá a taví plastové vlákno, které je pak nanášeno do tiskového prostoru. Je tedy zřejmé, že tato součást se musí pohybovat s tiskovou hlavou a tím tvoří výsledný objekt. Jak lze vidět na obrázku č. 15, hotend se skládá z několika klíčových součástí: trysky, topného bloku, topného tělesa, termistoru, tepelně přechodového dílu zvaného „heatbreak“, chladiče, ventilátoru a často také teflonové trubičky a jejího zámku.

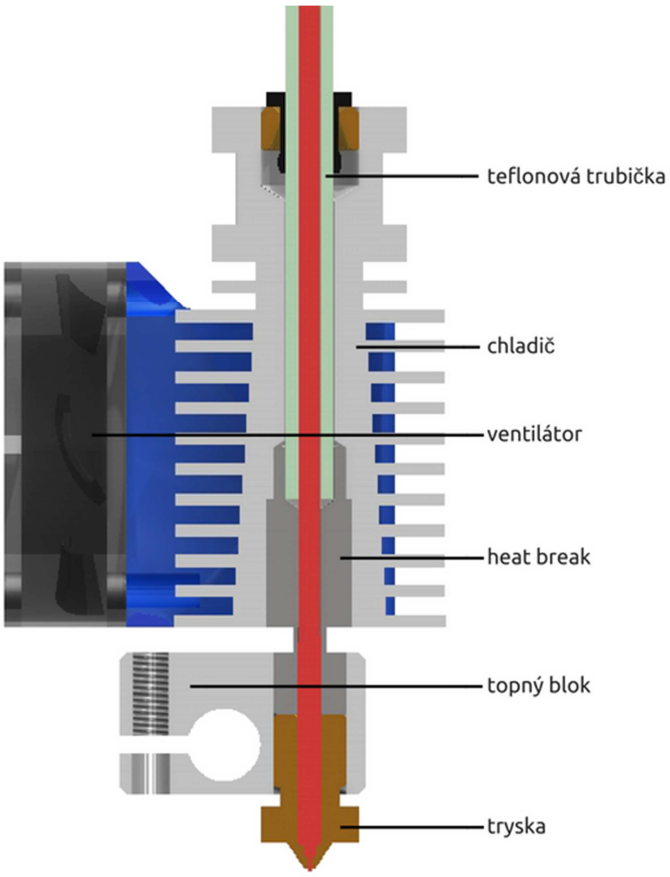
Tryska má na svém konci přesně vyvrtaný otvor o velikosti jí nominální, běžně se jedná o 0,4 mm průměr. Tím udává rozlišení stopy extruze [32], která je klíčová pro reprodukci detailů v rovině vrstvy. Vyrábí se z mosazi, která se dobře obrábí a také dobře vede teplo. Vyrábí se i verze z oceli a tvrzené oceli kvůli větší odolnosti proti otěru.

Topný blok bývá vyroben z hliníku a slouží jako montážní prvek pro trysku, heatbreak, topné těleso a thermistor. Jeho druhým účelem je rovnoměrná distribuce tepla z topného tělesa do všech připojených součástí. Topný blok bývá dodatečně obalený izolací pro stabilnější tepelný přechod a lepší regulaci teploty uvnitř bloku. [33]

Heatbreak má dva účely: spojit topný blok s chladičem a vytvořit mezi nimi v jeho krčku co největší teplotní skok. V podstatě má sloužit jako přechodový izolační prvek mezi horkou a studenou částí hotendu. [33]

Chladič má za úkol tento tepelný skok udržovat tak, aby vlákno bylo co možná nejdelší dobu v tuhém stavu, aby mohlo samo sebe tlačit dále do trysky. K výměně tepla přispívá ventilátor, který žene kolem žeber chladiče studený vzduch z okolního prostoru. Pro použití v uzavřené vyhřívané komoře se používá chlazení vodou, která se chladí v radiátoru mimo vyhřívanou komoru. [33]

Teflonová trubička slouží ke správnému vedení filamentu do trysky, její nepřilnavé hladké stěny zamezují přilepení filamentu. Trubička může mít i velkou délku v uspořádání typu bowden, kdy také podporuje filament v podélném směru a podílí se tak na tlačných silách, které vytváří extrudér. Více o něm pojednává podkapitola č.3.2.5. [33]



Obr. 15: Schéma hotendu [34]

V době výběru byli v nabídce tři zástupci:

- E3D V6 (1 800 Kč)
- Čínská kopie E3D V6 (5-10 $)
- Prometheus V2 (89 $)
- Rebelmod V2 (900 Kč)

Po seznámení se s uživatelskými recenzemi výše zmíněných bylo rozhodnuto pro první variantu E3D V6. Spojuje v sobě výhody provedení, kdy teflonová trubička zasahuje až k teplé zóně a tím omezuje maximální dosažitelnou teplotu, a celokovového provedení, kdy trubička nemusí být přítomná vůbec. Klíčovým prvkem je zde heatbreak, který má přesně vyhlazené stěny, takže se k němu měknoucí materiál nepřichytává.

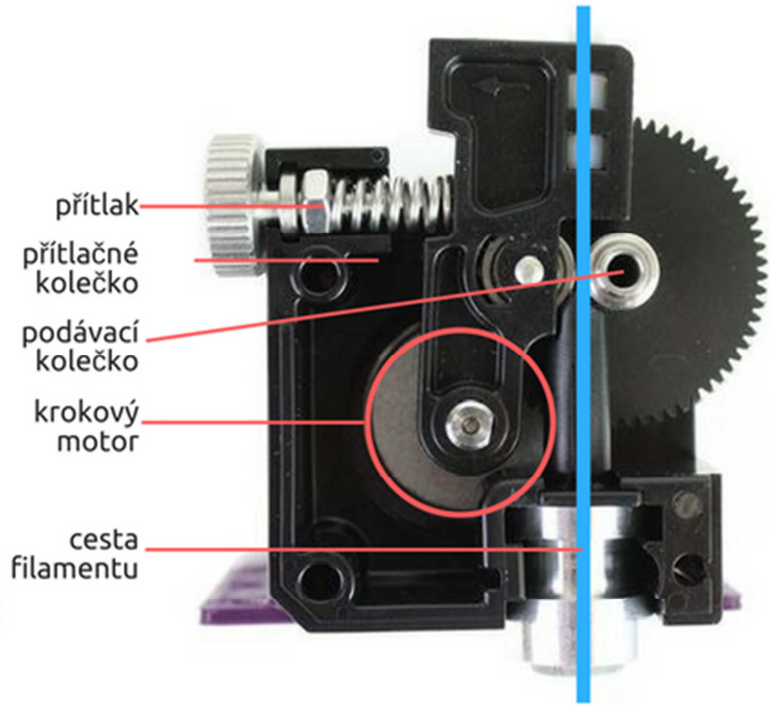
E3D také nabízí řadu doplňujících trysek o široké škále průměrů vyrobených z několika materiálů pro naplnění různých potřeb i exotických tiskových materiálů. Vybrané řešení umožňuje spolehlivý tisk jak PLA, které vyžaduje velký teplotní skok, tak i všech dalších běžně dostupných materiálů, a to velice spolehlivě. Tímto naplňuje dva cíle práce, a to různorodost tiskových materiálů a spolehlivý chod tiskárny. [35]

3.2.5 Extrudér

Extrudérem se u komponent 3D tiskárny myslí sestava dílů sestávající se z tlačného motoru, podávacího kolečka, přítlačného kolečka a úložného pouzdra, jehož účelem je tlačit filament směrem k hotendu a trysce. Existují dvě základní rozdělení extrudérů: podle spojení s hotendem (přímé nebo bowdenové = spojení přes teflonovou trubičku) a podle převodování motoru (přímé nebo převodované). Motor může pohánět filament pomocí ozubeného podávacího kolečka přímo, nebo mezi nimi může být převod. Může také být přímo součástí tiskové hlavy a být napojen na hotend, nebo může být s hot endem spojen delší teflonovou trubičkou. Převodování dodává motoru větší sílu, ale také rozlišení, které je pro přesné dávkování velice důležité. Umístění extrudéru na rám má sice za následek snížení váhy tiskové hlavy, ale nese s sebou nepřesnosti způsobené vůlí v teflonové trubičce. [33]

Většina výrobců tiskáren používá vlastní návrhy extrudérů, přesto jsou na trhu k dostání hotová řešení jako například tyto:

- E3D titan extruder (57 GBP)
- Čínská kopie E3D titan (20 usd)
- Bondtech (155 $)



Obr. 16: Schéma extrudéru [36]

Vzhledem k vysoké ceně a nesnadné montáži ve verzi přímého extrudéru, byl v návrhu řešení zavržen Bondtech extrudér, který jako jediný používá dvou spřažených podávacích koleček, které dokáží na filament vyvinout větší sílu, než filament začne prokluzovat. Ani originální titan není v cenově přijatelné kategorii, autorem byla tedy zvolena jeho čínská kopie zakoupena na portálu Aliexpress. Ta se nakonec i přes drobné rozměrové chyby ukázala jako dobrá volba, jelikož zvládla zkopírovat všechny dobré vlastnosti originálu. Má tedy malé, lehké, plastové tělo, 3:1 převodový poměr mezi motorem a podávacím kolečkem a jednoduše přístupné podávací kolečko s možností manuálního posunu. Dále má páčku na rychlé vyjmutí filamentu a nastavitelný přítlak přítlačného ložiska.

Z hlediska vylepšení tiskárny je třeba ještě zmínit tisk více materiály automaticky. Výrobci k tomuto přistupují různě, zatím nebylo představené univerzální a spolehlivé řešení. Jeden přístup přidává celé další trasy pro filament včetně hotendů a extrudérů, což má ale za následek zvyšování váhy tiskové hlavy a při potřebě použít více než dva extrudéry je řešení nepraktické a velmi drahé. Druhý přístup se snaží cesty filamentu spojit před hotendem, tento přístup je ale zatím velmi poruchový.

3.2.6 Heatbed a kalibrace

Tato podkapitola pojednává o tiskových platformách, na které se začíná objekt tisknout a na kterých je po celou dobu tisku objekt přichycen pouze vzájemnou přilnavostí. Dalším jejich důležitým účelem je tištěný materiál udržovat těsně pod hranicí přechodové teploty, většinou se jedná o teplotu skelného přechodu. Materiály s vyšší teplotní odolností by se bez vyhřívané podložky ani nemusely přichytit a došlo by ke znemožnění tisku. Vyhříváním podložky lze docílit kontrolovatelného úbytku teploty u materiálů a snížit teplotní rozdíl v materiálu, který způsobuje nerovnoměrné smršťování výrobku a vede k chybám tisku popsaným v kapitole o materiálu ABS.

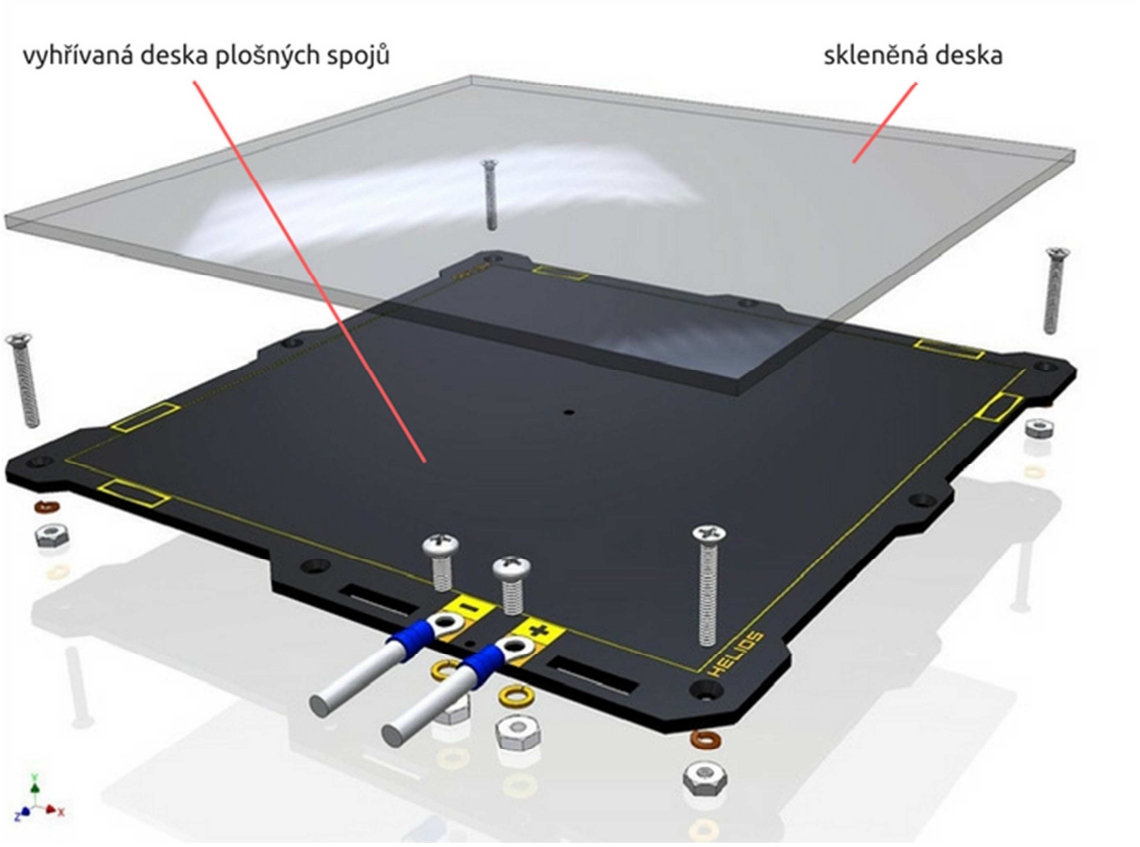
Je také nutné, aby podložka byla co možná nejrovnější a nevnášela tak příliš velké nepřesnosti do jednoduchého trojosého mechanismu jakým je 3D tiskárna. Tyto nepřesnosti lze kompenzovat za použití softwarového algoritmu a čidla, které je schopné měřit vzdálenost mezi podložkou a špičkou trysky.

Běžnou praxí výrobců tiskáren je použití desky plošných spojů s odporovým drátem jako topné těleso přikryté skleněnou deskou pro vyrovnání povrchu. Druhým řešením bývá použití hliníkové desky jako základu, na kterou je ze spodní strany připevněna silikonová podložka s odporovým drátem jako topné těleso a na vrchní straně je přilepena tenká fólie PEI (materiál také známý jako Ultem [37], která tvoří adhezivní mezivrstvu.

Na vrchní stranu tiskových platforem lze na trhu najít několik hotových řešení, například oblíbenou adhezivní tiskovou podložku BuildTak. [38] Dalším řešením jsou celé desky, které lze použít jako samostatnou platformu, jako např. Zebra plate. [39]

V tomto projektu byla použita kombinace hliníkové desky a silikonového topného tělesa a skla. Bylo zvoleno topné těleso napájené 230V AC, a to z důvodu řádově většího výkonu než řešení pro 12V nebo 24V. Další výhodou tohoto použití

je přesměrování vysokého výkonu podložky mimo zdroj a řídící elektroniku, která by na takové zatížení nebyla dimenzovaná, použitím polovodičového relé spínaného výstupem z řídící desky. Použití hliníkové desky s PEI nebo jiným adhezivním povrchem by zde možná bylo i vhodnější, vzhledem k zamýšlenému použití, avšak zvolené řešení splňuje požadavky na tisk a zároveň bylo autorovi dáno darem, čili umožnilo ušetřené finance směřovat do jiných sektorů projektu. Tisková podložka je na tuhém rámu konstrukce osy Z připevněna pomocí odpružených šroubů v rozích podložky. Kalibrace se provádí mechanicky – probíhá utahováním a povolováním šroubů.



Obr. 17: Schéma vyhřívané podložky [40]

3.2.7 Řídící elektronika a Firmware

Tato podkapitola se zabývá řídící elektronikou, firmwarem (softwarem této elektroniky) i dalšími elektronickými komponenty tiskárny jakou jsou krokové motory a obrazovky.

Řídící deska

Pro řízení jednoduchých 3D tiskáren jako jsou tiskárny typu FDM, kde není zapotřebí disponovat velkým výpočetním výkonem nebo velkým počtem vstupů a výstupů, se běžně používají řídící desky osazené obvykle 8-mi bitovým mikrokontrolerem. Příkladem může být často používaná deska Arduino [41], rozšířená pomocí interface desky RAMPS. [42] Ta zprostředkovává spojení mezi řídícím centrem elektroniky – mikrokontrolerem a periferiemi tiskárny. Těmi jsou vstupy a výstupy:

řízené krokové motory a topná tělesa, chladící ventilátory, teplotní čidla, poziční čidla a případné obrazovky a úložiště.

Existují ale i řešení spojující řídící desku a interface do jednoho celku, např. deska RAMBo [43], která v sobě spojuje řešení výše zmíněné. S rostoucími uživatelskými požadavky na jednoduchost ovládání a funkcionalitu – tedy souborem funkcí, které směřují hlavně na rychlost tisku, přestávají pro ovládání přes plně grafické dotykové displeje a síťový přístup 8-mi bitové mikrokontrolery stačit. Byla vytvořena tedy řešení na silnějších 32-ti bitových ARM-ových mikroprocesorech, jako je např. Smoothieboard, poskytující dostatečný výkon. [44]

Firmware

Úzce je s použitým hardwarem (HW) propojen i jeho řídící software (SW) označovaný jako firmware. Jde o řídící SW nízké úrovně, který zprostředkovává chod mikrokontroleru. Tato práce se zabývá zejména HW návrhem tiskárny, takže základním požadavkem na řídící SW a HW byla jednoduchost instalace a konfigurace bez omezení funkcí. Nejrozšířenějším SW byl v době vzniku této práce firmware Marlin [45] pro již zmíněné desky Arduino a RAMBo a mnoho dalších. Populární se stal díky rozšíření řešení HW Arduino + RAMPS, který bylo nejdostupnější v době rozmachu domácího 3D tisku. Z firmwarů podporujících 32-bitové systémy byl dispozici SW Smoothieware [46], který byl zvolen z důvodu jednoduché instalace a konfigurace a také z důvodu obsáhlé a strukturované dokumentace, která celý proces návrhu výrazně zjednodušila a urychlila.

Po zvolení firmwarového řešení bylo tedy třeba zvolit i vhodné HW řešení – zde se nabízela dvě dostupná řešení: deska Smoothieboard V1 a deska Azteeg X5 mini. [40]

	Smoothieboard V1	Azteeg X5 mini
Mikrokontroler	NPC LPC1769	NPC LPC1769
Připojení	USB, Ethernet, SD karta	USB, Ethernet, SD karta
Typ driveru	SD5984	SD5984
Připojení driverů	pevné	Pololu
Počet driverů	3-5	4
Nastavení proudu	skrze čip	skrze čip
Spínané výstupy	2-6	4
Teplotní vstupy	4	2
Koncové spínače	6	4
Vstup napájení	12V / 24V	12V / 24V
Cena	186.00 € (+15€=236$)	113$ (+15$=128$)

Tab. 5: Srovnání Smoothieboard V1 a Azteeg X5 mini [40, 46]

Vzhledem vysoké ceně první zmíněné desky a tomu, že větší funkcionalita nebyla pro dané použití zapotřebí, byla zvolena druhá varianta.

Interface

Řídící elektroniku lze ovládat buďto spojením s počítačem pomocí USB kabelu, nebo pomocí připojeného displeje s ovládacím prvkem (nejčastěji rotační enkodér a tlačítka). Bylo zvoleno osadit tiskárnu displejem tak, aby stroj mohl případně operovat samostatně.

V balíčku společně s deskou byla zakoupena také obrazovka mini Viki LCD. [40] Ta sice disponuje přímým napojením na zvolenou desku, je však zbytečně drahá v poměru s RepRapDiscount Full Graphic Smart Controller [47], kterou by autor po zkušenostech spíše doporučil použít.

V rámci interface se také řeší způsob dávkování souboru a nahrávání souborů G-CODE do řídící elektroniky. Při připojení k počítači pomocí USB dávkuje G-CODE ovládací software běžící na počítači. Další variantou je nahrání souboru na SD kartu, ze které si instrukce dávkuje sám řídící SW. V tomto řešení jsou použitelné obě varianty.

Krokové motory

Pro pohon 3D tiskáren se obvykle používají krokové motory. Jsou voleny z důvodu nízké ceny, jednoduššího řízení (v porovnání s AC nebo DC motorem) a možnosti přesného pozicování. Krokové motory se namísto kontinuálního pohybu pohybují v diskrétních krocích. Natočení z jednoho kroku do dalšího probíhá sepnutím další fáze, reprezentované cívkami uvnitř statoru. Řízení po celých krocích je příliš trhavé a motor nemá dostatečné rozlišení (běžně 200 kroků na otočku), bývá tedy běžně použito mikrokrokování. [33]

Mikrokrokování je proces, kdy ovladač krokového motoru nepřepíná fáze naráz, ale podle úrovně mikrokrokování, čímž dochází k natočení mezi jedním a druhým krokem plynuleji. Ovladač krokového motoru musí být k tomuto nastaven a řídí motor s informací o směru dle pulzů od mikrokontroleru. Nejedná se ale o uzavřenou smyčku řízení, řídící elektronika pouze odhaduje pozici podle počtu odeslaných pulzů a změn směru. Jsou tedy nutné limitní spínače polohy, které zajišťují referenční body na osách. [48]

V práci jsou použity krokové motory standardu NEMA 17 [49], který definuje rozměry čela motoru, rozteč a umístění montážních děr. Byl použit typ 17HS8401 pro osy XYZ vzhledem k jeho dobrým specifikacím. Tedy silný přídržný moment 52 Ncm a nízká induktance 3,2 mH. Pro extrudér byl použit motor SX17 - 1003VLQCEF pro jeho malé rozměry a nízkou cenu.

Koncové snímače

Koncové snímače jsou zařízení schopná detekovat stav stroje (např. pozici některé osy) a lze je rozdělit do tří kategorií – mechanické, optické a indukční. Mechanické spínače fungují na jednoduchém principu tlačítka, kdy dochází k mechanickému spojování a rozpojování obvodu. Optické spínače fungují na principu optické brány – mají zdroj a senzor elektromagnetického záření a kontrolují, zda záření dopadá na senzor nebo ne.

Indukční senzory pracují na principu elektromagnetické indukce – jsou bezkontaktní, ale vyžadují pro svoji funkci, aby snímaný povrch byl dostatečně vodivý. [50]

V této práci je použita kombinace mechanických a optických senzorů, a to z důvodu jejich nízké pořizovací ceny a snadného zapojení a užití.

Zdroj

Napájecí zdroj zpracovává síťové napětí 230V AC a mění jej na použitelné napětí pro elektroniku 3D tiskárny. Vzhledem k použitým komponentům a běžné praxi byl použit průmyslový zdroj na 12V. [33]

3.3 Návrh parametrického modelu konstrukce

Tato podkapitola se zabývá procesem návrhu konstrukce, modelováním a sestavováním jednotlivých dílů tiskárny. Modelování bylo prováděno v parametrickém programu Autodesk Inventor, který byl použit v rámci studentské licence. Část modelů byla získána z otevřeného designu Eclips3D, zbývající modely byly vytvořeny v procesu navrhování za pomoci nákresů zakoupených dílů. Návrh vychází z designu Eclips3D, ze kterého se postupně odchyluje z důvodu použití jiných dílů a přístupu ke zpracování návrhu. Postup návrhu se řídil převážně aktuálně dostupnými díly ovlivňovanými jejich vzájemnou kompatibilitou. V rámci kapitoly budou popsány i iterační změny designu, vycházející ze zkušeností načerpaných konstrukcí předcházející verze. Soubory modelů a jejich vizuálních reprezentací se nachází na přiloženém CD. Tyto přílohy lze také najít v příložné sekci této práce.

3.3.1 Návrh první

Následující část se bude zabývat prvním návrhem dílčích sestav. Primárně vychází z dostupných komponent. Jeho reprezentací je soubor *Příloh č.1*, který je k dispozici na přiloženém CD je dále řazen abecedně. Tyto přílohy lze také najít v příložné sekci této práce.

Rám

První návrh vnějšího rámu vycházel z dostupnosti několika dílčích komponentů. Jednalo se o 3 lineární kolejnicové pojezdy pro osy XY o délce 400 mm a šířce kolejnice 12 mm. Dále pak dvě hlazené vodící tyče pro osu Z o průměru 12 mm a délce 340 mm. Byla tedy navržena kubická konstrukce z vymodelovaných hliníkových profilů. Model vychází ze čtyř rohových profilů a dvou smyček profilů uzavírajících horní a spodní patro. Pro uchycení vodících tyčí osy Z byl přidán další profil do zadní části rámu. Délka bočních profilů byla zvolena vzhledem k délce vodících kolejnicí, tedy 400 mm. Délka předních a zadních profilů byla zvolena ještě s rezervou pro vedení řemenů potřebných ke kinematice. Výška konstrukce byla zvolena tak, aby pojala rovinu tiskové hlavy, celý možný pojezd osy Z a prostor pod dnem tiskárny tak, aby byl dostatečně dimenzovaný pro uložení řídící elektroniky a zdroje.

Byly vymodelovány nutné díly pro zkompletování sestavy rámu a byla provedena rozměrová kontrola. Model byl sestaven bez spojovacího materiálu. Výjimku tvoří spojovací materiál sloužící k rozměrové kontrole. Viz *Příloha č.1a.*

Osy X, Y

Návrh kinematického uspořádání os X a Y vychází ze zvoleného uspořádání CoreXY. Byla však zvolena varianta nekřížících se řemenů z designu Eclips3D. Zde jsou dvě smyčky řemenů umístěny do dvou rovnoběžných rovin. Bylo zvoleno stejné řešení rozdělení rovin pomocí dílu vyřezaného z železného plechu, sloužícího jako montážní prvek pro všechny další díly osy X. Má tedy montážní díry pro dva rovnoběžné vozíčky lineárního vedení na koncích, uprostřed pro kolejnici vedení osy X a mezi nimi pro uchycení kladek vedení řemenů.

Vodící kolejnice osy Y byly umístěny na spodní stranu vrchního prstence profilů pomocí hliníkových matic v profilech po celé délce vodících kolejnic. Motory pohánějící soustavu byly umístěny na pomocný profil upnutí osy Z, a to pomocí dočasných tištěných dílů, v budoucnu vyměnitelných za kovové. Viz *Příloha č.1b.*

Osa Z

Osa Z byla projektována pro tiskovou podložku 300×300 mm, již při prvotní úvaze bylo zavrhnuto řešení Eclips3D z důvodu velkého prohnutí předního bodu. Toto bylo jednoduchou simulací v rámci modelovacího prostředí ověřeno. Byla tedy vymodelována deska, která nese tiskovou podložku a slouží jako montážní prvek k vodícím tyčím osy. Po následné simulaci zátěže byly dodány podpůrné hliníkové profily průřezu T omezující průhyb nosné desky. Deska byla zamýšlena jako výpalek z kovového plechu. Tisková podložka je na ní upevněna ve třech bodech. Viz *Příloha č.1c.*

Tisková hlava

První návrh tiskové hlavy využíval bowdenového uspořádání, při kterém je extrudér upevněn na rámu stroje. Tisková hlava tedy musí obsahovat hotend, chladící ventilátor hotendu, chladící ventilátor výtisku a koncový spínač osy X. Bylo tedy vymodelováno pouzdro pro hotend s montážními prvky pro další komponenty po vzoru Průša i3 MK2. Pouzdro bylo uloženo na další montážní díl – kovový úhelník používaný ve stavebnictví. Na tento díl jsou pak upevněny konce řemenů pomocí dílků z řezaného plexiskla. Viz *Příloha č.1d.*

Hlavní sestava

V hlavní sestavě byly převážně kontrolovány rozměrové přesahy a rovinnost a uložení řemenů. Slouží také jako prezentace dosaženého výsledku a pohyblivý model řešení. Slouží také jako návod k sestavení dílčích sestav. Viz *Příloha č.1e.*

3.3.2 Návrh druhý

Druhý návrh vychází z poznatků nabytých sestavením návrhu prvního. Snaží se o odstranění nedostatků a zlepšení vlastností tiskárny. Práce byla směřována zejména

na optimalizaci poměru vnitřního a tiskového prostoru, na odstranění problémů spojených s osou Z a na vylepšení tiskové hlavy. Je obsahem *Příloh č.2*, který je k dispozici na přiloženém CD je dále řazen abecedně. Tyto přílohy lze také najít v příložné sekci této práce.

Rám

Vzhledem k negativním zkušenostem s používáním původně navržené osy Z bylo rozhodnuto použít dvoustranné uchycení osy Z. Byl tedy snížen průměr vodících tyčí na 10 mm. Vzhledem k optimalizaci vnitřního prostoru byla elektronika přesunuta do zadní části prostoru tiskárny. Z toho prostoru byly odebrány vodící tyče a přesunuty na boky do prostoru pod řemeny. K další optimalizaci prostoru byl využit uvolněný prostor ve spodní části a vytvořen další posunutím roviny os XY přesunutím vodících kolejnic na vrchní stranu profilů. Dodáním dalšího profilu byl v zadní části vytvořen prostor obemknutý profily, tvořící kapsu pro elektroniku. Viz *Příloha č.2a.*

Osa Z

Byla vymodelována nová nosná deska, zamýšlená jako zkušební prototyp, z plexiskla řezaného laserem. V rozích s uchycením k vodícím tyčím pomocí přírubových valivých ložisek, mezi nimiž byly umístěny matice trapézových šroubů. Deska je opět vyztužena hliníkovými profily pro limitaci prohnutí. Tisková podložka je nyní uchycena ve čtyřech bodech. O pohyb se stará dvojice trapézových šroubů uložená v ložiskových pouzdrech připevněných k bočním profilům rámu. Trapézové tyče jsou spojeny přes kladkový převod 1:2 řemenem s krokovými motory upevněnými ke spodním bočním profilům. Tímto bylo dosaženo zvětšení použitelné osy Z na 330mm. Viz *Příloha č.2b.*

Osy X, Y

Přemístěním vodících kolejnic a snížením pozice profilů se rovina pohybu XY posunula vzhůru o výšku jednoho profilu, čímž se za prvé zvětšila použitelnost osy Z a za druhé přinesla možnost upevnit vodící tyče Z na posunuté profily. Viz *Příloha č.2c.*

Tisková hlava

Pro eliminaci nepřesností v tisku, způsobených bowdenovým vedením, byl na tiskovou hlavu přesunut i Titan extrudér, tím tedy vzniklo uspořádání přímé. Přidanou váhou na tiskové hlavě tiskárna rychlostně neutrpěla. Získala však možnost tisknout flexibilní materiály. Byl také dodán tišší ventilátor chlazení hotendu od firmy Noctua a bylo vylepšeno chlazení výtisku novým krytem větráčku. Viz *Příloha č.2d.*

Hlavní sestava

Hlavní sestava tedy reprezentuje finální podobu tiskárny se všemi dílčími sestavami zkompletovanými dohromady. Viz *Příloha č.2e.*

4 REALIZACE ŘEŠENÍ

Tato kapitola se zabývá realizací navrženého řešení, tedy sestavováním návrhu dle zvolených komponent z přechozí kapitoly za použití vytvořených parametrických modelů. Dále se zabývá elektrickým zapojením, konfigurací softwaru a testováním stroje.

4.1 Sestrojování

Tato část předkládá sestavení mechanické části stroje. Popisuje postup práce a poskytuje návod na řešení problémů vzniklých při realizaci. Fotografická dokumentace je obsahem *Příloh č.3*.

4.1.1 Sestavení první

Sestavení první popisuje postup realizace dle prvního návrhu. Sestavení začalo přípravnými pracemi na montážních spojovacích dílech. Byly vyvrtány potřebné díry a upraveny rozměrové nepřesnosti. Dále byly vytištěny montážní díly pro krokové motory. Na rovné podložce byly sestaveny prstence profilů a vzájemně spojeny úhelníky uchycenými pomocí matic do profilů. Do vrchního prstence byly vsazeny kolejnice vedení, zatím ale nebyly utaženy. Do spodního prstence byly upevněny držáky vodících (SK12) tyčí. Pomocí vnějších plochých úhelníků tvaru L byly přichyceny vertikální profily a upevněny pomocí matic. Byl také uchycen profil uchycení osy Z.

V tuto chvíli bylo nutné celou konstrukci zbavit nepřesností a vůlí. Postupným uvolňováním a vymezováním jednotlivých spojů byly tyto vůle odstraněny. Dále byla přichycena mostovka osy X a ustavena rovnoběžnost kolejnic vedení osy Y. Toho bylo dosaženo následujícím postupem:

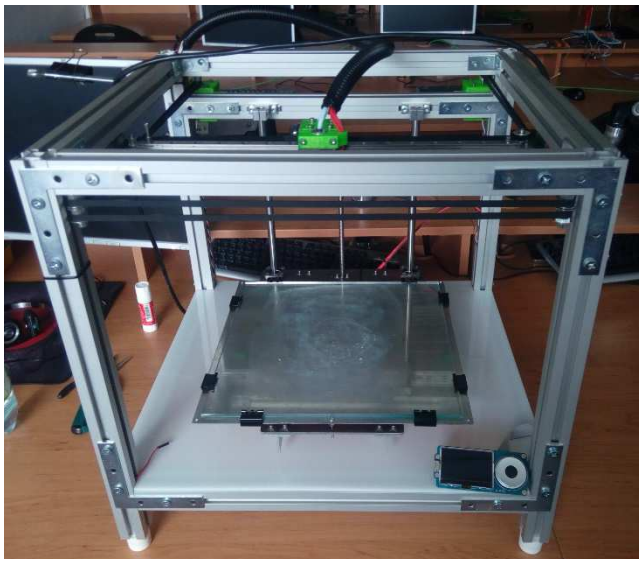
- na uvolněné vodící kolejnice byla přichycena mostovka a utažena všemi šrouby
- mostovka byla přesunuta do jedné krajní pozice na ose Y
- tyto krajní body kolejnic byly utaženy
- mostovka byla přesunuta do druhé krajní pozice
- byly utaženy i tyto krajní body kolejnic a následně všechny body uchycení
- byl překontrolován hladký chod osy Y

Poté byla sestavena nosná deska osy Z, ke které byla přichycena její vodící ložiska (LMK12LUU). Deska byla vsazena do rámu postupným nasazováním na vodící tyče. Levá vodící tyč byla osazena od hrany rámu ve vrchní i spodní krajní poloze tak, aby byla ustavena rovnoběžnost osy s rámem. Rovnoběžnost vodících tyčí byla ustavena stejným způsobem – postupným utahováním krajních bodů jako ustavování vodících kolejnic osy Y. Po kontrole volného chodu byl připevněn motor s trapézovou tyčí ovládající osu Z.

Následně byla osazena mostovka vodící kolejnicí osy X a kladkami řemene. Byly uchyceny motory os XY na profil uchycení osy Z a nainstalovány přední kladky

řemene pomocí matic do předního vrchního profilu. Následně byly navlečeny řemeny a zkušebně zapojena elektronika. Byl proveden zkušební pokus pohybu os na záznam.

Byla sestavena tisková podložka ze skla, hliníkového plechu a silikonového topného tělesa. Byla nainstalována na nosnou desku osy Z. Byla sestavena tisková hlava z hotendu, koncového spínače X a vytisknutého montážního dílu. Extrudér byl dočasně připevněn na rám stroje a spojen s hotendem teflonovou trubičkou. Byla provedena manuální kalibrace vzdálenosti podložky od hotendu ve třech bodech uchycení podložky k nosné desce. Pro uchycení elektroniky byla zvolena deska z plexiskla připevněná na vrchní stranu spodního prstence profilů. Ze spodní strany k ní byla uchycena elektronika. Sestavení dokumentuje obrázek č. 18 a *Příloha č.3a*.



Obr. 18: První sestavení

4.1.2 Sestavení druhé

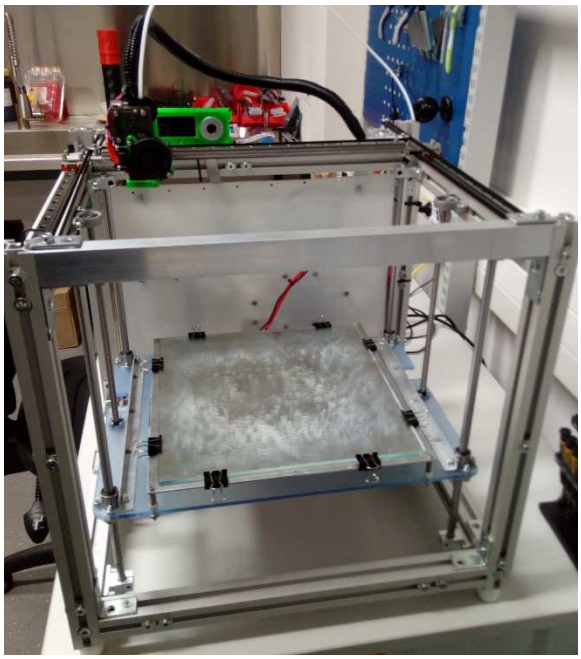
Sestavení druhé koresponduje s druhým návrhem a popisuje postup přestavby. Práce začala rozložením předchozího sestavení na elementární součásti vyjma tiskové podložky a mostovky osy X. Spodní strana vertikálních profilů byly opatřena gumovými nožičkami, které tlumí přenos vibrací stroje do podložky a chrání ji před poškozením ostrými rohy konstrukce. Sestavování tentokrát probíhalo po jednotlivých stranách konstrukce. Nejprve byly osazeny boční profily délky 400 mm držáky vodících tyčí (SK10) a ložisková pouzdra (KP08), na spodní profily byly dodány matice pro držáky motorů a na vrchní profily kolejnice lineárního vedení.

Spojení vertikálních a bočních profilů bylo tentokrát provedeno pomocí kotvících spojek ze stavebnictví. Účelem tohoto spojení bylo odstranění vnějších L úhelníků a využití středové části profilu. Pro toto řešení musely být vyvrtány otvory do vertikálních profilů a rozšířena drážka. Toto řešení omezuje spoj v 5 stupních volnosti, proti rotaci kotvy byl spoj zajištěn úhelníkem mezi profily. Při sestavování bylo nutné odsadit profil přesně od vrchní hrany o 30 mm pro zachování rovnoběžnosti vodících kolejnic. Takto byly sestaveny obě poloviny rámu, které byly dohromady spojeny pomocí profilů délky 440 mm v zadní části nahoře i dole po dvou kusech

a v přední části jedním kusem dole. V zadní části byly profily spojeny širokými úhelníky, které efektivně spojily nejen středové profily s bočními, ale i profily stěn mezi sebou. Došlo tak k vyztužení celé konstrukce. Do zadní části byly instalovány úhelníky pro uchycení desky s elektronikou.

Následovalo sestavení nosné desky osy Z, která sestává z montážní desky plexiskla, řezané na laserové řezačce, vodících ložisek (LMK10UU), hliníkových profilů L na vyztužení a tiskové podložky. Osazená deska byla do rámu instalována postupně, jelikož sestavení čtyř vodících tyčí je náročnější. Deska byla uchycena nejprve jednou tyčí. Ta byla srovnána rovnoběžně s rámem a přesným odsazením v horní a dolní pozici. Poté byla uchycena druhou tyčí na stejné straně, ta byla rovnoběžně ukotvena pomocí stejné techniky popsané v kapitole 4.1.1. Nyní bylo třeba sestavit protější stranu s vodícími tyčemi. Zde se vyskytla komplikace vůlí mezi bočnicemi rámu, bylo tedy třeba odsadit držáky tyčí od profilů směrem do vnitřního prostoru pomocí podložek. Poté mohly být sestaveny i zbývající vodící tyče rovnoběžně s tyčí první, a to stejným způsobem. Byla provedena kontrola volného pohybu nosné desky na tyčích. Po úspěšné kontrole byly nainstalovány trapézové tyče a kladky s řemeny. Byly usazeny rovnoběžně s vodícími tyčemi stejným způsobem, jaký byl popsán výše.

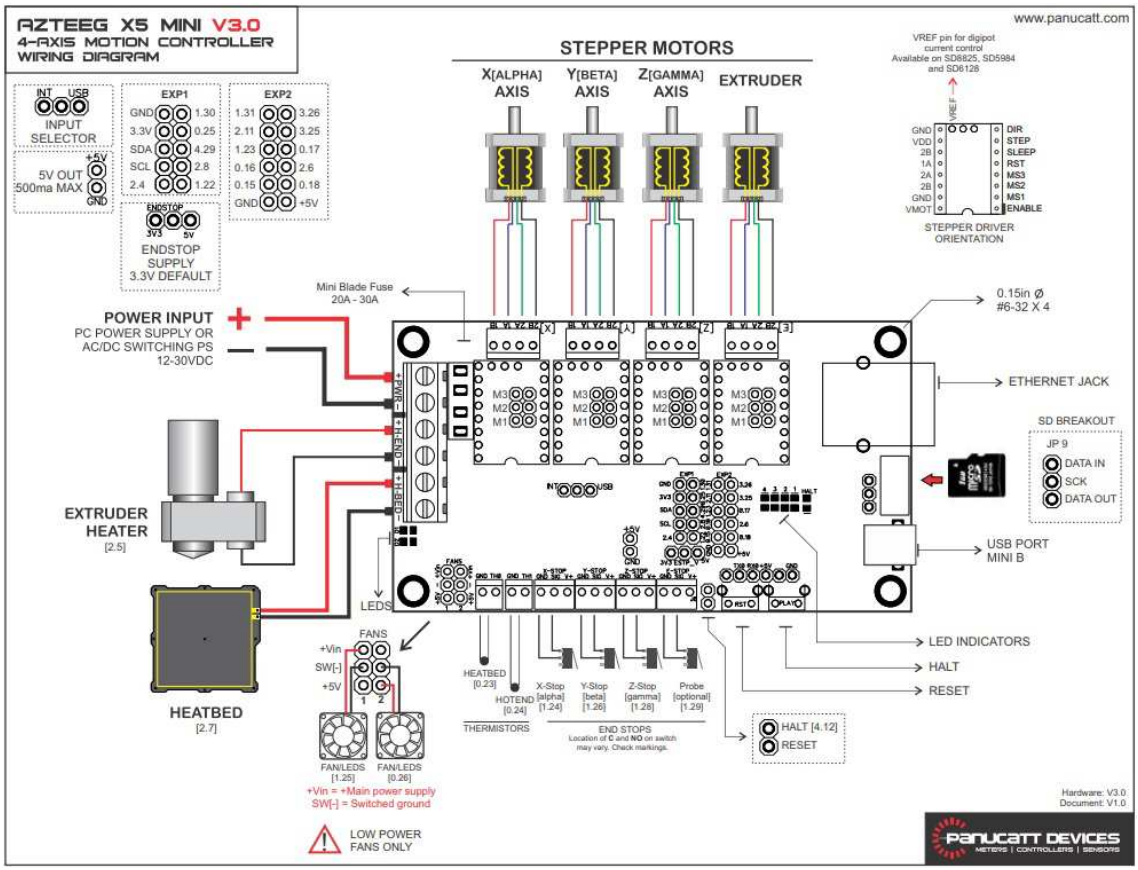
Poslední fází byla instalace předního horního profilu tvaru C, který obsahuje přední kladky řemenů a spojuje přední část rámu. Poté následovalo upevnění mostovky osy X stejným způsobem jako v kapitole 4.1.1, připevnění řemenů a krokových motorů. Deska s elektronikou byla upevněna do zadní části rámu a ovládací obrazovka byla umístěna nad něj. Zapojení elektroniky popisuje kapitola 4.2. Přestavbu dokumentuje obrázek č. 19 a *Příloha č.3b*.



Obr. 19: Druhé sestavení

4.2 Elektrické zapojení

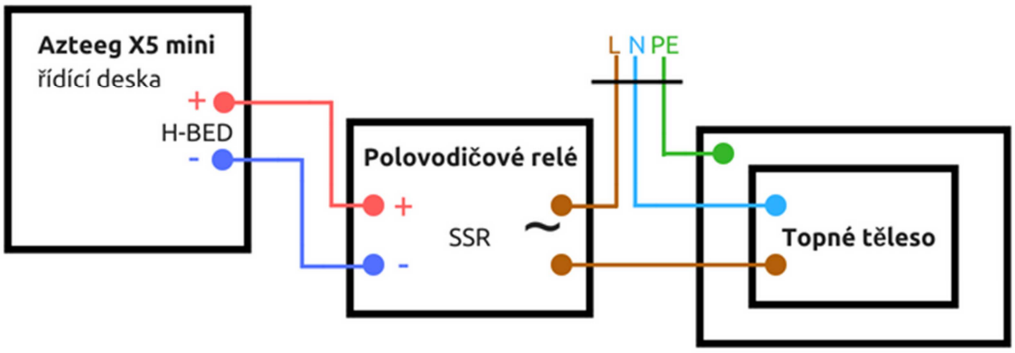
Tato podkapitola se zabývá zapojením elektroniky. Vzhledem k malým změnám v zapojení mezi návrhy se zde práce omezuje pouze na popis finálního řešení. Fotografická dokumentace zapojení je obsahem *Přílohy č.3c*.



Obr. 20: Schéma zapojení elektroniky [40]

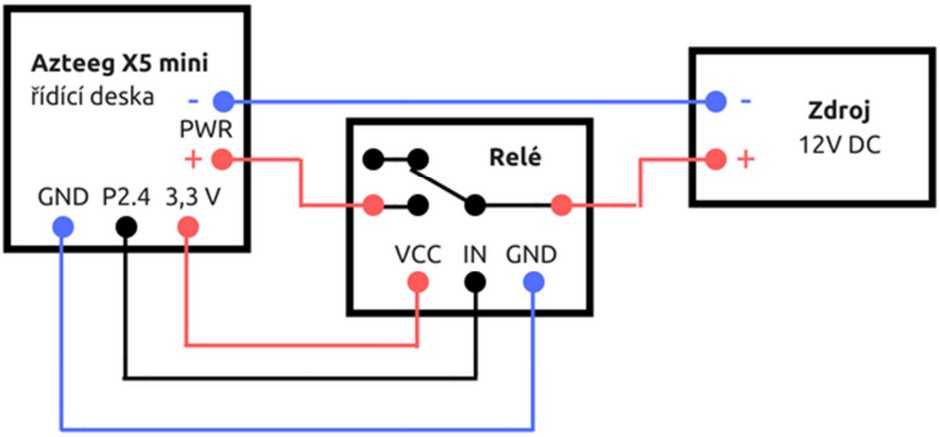
Zapojení elektroniky do řídící desky je patrné z obrázku č. 20. Nejprve byly zapojeny piny na konfiguraci mikrokrokování motorů – konkrétně u motorů X a Y piny M1 a M2 pro dosažení 1/32 mikrokrokování a u motorů Z a E pin M2 pro 1/16 mikrokrokování. Po zapojení ovladačů krokových motorů a osazení chladiči byly zapojeny i konektory motorů a pohybovou zkouškou zkontrolován správný směr pohybu. Poté byly zapojeny koncové snímače. Optický snímač osy X byl umístěn na tiskovou hlavu. Ten jako jediný má tří-pinový konektor, kde jeden pin slouží pro napájení, je tedy třeba na desce zvolit správný výstup napájecího napětí pro snímače na 5 V. Mechanický koncový snímač osy Y byl dočasně umístěn na vodící kolejnici lineárního vedení osy Y do maximální polohy. Koncový snímač osy Z byl po stejném vzoru umístěn na vodící tyč do maximální polohy. Dále byly zapojeny kabely od topného tělesa extrudéru, od chladících ventilátorů hotendu a výtisku a také konektory termistorů hotendu a vyhřívané podložky.

Kabely topného tělesa vyhřívané podložky byly zapojeny jedním kabelem do polovodičového relé a druhým kabelem ke zdroji na nulový vodič sítě. Polovodičové relé bylo druhou stranou konektorů zapojeno do výstupů řídící desky pro spínání vyhřívané podložky. Toto zapojení je patrné z obrázku č. 21.



Obr. 21: Schéma zapojení SSR a topného tělesa podložky

Z bezpečnostních důvodů bylo v druhém sestavení přidáno relé spínající přívod napájení do řídící desky. Řídící deska byla připojena na minipočítač Raspberry Pi [51], na který bylo nainstalováno ovládací prostředí Octoprint [52], které umí zprostředkovat vzdálenou zprávu tiskárny přes internet. Řídící deska je tedy napájena a ovládána přes USB kabel. 12 V vstup napájí topná tělesa a krokové motory. Řídící deska spíná relé poté, co ji spustí 5V napájení z USB. Zapojení je patrné z obrázku č. 22.



Obr. 22: Schéma zapojení bezpečnostního relé

4.3 Konfigurace

V této podkapitole se práce zabývá procesem přípravy a prvního spuštění stroje, tedy konfigurací firmwaru a nastavením sliceru.

4.3.1 Firmware

Použití firmwaru Smoothieware je jednoduché a intuitivní. Stačí si stáhnout soubory firmware.bin a config.txt ze stránky github.com [53] a uložit je na SD kartu. Řídící deska si poté firmware sama načte z vložené SD karty, která také obsahuje konfigurační nastavení v textovém souboru. Veškeré změny firmwaru, vztahující se ke specifické tiskárně, se dějí prostřednictvím souboru config.txt, editovatelném v jakémkoli textovém editoru. Řídící deska si konfiguraci načítá ze souboru vždy při startu. Pro projevení změny konfigurace tedy stačí řídící desku restartovat.

Konfigurace firmware

Tato práce se nebude věnovat všem nastavením v souboru config.txt, pouze zmíní a vysvětlí význam provedených změn v konfiguračním souboru. Všechna nastavení jsou zmíněna na stránce konfiguračních možností Smoothieware. [46]

V první části se konfigurační soubor věnuje nastavení motorů. Zde byl nastaven počet mikro-kroků na mm („steps_per_mm“) u os XY na 200 a u osy Z na 400. Byly použity kladky s 16-ti zuby, 1/32 mikro-krokování, motory s úhlem otočení jednoho kroku 1,8° a řemeny s odstupem zubů 2 mm. S výpočtem může pomoci kalkulačka od firmy Průša. [54] Na ose Z byly použity stejné motory jako na osách XY a trapézové tyče se stoupáním 8 mm na otáčku a převodový poměr 1:2.

Dále byl nastaven proud do motorů tak, aby se motory při dlouhodobé zátěži nepřehřívaly na 1,4 A (maximální použitelný proud od výrobce je 1,7 A). Nastavení motoru extrudéru následuje až v další části konfiguračního souboru, zde tedy byly nastaveny mikro-kroky motoru na 418,5 kroků na mm dle návodu k extrudéru Titan [36], velikost proudu byla nastavena na 0,4 A.

Poté se v nastavení vyskytuje sekce se spínáním zdroje. Spouštěcí příkaz byl nastaven jako M80 a vypínací jako M81. Výstupní pin byl zvolen 2.4.

Dále bylo potřeba zadat rozměry tiskárny a způsob homingu, což je hledání výchozí pozice. Homing os Z a Y byl nastaven do maximální pozice, kde hodnoty délek korespondují s maximální použitelnou délkou os.

Ostatní nastavení byla zkontrolována pomocí dokumentace firmwaru a nastavení bylo uloženo. Konfigurační soubor a soubor firmwaru obsahuje *Příloha č.4.*

4.3.2 Slicer

Jako přípravný software v počítači byl zvolen řezací program Slic3r. [55] Program slouží k přípravě modelů pro tisk a to tak, jak bylo popsáno v kapitole 2.4. Program zpracovává modely do instrukcí vhodných pro tiskárnu v souboru G-CODE nejčastěji ve formátu STL. G-CODE obsahuje instrukce pohybů jednotlivých os, informace o zrychlení, rychlosti a množství vytlačeného materiálu. V prvních pokusech byla použita původní verze Slic3r, ta se však příliš neosvědčila, v dalších pokusech byla tedy použita verze Slic3r PE [56], která je stále doplňována a vyvíjena firmou Prusa Resarch s.r.o. Úprava nastavení sliceru vycházela z obsaženého profilu pro Průša i3 MK2. Byla upravena specifická nastavení pro tuto tiskárnu, ale experimentováním nebylo dosaženo

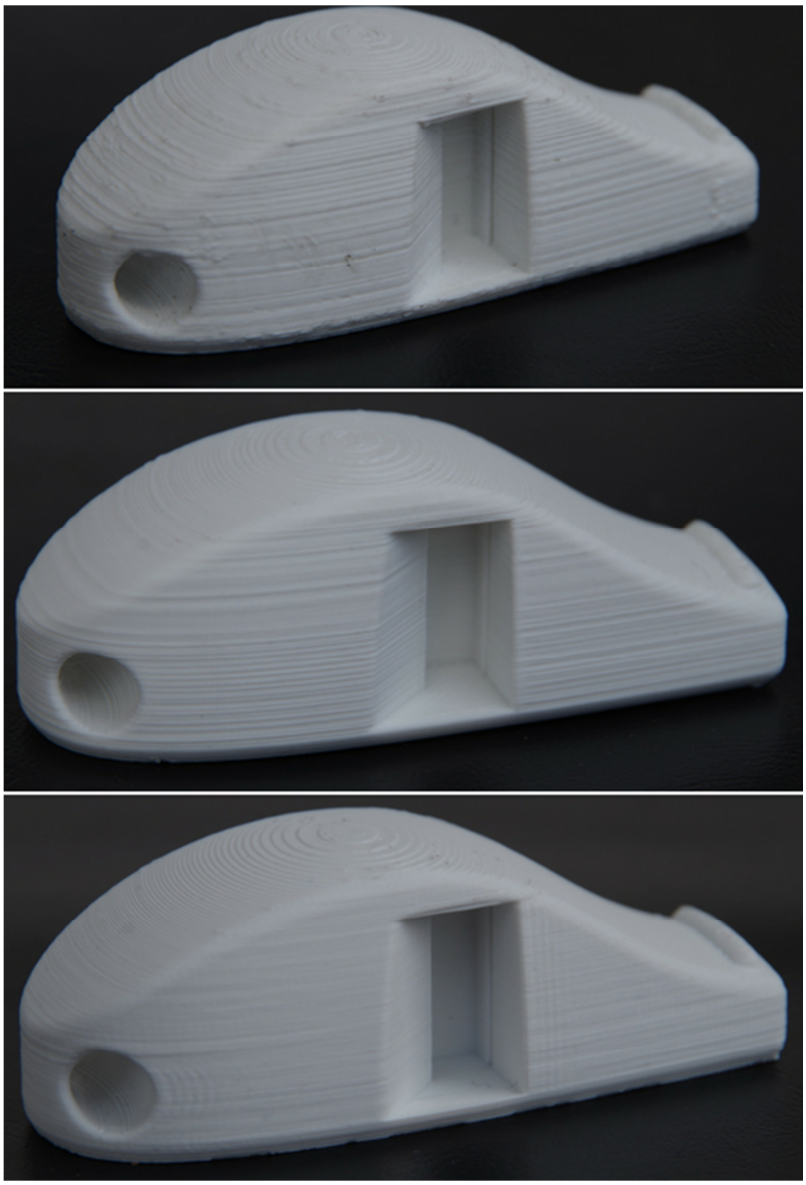
lepších výsledků, než jakých bylo dosaženo s původními hodnotami tiskového nastavení. Nastavení programu Slic3r jsou obsahem *Příloh č.5*.

5 TESTOVÁNÍ A ZHODNOCENÍ

V této kapitole bude otestována funkčnost stroje a zhodnoceny výsledky. Bude také provedeno finanční zhodnocení a porovnání s konkurencí.

Funkčnost stroje

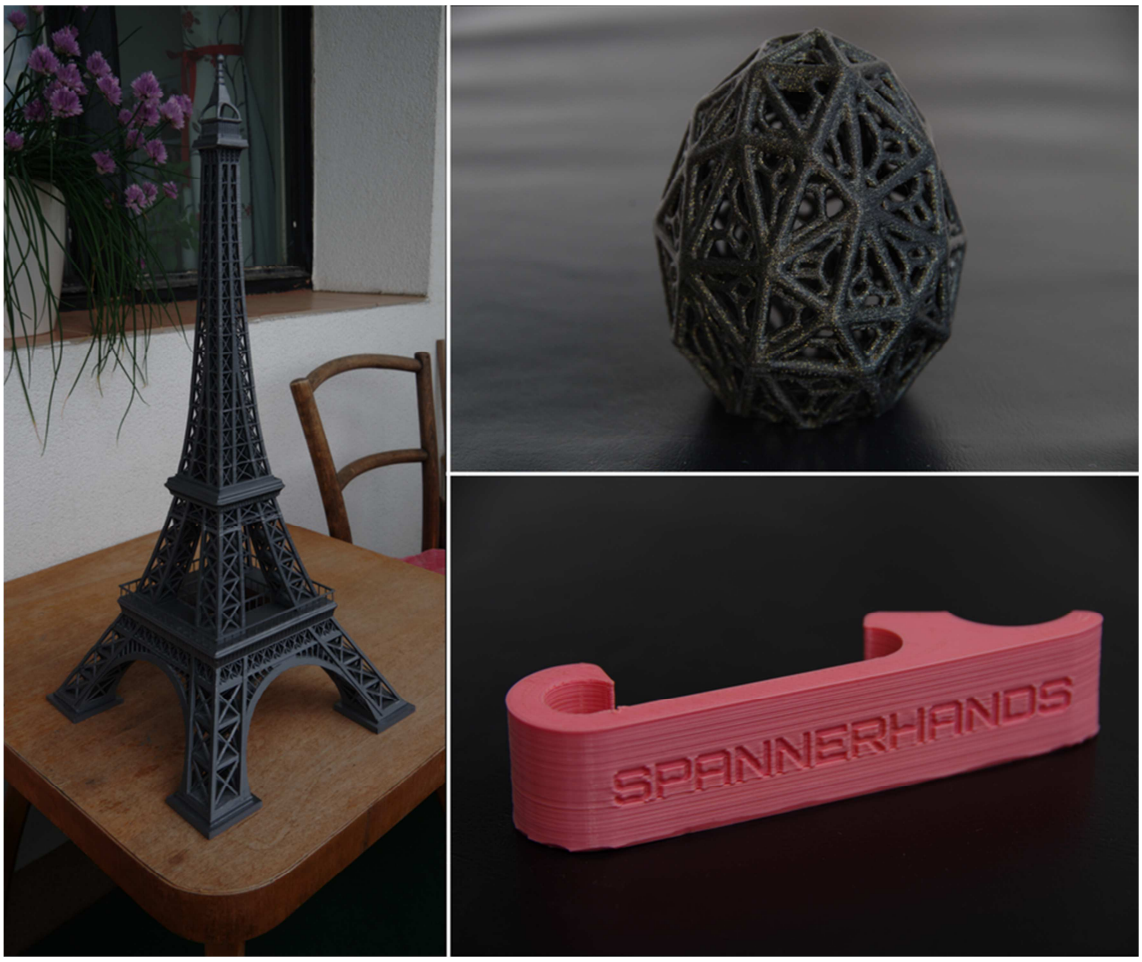
Jako testovací model byla vybrána píšťalka z internetové knihovny modelů. [57] Na ní byla provedena řada testů různých nastavení programu Slic3r. Jak již bylo řečeno v kapitole 4.3.2, nebylo dosaženo lepších výsledků než s původními hodnotami nastavení. Obrázek č. 23 dokumentuje porovnání stejného modelu vytištěného pomocí základního Slic3ru na prvním sestrojení, pomocí odladěného profilu na Slic3ru PE na druhém sestrojení a výtisku z tiskárny Průša i3 MK3 s výchozím profilem ze stejného materiálu.



Obr. 23: Seshora: první sestavení, druhé sestavení, Průša i3 MK3

Modely vykazovaly zásadní nedostatek, a sice vlnky na stěnách výtisku. To mohlo být způsobeno nedokonalou konstrukcí nosné osy Z a její špatnou montáží nebo příliš volnými řemeny os XY. Bylo zhodnoceno, že volba způsobu uchycení řemenů není příliš efektivní.

Stroj byl dále mnohokrát testován na ověření funkčnosti, od posledního sestavení má natisknuty stovky hodin. Byl ověřen tisk různými materiály a i tisk velkých složených a komplikovaných objektů. Tiskárna tyto testy zvládla bez obtíží a tiskových defektů, jak ilustruje obrázek č. 24.



Obr. 24: Velký (vlevo) komplikovaný (nahoře) a flexibilní (dole) výtisk

Poslední testovanou funkcí bylo testování rychlosti stroje. Byl vytvořen G-CODE, ve kterém tiskárna provádí dlouhé pohyby po osách a diagonálách postupným zvyšováním rychlosti až do limitů stroje. Bylo dosaženo rychlostí 400 mm/s ve směrech os a 350 mm/s v diagonálním směru. Toto dokumentuje video v *Příloze č.6*.

Finanční zhodnocení

Byl vytvořen seznam (kusovník), který obsahuje všechny použité díly, komponenty a spojovací materiál použitý při stavbě finálního řešení. Celková položková cena stroje činí: **16 500 Kč**. Vzhledem k výsledkům naměřeným v předcházející části je otázkou, zdali se toto řešení vyplatí. Návrh sice nabízí možnosti dalšího rozšiřování

a vylepšování, ale cenou se již velmi blíží srovnávanému řešení Průša i3 MK3, která jako stavebnice stojí **19 990 Kč**. Ta disponuje vyšší kvalitou tisku, odnímatelnou podložkou a automatickou kalibrací. Vlastnosti, které jsou v této cenové kategorii důležitější, než velikost tiskového prostoru a kompaktnost konstrukce. Seznam dílů je obsahem *Příloh č.6.*

6 ZÁVĚR

V práci byl popsán princip 3D tisku a jeho jednotlivých technologií s důrazem na metodu FDM. Dále byla provedena rešerše v oblasti používaných materiálů pro tuto technologii, typů konstrukcí a vybraných dostupných tiskáren na trhu. Byly přiblíženy dílčí součásti 3D tiskárny a vybráni zástupci řešení pro realizaci.

Byly naplněny cíle popsané v kapitole 3.1. V rámci práce byla navržena, vymodelována a později sestavena funkční tiskárna kinematického typu CoreXY s tiskovým prostorem 300x300x330 mm a vnějšími rozměry 500x500x470 mm. Konstrukce je dále vhodná pro uzavření tiskového prostoru a pro aplikaci vyhřívané komory. Nosič tiskové hlavy a pojezdy osy X jsou dimenzovány tak, aby tisková hlava mohla být osazena druhým hotendem. Zvolený hotend umožňuje tisk širokou škálou dostupných materiálů. Tuhá konstrukce a silné motory umožňují rychlý pohyb tiskové hlavy až do rychlosti 350 mm/s s teoretickým rozlišením až 5 µm v osách X a Y. Trapézové tyče a zvolený převod umožňují minimální výšku vrstvy 20 µm. Použitím kvalitních komponent byl sestaven spolehlivý stroj s dlouhou očekávanou životností.

Přetrvávajícím nedostatkem je konstrukce nosné desky Z a jejího upnutí, které se projevily při zkušebních tiscích jako vlnění na stěnách tisknutých modelů. Také materiál použitý pro nosnou desku není vhodný kvůli velké teplotní dilataci. Dalším problémovým aspektem je uchycení řemenů, kde chybí mechanismus napnutí řemenů. Zapojení elektroniky a kabeláž také není příliš profesionální. Model tiskárny by se do budoucna měl rozšířit o mnoho-materiálový tisk a tepelnou regulaci uvnitř tiskového prostoru. Vnější zakrytování by tiskárně dodalo profesionální vzhled a vzniklý meziprostor by se využil pro tepelnou izolaci tiskárny, která by tak zvyšovala efektivitu výhřevu.

Cena finálního řešení byla vyčíslena na 16 500 Kč. Touto částkou se realizované řešení blíží komerčním řešením dnes dostupným na trhu, jako je např. Průša i3 MK3. Finální řešení této práce disponuje větším tiskovým prostorem, pevnější konstrukcí, maximální dosažitelnou rychlostí pohybu tiskové hlavy a možností rozšiřování (přidání druhého hotendu, uzavření tiskového prostoru pro tepelnou regulaci a profesionálnější vzhled). Komerční řešení Průša i3 MK3 nabízí v podobné cenové kategorii profesionální vzhled, automatickou kalibraci tiskové podložky, odnímatelnou tiskovou podložku, jednoduchý návod k sestavení typu DIY, zákaznickou podporu a záruku na díly.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 9788021440258

[2] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. ZÁKLADY 3D TISKU. Praha, 2014. Dostupné také z: http://www.prusa3d.cz/

[3] *Seven Robotic Arms Lifting 3D Printing into Industrial Manufacturing* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13374/Seven-Robotic-Arms-Lifting-3D-Printing-into-Industrial-Manufacturing.aspx

[4] *Technologie, materiály a dokončovací úpravy* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: http://www.materialise.com/

[5] *Overview over 3D printing technologies* [online]. Zürich, Switzerland [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.additively.com/en/learn-about/3d-printing-technologies

[6] *10 Types of 3D Princting Technology – Simply Explained* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/

[7] *Layer thickness in 3D printing: An additive manufacturing basic Explained* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/

[8] *Formlabs* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://formlabs.com/

[9] *LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing With Layers of Paper* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/

[10] *3D Printing with FDM: How it Works* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.controldesign.com/assets/12WPpdf/121213-stratasys-3d-printing-with-fdm.pdf

[11] *Přechodové teploty polymerů* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/06.html

[12] *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS): A Tough and Diverse* Plastic [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: http://3dinsider.com/what-is-abs/

[13] *Ultimate 3D Printing Materials Guide Plastic* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/

[14] *Materiálový slovník* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/

[15] *Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA)* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes

[16] *Fillamentum Datasheet CPE HG100* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/sh/hebpub56bcgg1cb/AACA79uVSdKGCqppEgNJj0K-a/CPE_HG100_TDS_9_May_2018.pdf?dl=0

[17] *Fillamentum Datasheet HIPS Extrafill* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/w6cd3kqkfb20pnj/datasheet_hips_extrafill.pdf?dl=0

[18] *Cartesian Printer – Motion Platform – Research* 1 [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://maxdesign1990.wordpress.com/2016/05/22/gmtech-printer-motion-platform-research/

[19] *3D Printers Explained: Delta, Cartesian, Polar, Scara 1* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://all3dp.com/know-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/

[20] *Pwc analysis* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: http://usblogs.pwc.com/emerging-technology/the-road-ahead-for-3d-printing/

[21] *Polar 3D Printer* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://all3dp.com/know-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/

[22] *Prusa i3* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3

[23] *3D Printing beta* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://3dprinting.stackexchange.com/questions/2593/how-does-the-home-position-work-on-a-prusa-i3-reprap-printer

[24] *3D tiskárna originál Průša i3 MK3* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/

[25] *Ultimaker S5* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-s5

[26] *Eclips3D* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: http://www.eclips3d.com/

[27] *Form 2* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: https://formlabs.com/3d-printers/form-2/

[28] *Ultimate 3D Printer Buyers Guide 2016*. Staženo [dne 2018-05-20] z: http://www.makersmuse.com/resources.html

[29] *Bigrep One: The Most Advanced Large Scale 3D Printing Experience* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://bigrep.com/bigrep-one/

[30] *CoreXY* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.doublejumpelectric.com/projects/core_xy/2014-07-15-core_xy/

[31] *Core (X, Y)* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://corexy.com/theory.html

[32] *Understanding extrusion width* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://manual.slic3r.org/advanced/flow-math

[33] *Anatomy of a 3D Printer: How Does a 3D Printer Work?* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer

[34] *What are the parts that make up hotend, and what do they do?* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://3dprinting.stackexchange.com/questions/1519/what-are-the-parts-that-make-up-a-hotend-and-what-do-they-do

[35] *E3D - online* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://e3d-online.com/

[36] *Titan Assembly* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://wiki.e3d-online.com/Titan_Assembly

[37] *PEI build surface* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/PEI_build_surface

[38] *BuildTak* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.buildtak.eu/

[39] *PRINTinZ 3D Printer Plates* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.printinz.com/printinz-3d-printer-plates/

[40] *Panucatt Devices* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://www.panucatt.com/

[41] *Arduino Mega* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Arduino_Mega

[42] *Arduino Mega Pololu Shield* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RAMPS

[43] *Rambo* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RAMBo

[44] *Tech Breakdown: The Panucatt Azteeg X5 Mini 3D Printer Upgrade* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://www.matterhackers.com/news/tech-breakdown-the-panucatt-azteeg-x5-mini-3d-printer-upgrade

[45] *Marlin* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Marlin

[46] *Smoothie basic* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://smoothieware.org/basics

[47] *RepRapDiscount Full Graphic Smart Controleer* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RepRapDiscount_Full_Graphic_Smart_Controller

[48] *Microstepping* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://www.njr.com/semicon/PDF/application_notes/Microstepping_APP_E.pdf

[49] *NEMA 17 Stepper motor* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/NEMA_17_Stepper_motor

[50] *Endstop* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Endstop

[51] *Rapsberry Pi* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.raspberrypi.org/

[52] *OctoPrint* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://octoprint.org/

[53] *Smoothieware* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://github.com/Smoothieware/Smoothieware

[54] *Hi I'm Calculator* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.prusaprinters.org/calculator/

[55] *Slic3r G-code generator for 3D printers* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: http://slic3r.org/

[56] *Slic3r Prusa Edition* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.prusa3d.cz/slic3r-prusa-edition/

[57] *Thingiverse* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.thingiverse.com/thing:1179160

8 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A ZKRATEK

Seznam obrázků

Obr. 1: Metoda Fused Deposition Modeling [5] ... 19
Obr. 2: Stereolitografie [5] ... 20
Obr. 3: Selektivní laserové spékání (Selective Laser Sintering) [5] ... 21
Obr. 4: Metoda Photopolymer Jetting [5] ... 22
Obr. 5: Kartézské a delta kinematické uspořádání [20] ... 29
Obr. 6: Polární 3D tiskárna [21] ... 30
Obr. 7: Průša i3 [23] ... 31
Obr. 8: Paralelní (Ultimaker) kinematika [18] ... 32
Obr. 9: Průša i3 MK3 [24] ... 35
Obr. 10: Ultimaker S5 [25] ... 36
Obr. 11: Eclips 3D2 [26] ... 36
Obr. 12: Formlabs Form 2 ... 37
Obr. 13: Uspořádání H-bot [30] ... 41
Obr. 14: Uspořádání CoreXY [30, 31] ... 41
Obr. 15: Schéma hotendu [34] ... 43
Obr. 16: Schéma extrudéru [36] ... 44
Obr. 17: Schéma vyhřívané podložky [40] ... 46
Obr. 18: První sestavení ... 54
Obr. 19: Druhé sestavení ... 55
Obr. 20: Schéma zapojení elektroniky [40] ... 56
Obr. 21: Schéma zapojení SSR a topného tělesa podložky ... 57
Obr. 22: Schéma zapojení bezpečnostního relé ... 57
Obr. 23: Seshora: první sestavení, druhé sestavení, Průša i3 MK3 ... 60
Obr. 24: Velký (vlevo) komplikovaný (nahoře) a flexibilní (dole) výtisk ... 61

Seznam tabulek

Tab. 1: Vlastnosti filamentů pro FDM [13] ... 28
Tab. 2: Vlastnosti tiskárny Průša i3 MK3 [24] ... 34
Tab. 3: Vlastnosti tiskárny Ultimaker S5 [25] ... 35
Tab. 4: Vlastnosti tiskárny Eclips 3D2 [26] ... 37
Tab. 5: Srovnání Smoothieboard V1 a Azteeg X5 mini [40, 46] ... 47

Seznam zkratek

2D	Dvojrozměrný
3D	Trojrozměrný
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AC	Alternating Current

ARM	Advanced RISC Machines
ASA	Acrylic Styrene Acrylonitrile
CD	Compact Disc
CPE	Copolyester
CNC	Computer Numeric Control
DC	Direct Current
DIY	Do It Yourself
DLP	Digital Light Processing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
GND	Ground
HIPS	High Impact Polystyrene
HW	Hardware
IN	Input
LCD	Liquide Crystal Display
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
PA	Polyamid
PC	Polycarbonate
PEI	Polyetherimid
PETG	Polyetyléntereftalát – glykol
PLA	Polylactic Acid
PP	Polypropylen
PVA	Polyvinyl Alcohol
PWR	Power
RAMBo	RepRap Arduino – Compatible Mother Board
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
SD	Secure Digital
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
SPI	Serial Peripheral Interface
SSR	Solid State Relay
SW	Software
TPE	Termoplastické elastomery
TPU	Termoplastické polyuretany
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolet
VCC	Voltage Common Collector

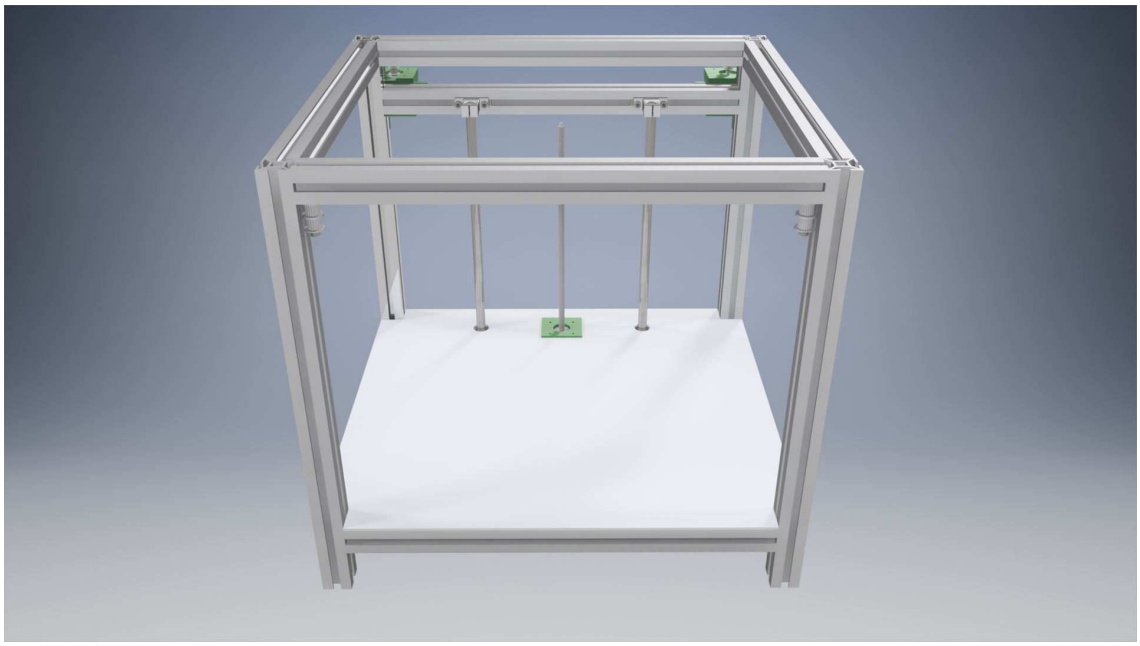
9 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1a
Příloha 1b
Příloha 1c
Příloha 1d
Příloha 1e
Příloha 2a
Příloha 2b
Příloha 2c
Příloha 2d
Příloha 2e
CD – obsahem CD jsou:

- Příloha č.1 – obrazová dokumentace prvního návrhu a model
- Příloha č.2 – obrazová dokumentace druhého návrhu a model
- Příloha č.3 – fotodokumentace sestavení
- Příloha č.4 – firmware řídící desky a konfigurační soubor
- Příloha č.5 – tiskové profily programu Slic3r
- Příloha č.6 – ukázky tisku, test rychlosti, kusovník

PŘÍLOHY

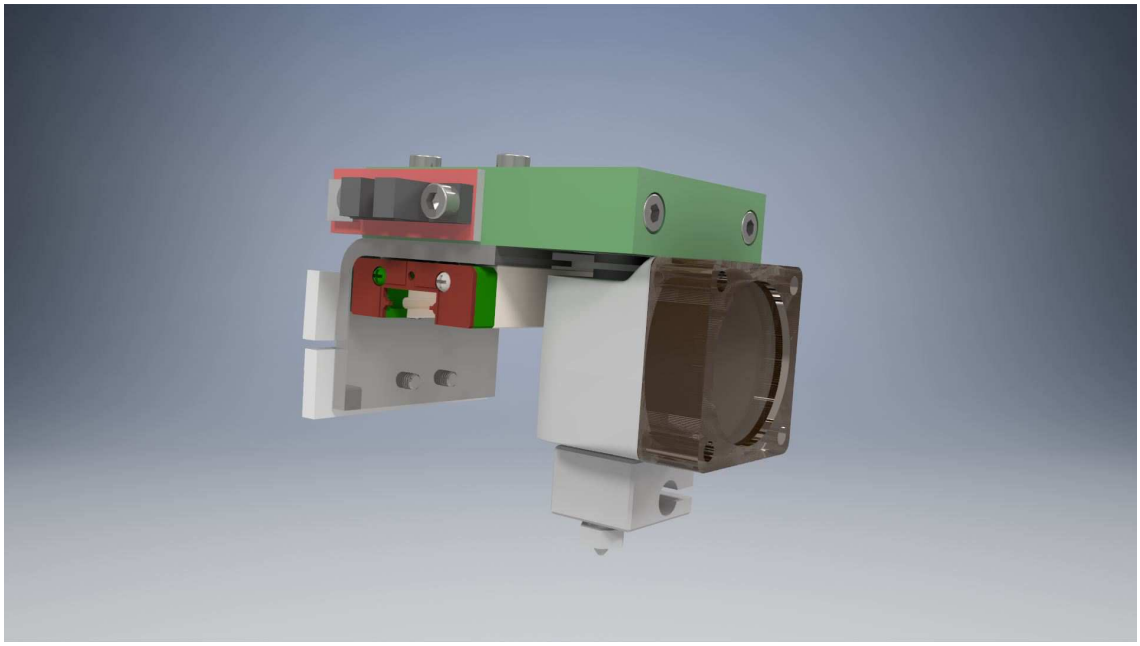
Příloha 1a:



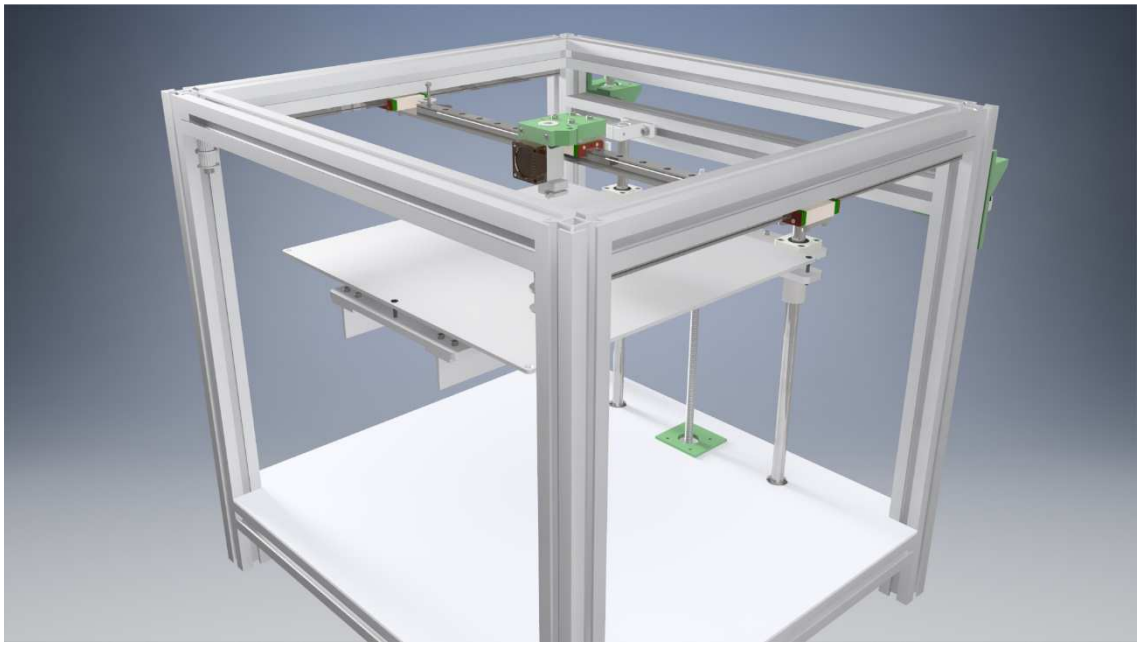
Příloha 1b:

Příloha 1c:

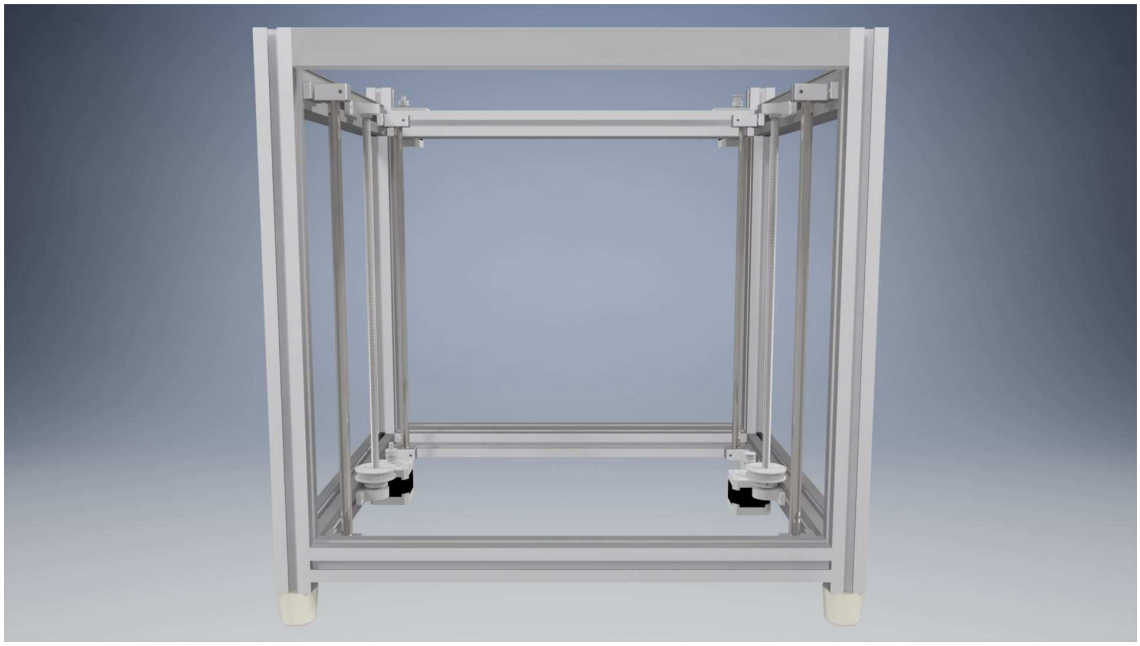
Příloha 1d:



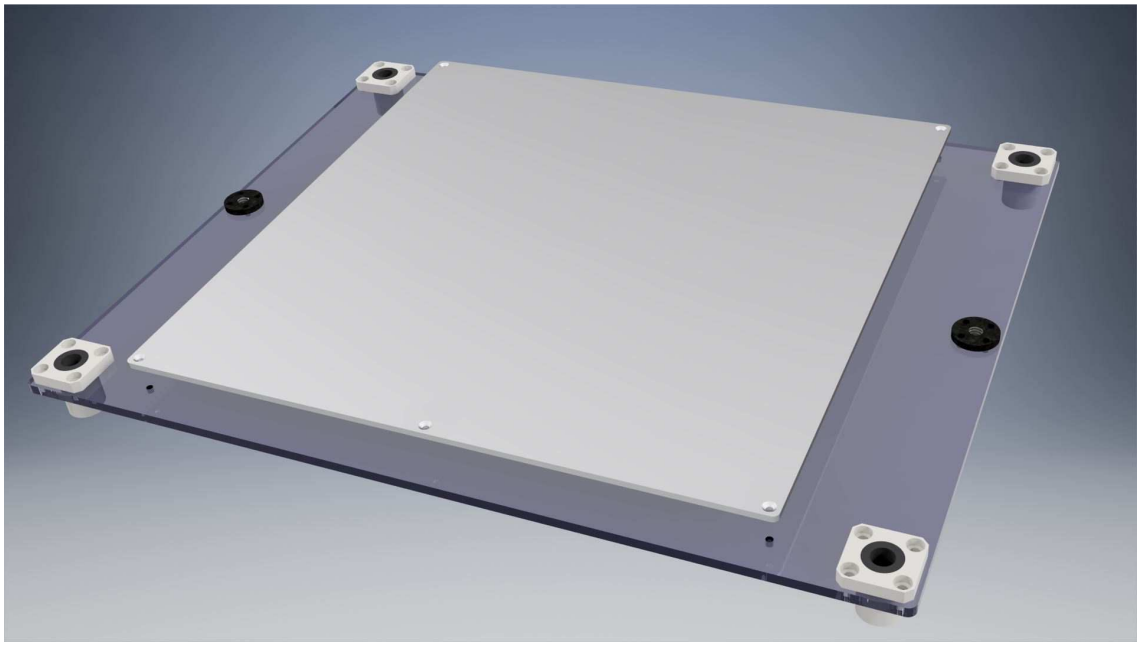
Příloha 1e:



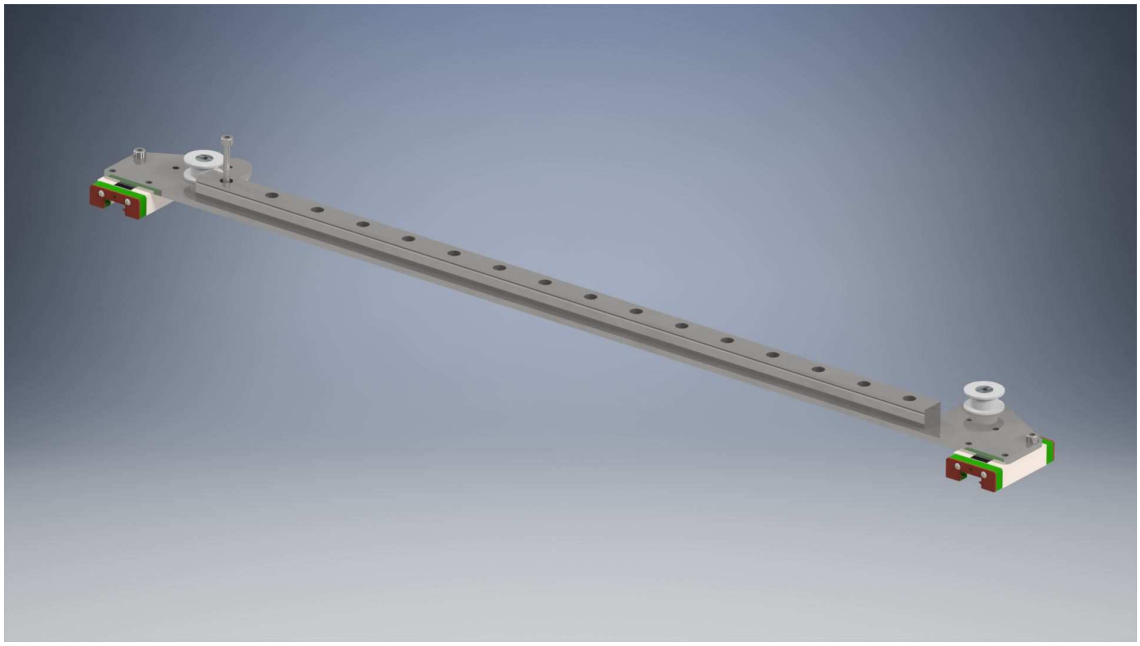
Příloha 2a:



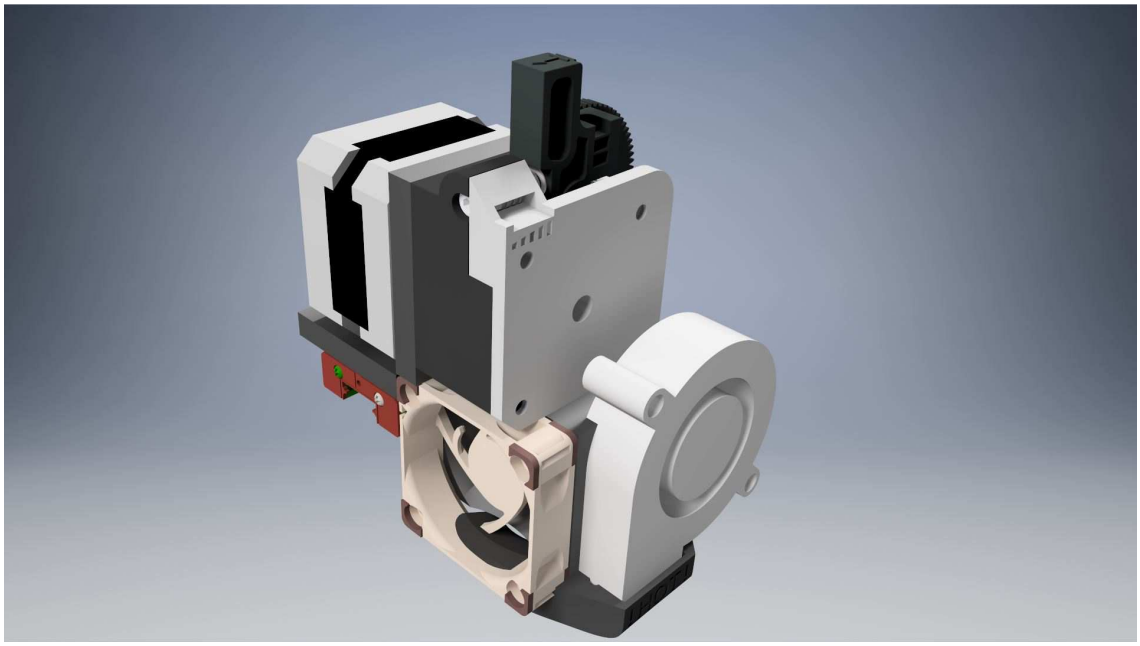
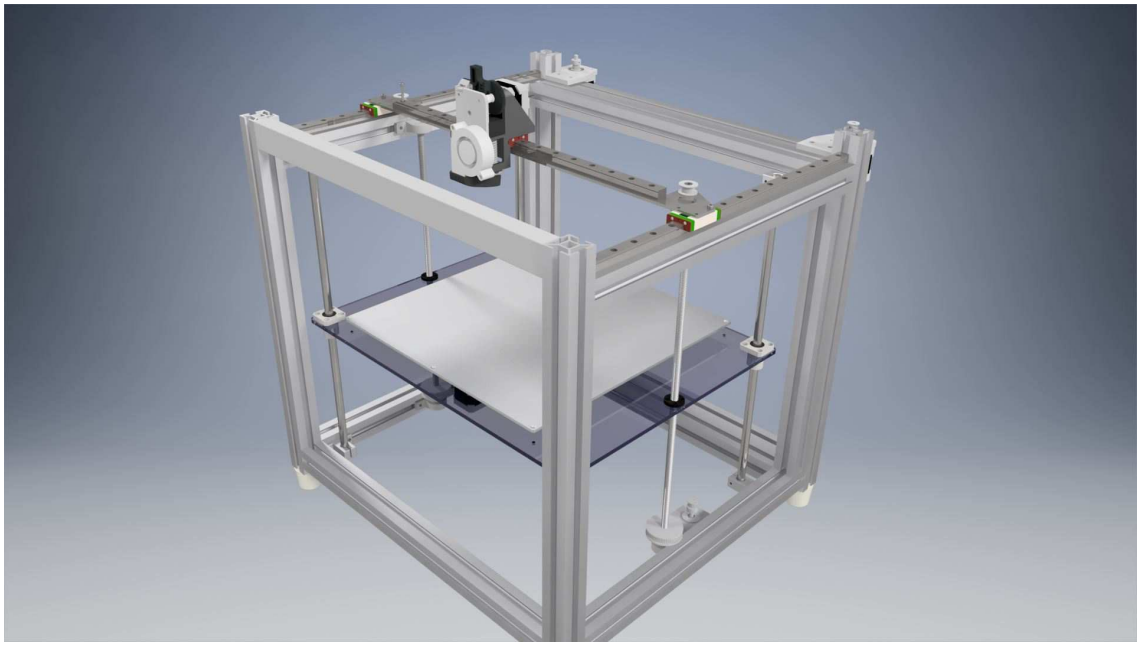
Příloha 2b:



Příloha 2c:



Příloha 2d:



Příloha 2e: