



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vývoj 3D tiskárny

3D printer development

Diplomová práce

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství
Autor práce: Bc. Jan Kahoun
Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Ing. Michal Koptiš

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kahoun** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459877**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vývoj 3D tiskárny

Název diplomové práce anglicky:

3D printer development

Pokyny pro vypracování:

- 1) Princip technologie FDM 3D tisku.
- 2) Kinematika FDM 3D tiskáren.
- 3) Návrh vlastní konstrukce 3D tiskárny.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Libor Beránek, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Ing. Michal Koptiš, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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



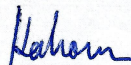
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne 28.7.2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Kaban'.

Podpis

Poděkování:

Děkuji panu Ing. Liborovi Beránkovi, Ph.D. a Ing. Michalovi Koptišovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Anotace

Tato práce se zabývá 3D FDM tiskem. Je zde vysvětlen princip metody FDM a zároveň se práce věnuje jednotlivým mechanickým koncepcím těchto tiskáren a porovnává je. Velká část práce se zabývá vlastním návrhem 3D FDM tiskárny kartézského typu. Tento návrh je v práci zrealizován. V závěru práce je popsána montáž této navržené 3D FDM tiskárny. V práci je uvedena přibližná cenová kalkulace pro tuto 3D tiskárnu.

Klíčová slova: 3D tisk, FDM, návrh, mechanická koncepce

Annotation

This work is about 3D FDM printing. The principle of FDM 3D printing and each used mechanical concepts is explained here, the concepts are also compared. The main part of this work describes development of a own 3D FDM printer with cartesian conception. Prototype was made and the assembly described at the end of the work. Approximate price calculation is also shown.

Key words: 3D printing, FDM, development, mechanical concept

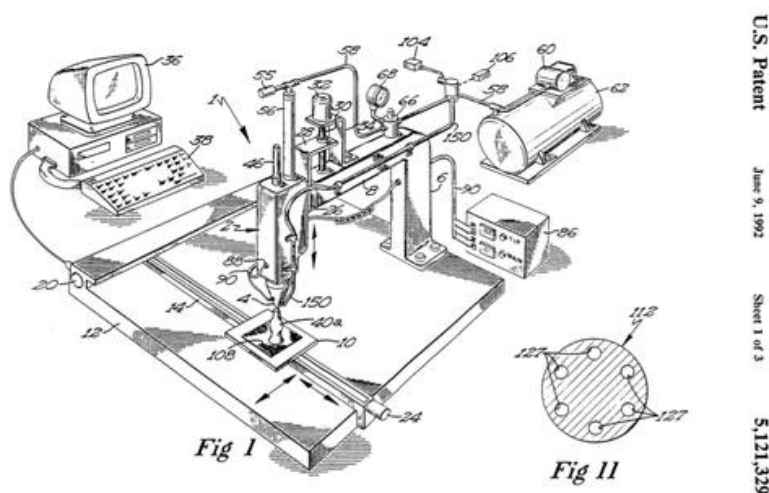
Obsah

| | |
|--|----|
| Anotace | 5 |
| Annotation | 5 |
| 1 Úvod | 8 |
| 2 Princip 3D FDM tiskáren | 10 |
| 3 Kinematika 3D FDM tiskáren | 14 |
| 3.1 Kartézské tiskárny | 15 |
| 3.2 Delta tiskárny | 18 |
| 3.3 SCARA | 21 |
| 3.4 Polární tiskárny | 22 |
| 3.5 Robotická ramena..... | 23 |
| 3.6 Závěr shrnutí přehledu kinematik FDM tiskáren | 24 |
| 4 Návrh 3D FDM tiskárny..... | 28 |
| 4.1 Koncept návrhu | 28 |
| 4.2 Výběr komponent pro tiskárnu..... | 31 |
| 4.2.1 Tisková hlava | 32 |
| 4.2.2 Podávání a vedení materiálu do tiskové hlavy..... | 36 |
| 4.2.3 Vyhřívaná podložka | 37 |
| 4.2.4 Koncové spínače | 38 |
| 4.2.5 Krokové motory | 39 |
| 4.2.6 Řemeny | 40 |
| 4.2.7 Závitové tyče..... | 41 |
| 4.2.8 Lineární vedení | 41 |
| 4.3 Řídící elektronika a ovládací panel | 43 |
| 4.4 Napájecí zdroj | 44 |
| 4.5 Návrh rámu a držáků jednotlivých komponent rámu..... | 45 |
| 4.5.1 Hlavní rám | 45 |

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| 4.5.2 | Konstrukce Z..... | 50 |
| 4.5.3 | Konstrukce tiskové hlavy..... | 53 |
| 4.5.4 | Celková konstrukce..... | 58 |
| 4.6 | Sestavení prototypu..... | 59 |
| 5 | Cenová kalkulace a porovnání..... | 68 |
| 6 | Závěr..... | 69 |
| | Seznam použité literatury | 70 |
| | Seznam obrázků..... | 76 |
| | Zdroje obrázků..... | 78 |
| | Seznam tabulek | 80 |
| | Seznam příloh | 80 |

1 Úvod

V dnešní době dochází k velkému rozšíření 3D tiskáren do domácností. Tento rozmach domácího tisku umožnilo především vypršení patentu společnosti Stratasys a zlepšující se výpočetní technika. Došlo ke zlevnění komponentů pro řídicí desky tiskáren, které byly v minulosti nejdražší částí. V dnešní době je možné pořídit řídicí elektroniku již v řádu nižších stokorun, dále také dochází k masivnějšímu rozšiřování 32bitových řídicích jednotek, které umožňují kvalitnější tisk kvůli svému většímu výpočetnímu výkonu a následné možnosti jemnější regulace krokových motorů. [1,2]



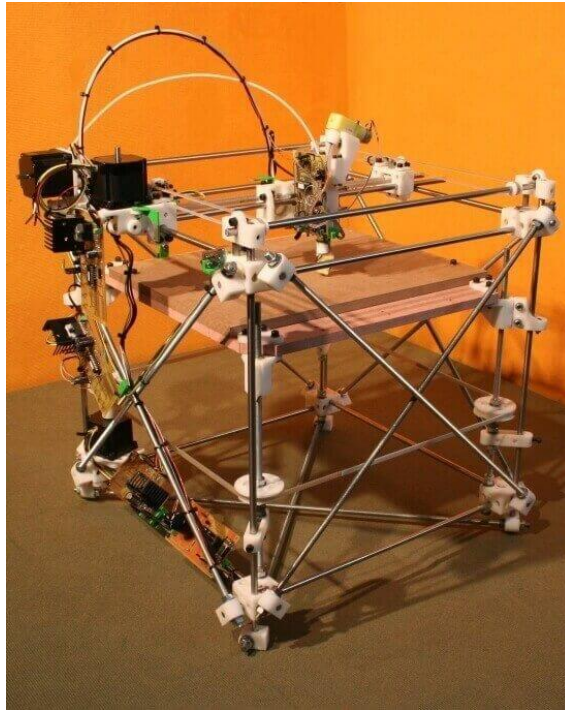
Obrázek 1: patent společnosti Stratasys

Nejrozšířenějším typem 3D tiskárny v domácnosti jsou FDM tiskárny, a to pro svou nízkou pořizovací cenu a nízkou cenu materiálu pro tisk.

Materiál je dodáván ve formě plastového drátu (filamentu) o průměrech 1,75 mm a 2,85 mm. Tyto průměry jsou nejrozšířenější a staly se standardem pro toto odvětví, dodavatelů této formy materiálu je v dnešní době velké množství a je možno vybírat z velké škály druhů plastů, ať už jde o konkrétní druh, nebo například barevnou kombinaci. Existují i tiskárny, využívající přímo plastového granulátu, jedná se však spíše o velkoformátové tiskárny, u kterých by přísun materiálu ve formě drátu nebyl dostatečný. [3,4]

Velká část tiskáren, které veřejnost vlastní, je založena na open source projektech, jmenovitě například projekt RepRap. Tyto projekty poskytují solidní základ pro vývoj vlastních tiskáren, využívají je i velcí výrobci tiskáren a zakládají na nich vlastní

konstrukce. To přináší velkou výhodu pro širokou veřejnost v možnosti vlastní stavby a případného vylepšení jejich návrhu. [5]



Obrázek 2: první RepRap 3D FDM tiskárna

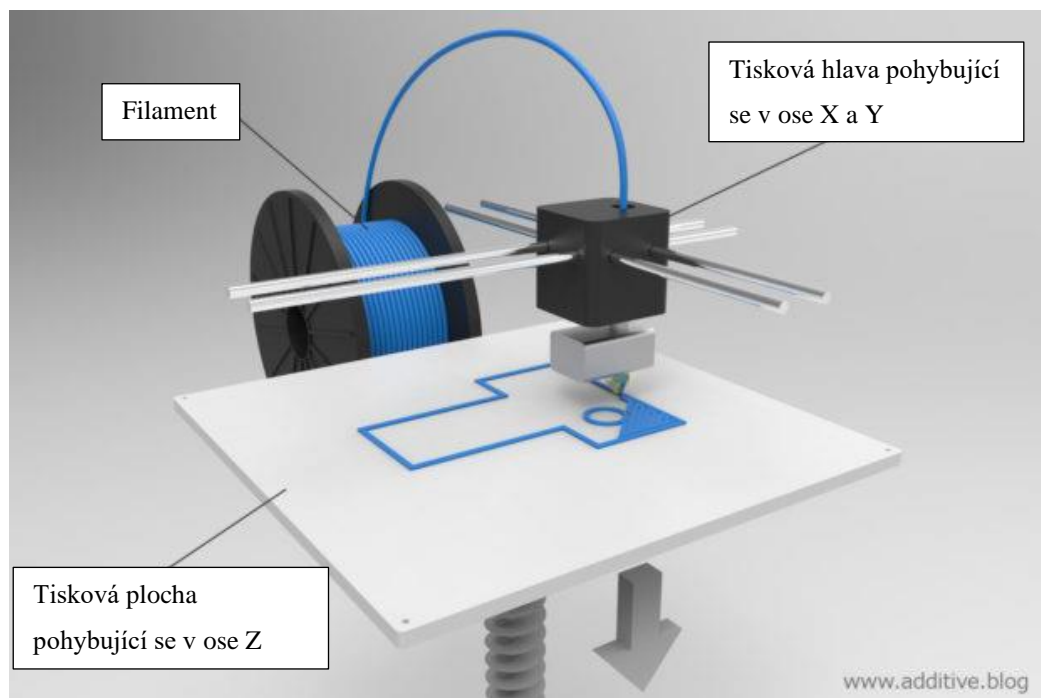
Výhodou pro stavitele tiskáren je také množství dostupných open source firmwarů pro řídicí desky. Není tedy nutné psát vlastní firmware, stačí pouze zadat parametry tiskárny do připravených konfiguračních souborů. Pro tyto firmwary jsou následně i zdarma dostupné CAM softwary, slicery, ve kterých je možno zpracovávat strojový kód z CAD modelů. [6,7]

Nezávisle na této skutečnosti jsou zdarma dostupné i kvalitní CAD softwary, například Autodesk Fusion 360 (pouze za určitých podmínek), FreeCAD a další. Dostupnost těchto softwarů dále podporuje rozmach 3D tisku mezi běžnou veřejností. Dochází také k tvorbě databází zdarma stažitelných modelů, uživatel tedy nemusí být schopný tvorby modelů a může využívat volně dostupných dat, vytvořených jinými lidmi. [8,9]

V dnešní době je pravděpodobně nejrozšířenější tiskárnou v domácím segmentu Prusa i3 a její jednotlivé verze a klony. Mnoho dalších tiskáren využívá podobné koncepce. Tento koncept je snadno vyrobitelný i z velmi levných materiálů, například dřeva, nejedná se však z mechanického pohledu o nejtěžší konstrukci. Vyšší tuhost rámu umožňuje rychlejší tisk a dochází ke zlepšení kvality vytištěných součástí.

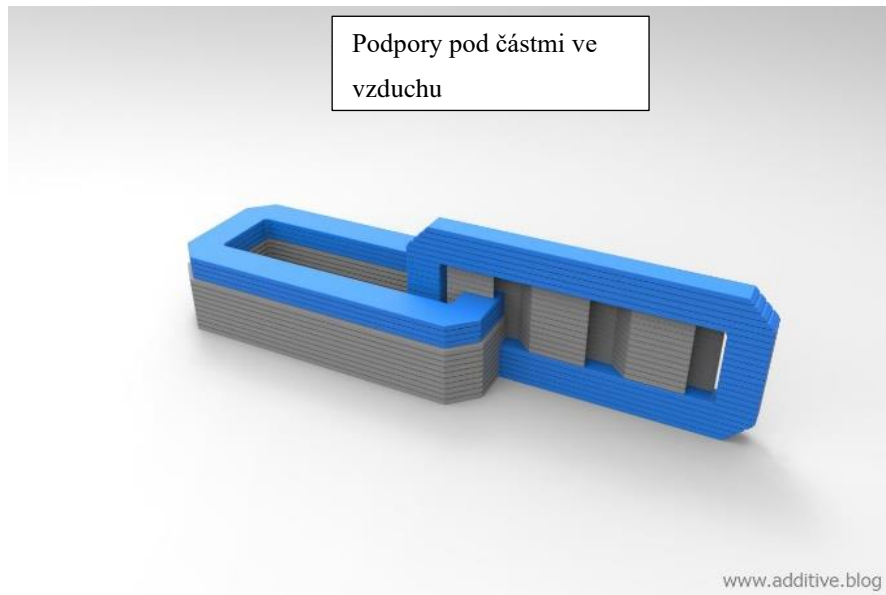
2 Princip 3D FDM tiskáren

Zkratka FDM znamená Fused Deposition Modeling, často je také používána zkratka FFF – Fused Filament Fabrication. Základem 3D FDM tisku je natavení plastového materiálu v trysce, konkrétně termoplastu, a jeho postupné nanášení ve vrstvách. Běžně je tisk prováděn v rovných vrstvách. Existují ale již i případy, kdy poslední tištěná vrstva opisuje povrch výtisku pro zlepšení jeho kvality. Tato možnost je rozdílná pouze v použitém softwaru, hlavním limitem je rozměr tiskové hlavy – nesmí docházet ke kolizi částí hlavy s již vytištěným objektem. [10,11]



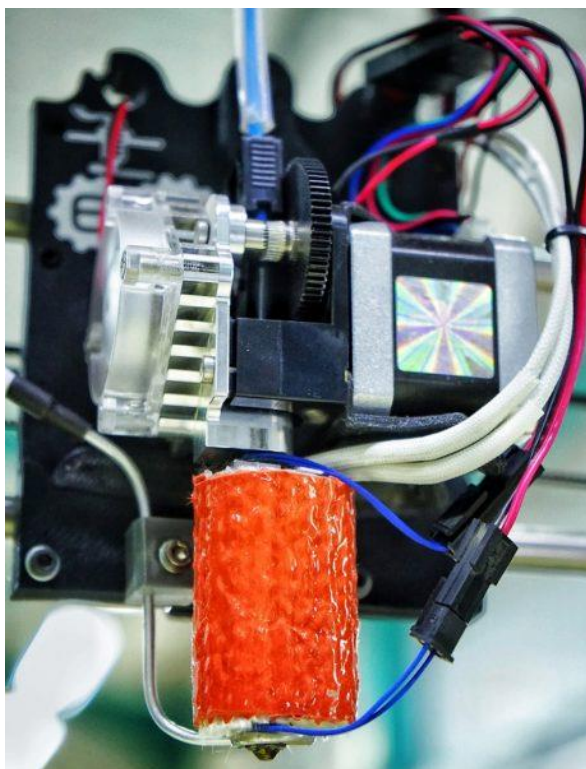
Obrázek 3: princip FDM tiskáren

Při tisku modelu je nutno tisknout i podpurné struktury pro podepírání vrstev, které by byly jinak tištěny do vzduchu, dále se také tisknou části podporující držení modelu na tiskové podložce. Tyto podpurné struktury nemusí být tisknuty ze stejného materiálu, je možné použít i jiný druh materiálu, který je například rozpustný v chemickém rozpouštědle, které je k stavebnímu materiálu netečné. Jedním z těchto materiálů je například PVA, tento materiál je rozpustný ve vodě, má však negativní vlastnosti jako vysokou navlhavost a vyšší cenu. [12]



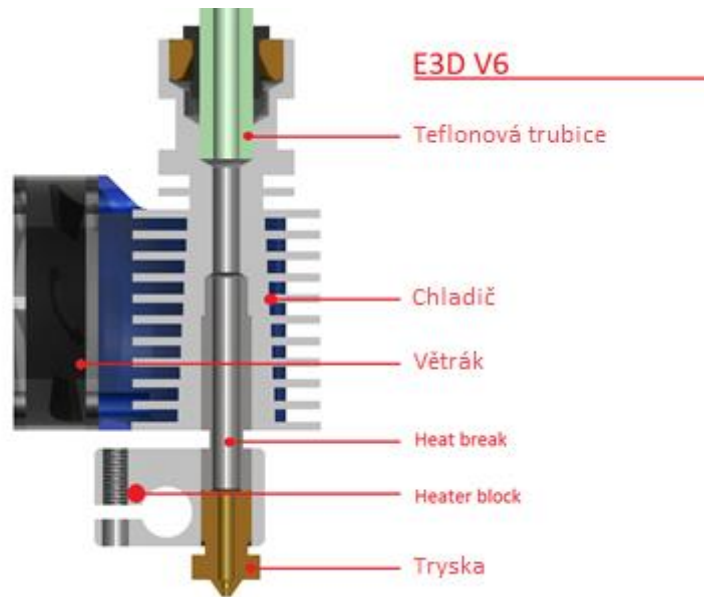
Obrázek 4: tištěné podpory

Po vytištění modelu je nutné model očistit od těchto podpor. S ohledem na to, že tloušťka tisknuté vrstvy je nejběžněji v rozmezí 0,05 až 0,2 mm jsou jednotlivé vrstvy vidět, následuje většinou povrchová úprava (mechanická nebo chemická), která zdokonaluje kvalitu povrchu. U konstrukčních modelů často není zlepšení kvality povrchu požadováno a výtisk zůstává tedy neupravený. Nejmenší tloušťka vrstvy je dána rozlišením tiskárny v ose Z a požadavkem na rozumně dlouhý tiskový čas, naopak největší tloušťka vrstvy je dána průměrem trysky, výkonem topného tělesa a schopností podávat materiál. S ohledem na zlepšování hotendů v dnešní době je možné tloušťku vrstvy zvyšovat, dochází ale ke snižování kvality. Důvodem k možnosti zvýšení tloušťky vrstvy je větší výkon topných těles, a tedy i možnost dosáhnout většího objemového toku materiálu při použití trysky o větším průměru. Příkladem takového hotendu je například E3D SuperVolcano. Výhodou může být také možnost dosáhnout vyšší teploty, což otevírá možnost tisku materiálu jako je například i PEEK. [12,13,14,15]

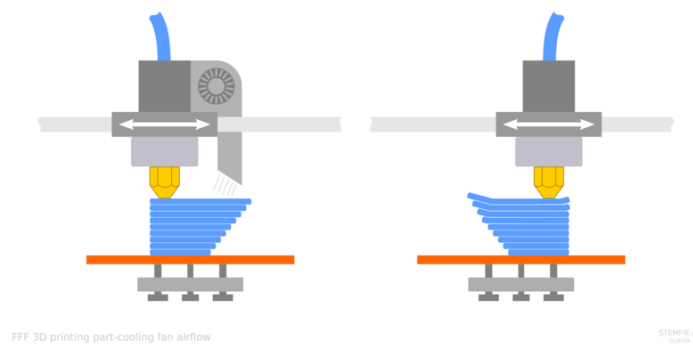


Obrázek 5: tisková hlava E3D SuperVolcano

Pro tisk je důležité, aby materiál dostatečně rychle tuhnul po nanesení tryskou – toto je důležité proto, aby nedocházelo k dodatečnému tečení a deformaci. Pro chlazení materiálu bezprostředně po jeho nanesení tryskou jsou používány větráky přivádějící chladný vzduch. Stejně důležité je také chlazení materiálu, který ještě nedošel do teplé zóny trysky. Nesmí docházet k jeho natavení, docházelo by totiž k zacpání celé sestavy hotendu a následnému zastavení tisku. Z tohoto důvodu je tryska a heatblock oddělen tenkou kovovou trubičkou od zbytku sestavy, aby nedocházelo k velkému přenosu tepla a horká zůstala pouze tryska a krátká teplá zóna. Pro toto oddělení je dnes často využíváno titanu pro jeho nízkou teplotní vodivost a vyšší pevnost, než má běžně používaná korozivzdorná ocel. Následuje kovový chladič a větrák, který udržuje materiál ve formě filamentu chladný. [16]



Obrázek 6: schéma hotendu E3D V6



Obrázek 7: chlazení výtisku

Podle tisknutého materiálu je také důležité, aby teplota tisknutého objektu neklesala příliš rychle, s ohledem na vysokou teplotní roztažnost některých materiálů by docházelo ke kontrakci již vytisknutých vrstev a vytisknutý model by byl zdeformovaný a nekvalitní. Pro snížení tohoto problému jsou využívány například vyhřívané podložky a zakrytované tiskárny. Vyhřívané podložky ohřívají model zespod a udržují jeho teplotu po dobu tisku, model následně chladne až celý v kuse. Zakrytování je využito k eliminaci proudění vzduchu a ochlazování výtisku, výhodou je také možnost využití vzduchových filtrů, a tedy i snížení uvolňování mikroskopických částic plastu do okolí. Další možností je vyhřívání celé tiskové komory, na tuto technologii do začátku tohoto roku držela patent společnost Stratasys a není tedy zatím hojně využívána. [17]

3 Kinematika 3D FDM tiskáren

FDM tisk označuje princip nanášení materiálu. Samotný pohyb stroje, který materiál nanáší, může být realizován více způsoby. Pro určení polohy tiskové hlavy v prostoru je také důležité, jaký souřadnicový systém stroj používá. Aktuálně je 3D tisk běžně realizován stroji, které umožňují pohyb tiskové hlavy pouze v třech osách, nedochází tedy k naklápění tiskové hlavy vůči podložce. [18]

S ohledem na tvorbu modelů v CAD softwarech je zdrojový model v kartézských souřadnicích, pokud tiskárna používá jiný souřadnicový systém, tak je nutno tyto souřadnice pro tisk přepočítat.

Úplně nejzákladnějším příkladem 3D FDM tisku může být například i tvorba objektů pomocí 3D pera. Ve své podstatě se jedná také o 3D FDM tisk, poloha v prostoru je však řízena pouze rukou uživatele a není tedy přesná. Tato pera bývají často používána jako doplněk ke strojovému 3D tisku, a to jako možnost spojení vytištěných dílů a také pro jejich opravu. [19]



Obrázek 8: 3D pero

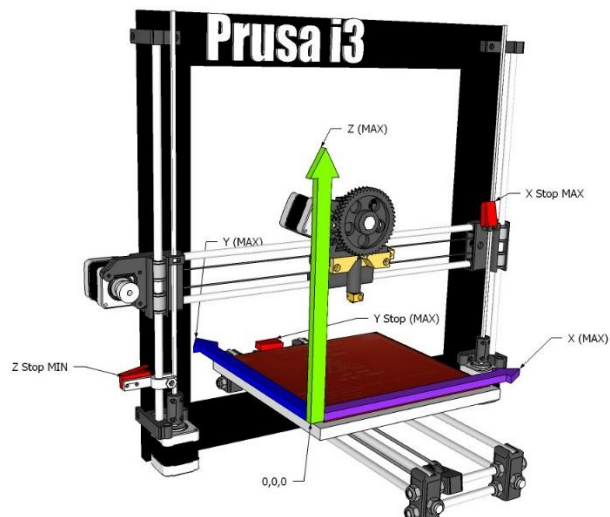
Konkrétními mechanickými uspořádáními jsou:

- Kartézské tiskárny
- Delta tiskárny
- SCARA tiskárny
- Polární tiskárny
- Robotická ramena [20]

Každá z těchto variant má své výhody a nevýhody. V současnosti ovšem převládají hlavně kartézské a delta tiskárny. V následujících kapitolách jsou tato mechanická uspořádání popsána.

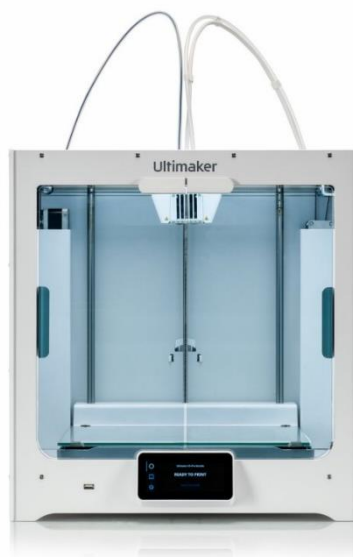
3.1 Kartézské tiskárny

Kartézské 3D FDM tiskárny jsou pravděpodobně nejčastěji používaná koncepce. U tohoto druhu tiskáren je také důležité rozlišit, které části tiskárny se pohybují, a ve kterých osách a které části zůstávají stacionární. U nejběžnějších konstrukcí dochází k pohybu tiskové plochy v ose Y, v ose X a Z se pohybuje tisková hlava. Tento druh konstrukce je snadný na výrobu (tedy i levnější), nevýhodou však je neustálý pohyb tištěného modelu. Při rychlém pohybu tištěného modelu může docházet k deformacím a také je kladen větší nárok na adhezi k tiskové ploše. U tisku velkých a těžkých objektů je toto uspořádání obzvláště nevýhodné, protože je vyžadován pohyb velké hmoty velkou rychlostí a s velkým kladným i záporným zrychlením. Tisková hlava se pohybuje po portálu ve směru osy X, celý tento portál se následně pohybuje v ose Z. Příkladem takovéto tiskárny je například Prusa i3. [21]



Obrázek 9: Prusa i3

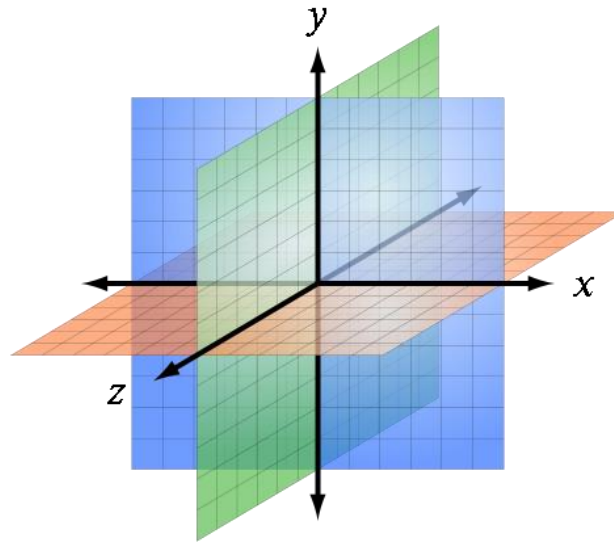
Další, také velmi častou, možností je pohyb tiskové podložky pouze v ose Z. Osa Z se při tisku pohybuje ze všech os nejpomaleji (pokud se jedná o klasický tisk, ne o nonplanární). Tištěný model se tedy pohybuje pouze v jedné ose jedním směrem a velmi pomalu, to je výhodné pro kvalitu tisku. Příkladem takovéto tiskárny jsou stroje od společnosti Ultimaker. [22]



Obrázek 10: Ultimaker S3

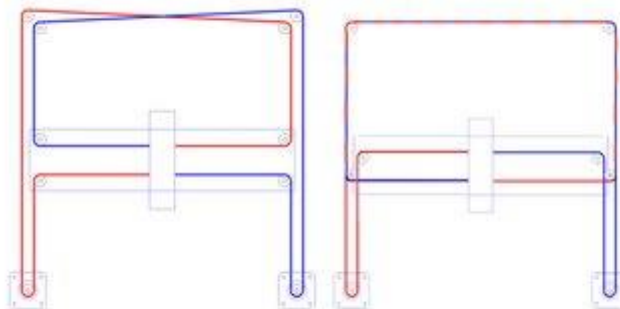
Pokud chceme, aby byl model při tisku plně stacionární je zde několik variant. Jednou možností je užití stacionární tiskové podložky, přičemž se v ose Z pohybuje konstrukce, na které jsou osy X a Y. Další možností je využití portálové konstrukce se stacionární tiskovou plochou.

Pro vyjádření polohy v prostoru u všech těchto strojů využíváme běžné kartézské souřadnice, na konkrétním mechanickém uspořádání jednotlivých os nezáleží. Výsledná poloha ve vztahu k tiskové podložce je vždy stejná, ať už se tisková plocha pohybuje v jedné z os, nebo je plně stacionární.

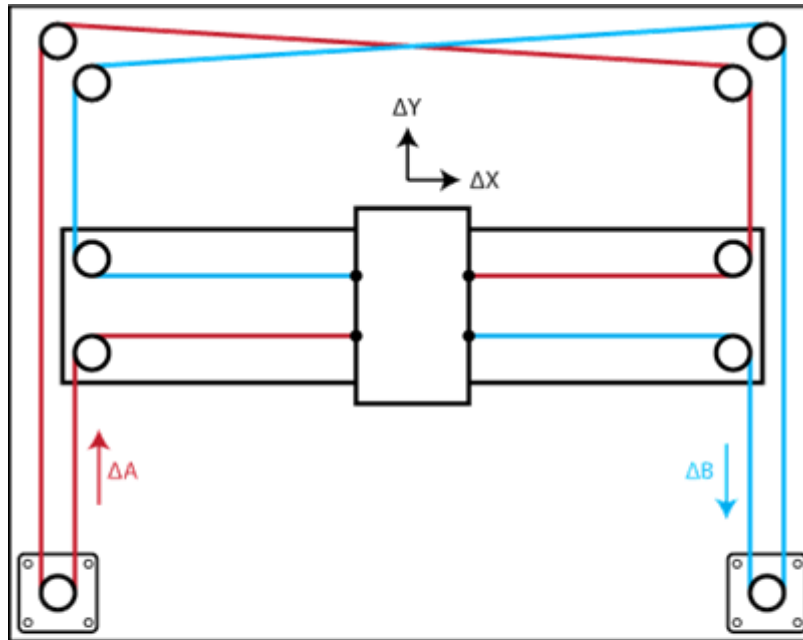


Obrázek 11: kartézský souřadnicový systém

Pro pohyb v jedné ose je využíváno pohybu jednoho nebo více motorů stejným směrem. Využití více motorů pro pohyb v jedné ose je nejčastější pro osu Z, jako je tomu například u tiskáren Prusa i3. Výjimku z tohoto pravidla představují tiskárny koncepce CoreXY, u nichž je pohyb tiskové hlavy v osách X a Y závislý na vzájemném pohybu dvou motorů, které jsou mechanicky propojené a pohyb v jedné ose vzniká složením pohybů těchto dvou motorů. Smysl jejich otáčení při pohybu tiskovou hlavou pouze v jedné ose nemusí být stejný. [23,24]



Obrázek 12: CoreXY, varianty uspořádání řemenů osy X a Y



Rovnice pohybu:

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B), \quad \Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B)$$

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y, \quad \Delta B = \Delta X - \Delta Y$$

Obrázek 13: matematický popis souřadnic CoreXY

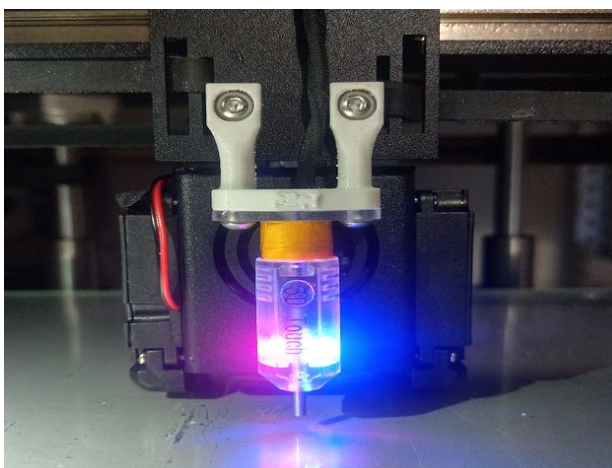
3.2 Delta tiskárny

Tiskárny delta pro pohyb tiskové hlavy využívají pohyb tří ramen spojených v jednom bodě, složením jejich pohybů je možno určit polohu v prostoru. Tiskový objem je na rozdíl od kartézských strojů válcového tvaru. Na rozdíl od kartézských strojů tedy nestačí pohyb jednoho motoru/osy pro pohyb tiskové hlavy po přímce. Výhodou je možnost dosažení vyšších tiskových rychlostí, dochází totiž k pohybu menší masy – motory pro pohyb tří os jsou stacionárně umístěné na rámu stroje. Tisková plocha je v tomto případě také stacionární. [25]



Obrázek 14: delta tiskárna - Flsun Delta Kossel

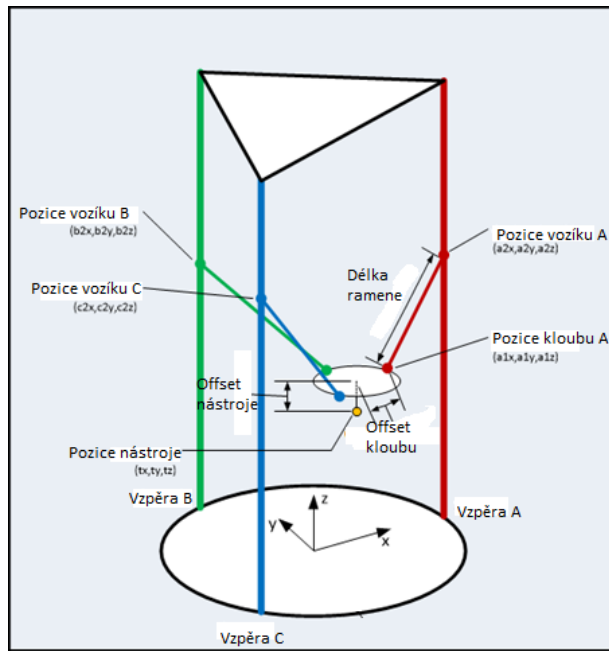
Nevýhodou je složitější obsluha a horší diagnostika potíží, příkladem může být také vyrovnání tiskárny před začátkem tisku. Vyrovnání tiskárny je složitější z toho důvodu, že není možné vyrovnávat každou rovinu zvlášť pouze nastavením jedné osy. Pro usnadnění vyrovnání tiskárny před tiskem jsou dnes využívány sondy¹ v kombinaci s automatickým softwarovým vyrovnáním. Sondy pro vyrovnání tiskové plochy se využívají na všech koncepcích tiskáren. [26,27,28]



Obrázek 15: dotyková sonda BLTouch

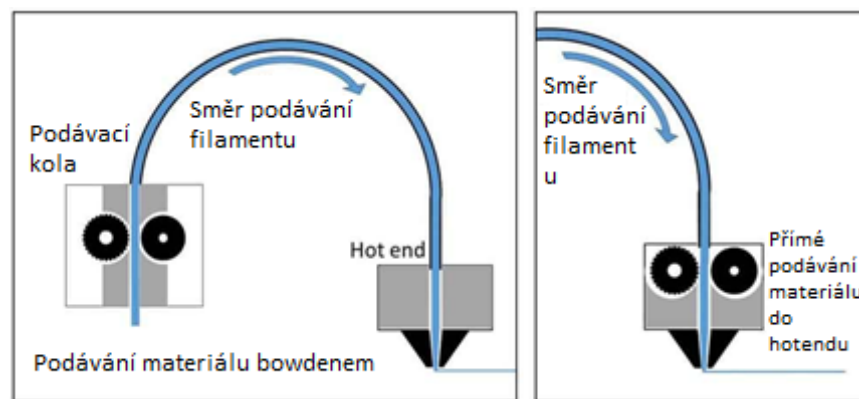
Další nevýhodou je také nutný přepočít souřadnic, tiskárny sice pracují s kartézskými souřadnicemi, pro pohyb jednotlivých ramen je však nutno souřadnice přepočítat. Tento přepočít neprovádí uživatel ručně, dochází k němu automaticky. [29]

¹ Dotykové, indukční, kapacitní nebo optické



Obrázek 16: schéma Delta tiskárny, přepočítání souřadnic

S ohledem na snahu minimalizace hmotnosti tiskové hlavy bývá u delta tiskáren umístěn podávací mechanismus filamentu stacionárně na rámu, filament je následně veden bowdenem do tiskové hlavy. Tato možnost je i u ostatních koncepcí tiskáren, u delta tiskáren ale převažuje. S ohledem na tlačení filamentu dlouhým bowdenem je tisk flexibilních a měkkých materiálů značně limitován. [30]

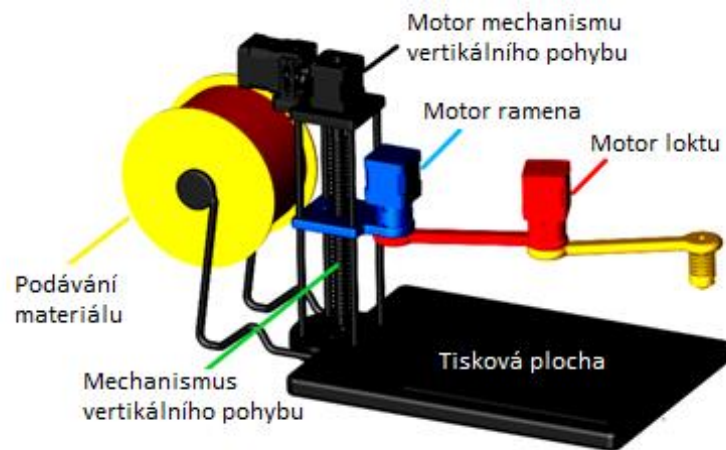


Obrázek 17: porovnání pohonu filamentu

Tiskárny typu delta jsou častěji využívány pro tisk uměleckých předmětů, výhodou pro tyto druhy výtisků může být i vyšší maximální výška modelu a již zmíněná vyšší rychlost tisku.

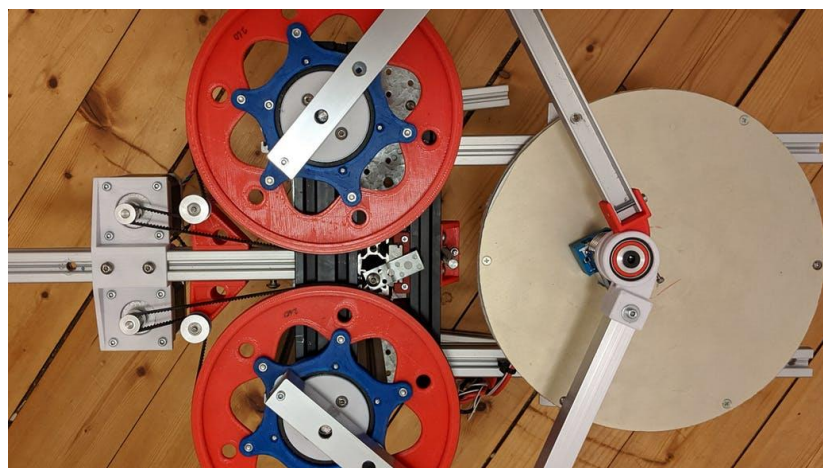
3.3 SCARA

Název SCARA je zkratkou pro Selective Compliance Assembly Robotic Arm, jedná se o využití robotické ruky. Tento systém byl vyvinut v roce 1979 v Japonsku, návrh byl určen pro manipulaci se součástkami. První využití tohoto systému nalezneme v automobilovém průmyslu. [31]



Obrázek 18: schématické zobrazení SCARA tiskárny

U tiskáren koncepce SCARA je tisková plocha stacionární, mechanismus ruky se pohybuje po ose Z, ruka následně vykonává pohyb v ose X a Y. Pro mechanismus ruky může být použito více segmentů – na schématickém zobrazení na obrázku 16 je využito pouhých dvou ramen, další používané varianty používají například dvojici těchto ramen (označováno jako Parallel SCARA). [32]



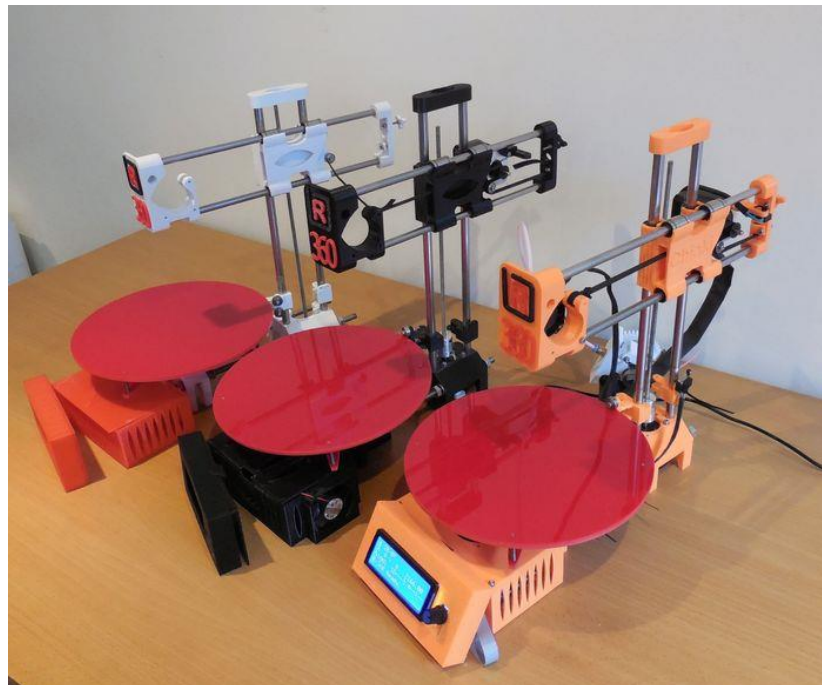
Obrázek 19: Parallel SCARA

Výhodou těchto 3D tiskáren bývá převážně větší rychlost tisku oproti nejběžněji užívaným kartézským tiskárnám, cenou za zvýšení rychlosti tisku však bývá horší kvalita výsledného tisku.

Nevýhodou těchto tiskáren je jejich velmi malé rozšíření, a tedy i malá podpora tiskové komunity. Firmware pro řízení těchto tiskáren je dostupný, jeho konfigurace pro konkrétní tiskárnu je podstatně složitější než pro běžnou kartézskou tiskárnu.

3.4 Polární tiskárny

Polární tiskárny mají tiskovou plochu kruhovitěho tvaru, a to s ohledem na princip fungování. Pro definici polohy v prostoru jsou využívány polární souřadnice. [33]



Obrázek 20: tiskárna R-360

Tisková plocha se otáčí okolo své osy, tiskové rameno se pohybuje v ose Z. Po tomto rameni se následně pohybuje tisková hlava. Opět se jedná o velmi málo využívaný mechanický koncept 3D FDM tiskáren, stejně jako je tomu v případě SCARA tiskáren, jde spíše o demonstraci technických možností a aktuálně nepřináší významné výhody. [33,34]

Výhodu bychom mohli najít například při tisku objektů kruhového průřezu, a to z toho důvodu, že pohyb po kružnici zde není tvořen složením pohybů více os² a bude tedy tvořit dokonalý kruh.

3.5 Robotická ramena

Pro pohyb tiskové trysky v prostoru je možno využít také klasického průmyslového robotického ramena. Tato koncepce není v běžných sférách 3D FDM tisku běžně aplikována, její využití nalezneme například ve specifických případech velkoformátového 3D FDM tisku.

S ohledem na rozmach 3D tisku v dnešní době je také důležité zmínit tisk uměleckých předmětů a také domů z betonu při kterých právě bývá nejčastěji využíváno průmyslových robotických ramen. [35,36]



Obrázek 21: velkoformátový FDM tisk

Tisk betonu sice nespadá do kategorie „FDM“, protože se nejedná o tavení plastového materiálu, proces je to však velmi podobný. Při tisku z betonu je pomocí trysky nanášena po vrstvách betonová směs, která musí mít vhodnou konzistenci, aby neucpávala trysku a zároveň zachovávala tvar. [35]

² Pouze za předpokladu, že střed kružnice bude umístěn v průmětu středu otáčení tiskové plochy



Obrázek 22: 3D tisk betonu

Tento druh tisku bude s velkou pravděpodobností v budoucnu stále více rozšířen. Je pravděpodobné, že 3D tisk velkých struktur z betonu nebo podobných směsí bude získávat na důležitosti. [35]

3.6 Závěr shrnutí přehledu kinematik FDM tiskáren

Výše zmíněné mechanické uspořádání tiskáren reprezentují nejrozšířenější varianty 3D tisku. V tomto odvětví dochází k poměrně rychlému posunu vpřed, a je tedy možné, že se budou objevovat další nové varianty.

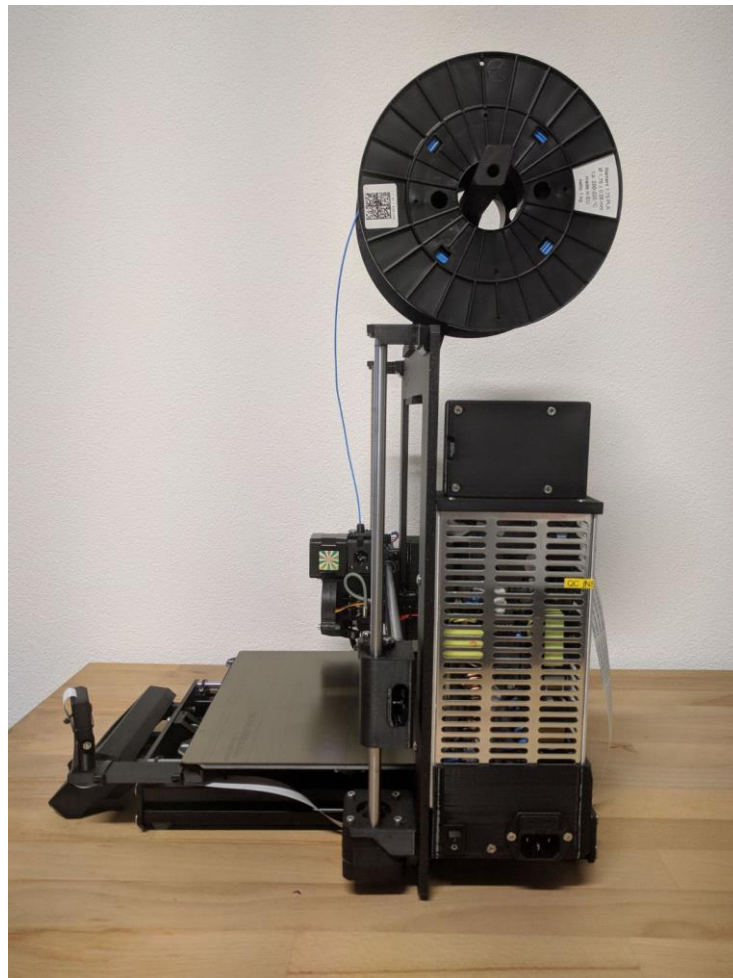
Nelze jednoznačně určit, které uspořádání je nejlepší, některé koncepce se pouze více hodí k určitému použití. Rozšířenost určitých koncepcí můžeme také přisuzovat jejich jednoduchosti.

S ohledem na neustálé zvyšování požadavků na kvalitu vytištěných objektů je také možné, že v budoucnu budou mít větší význam stroje schopné tisku ve všech osách najednou. Nepůjde tedy pravděpodobně pouze o tisk po jednotlivých vrstvách, jako tomu je nyní, ale bude docházet k natáčení tiskové hlavy a optimalizaci drah tiskové hlavy s ohledem na kvalitativní požadavky. Tento trend předpovídá například nonplanární tisk, který by naklápění tiskové hlavy dokázal dobře využít.

U nejrozšířenějších hobby tiskáren, které jsou na trhu dostupné, hlavně u tiskáren založených na koncepci Prusa i3 je patrné, že nejsou konstruovány s ohledem na dynamiku tisku. Při 3D FDM tisku sice na tiskovou hlavu nepůsobí velké síly,

při rychlejším pohybu však vznikají problémy s tuhostí rámu. S ohledem na vývoj hotendu pro 3D FDM tisk je zrychlování tisku dalším logickým krokem v rozvoji tohoto odvětví. S ohledem na tuto skutečnost je tedy nutné začít k návrhu 3D FDM tiskáren přistupovat jinak.

Příkladem nevhodně navrženého řešení může být například umístění držáku na filamenty u tiskáren Prusa i3. Držák je zde umístěn na vrchu rámu, který není nijak stranově vyztužený. Při rychlém tisku se vysoko umístěná hmota projevuje negativně. Je to způsobeno tím, že tištěný objekt se s podložkou pohybuje a způsobuje kývání rámu.



Obrázek 23: boční pohled na tiskárnu Prusa i3

Podobně nešťastné řešení je zvoleno i v návrhu tiskárny Prusa Mini. Zde je osa Z a její konstrukce pouze na jedné straně, nejedná se tedy o moc tuhé řešení a dle mého názoru není vhodné ani v hobby podmínkách.



Obrázek 24: Prusa Mini

Kartézské tiskárny typu „kostka“, kdy se nejčastěji pohybuje tisková podložka v ose Z, a tedy podstatně pomaleji jsou v tomto ohledu lepší. Zde se domnívám, je prostor pro zlepšení hlavně pro objemnější, a tedy i těžší tisky. V ideálním případě bude tisk stacionární a ve všech osách se bude hýbat tisková hlava.

Tento požadavek v dnešní době splňují hlavně tiskárny typu delta. Jejich nevýhodou je poměrně složitější nastavení a obsluha, dalším problémem je také nutnost složení pohybu tiskové hlavy po přímce otáčením více motorů najednou.

Aktuálně prodávanou tiskárnou se stacionární tiskovou plochou a kartézskou konstrukcí jsou tiskárny M3D, ty jsou však určeny pro tisk pouze menších objektů.



Obrázek 25: tiskárny M3D

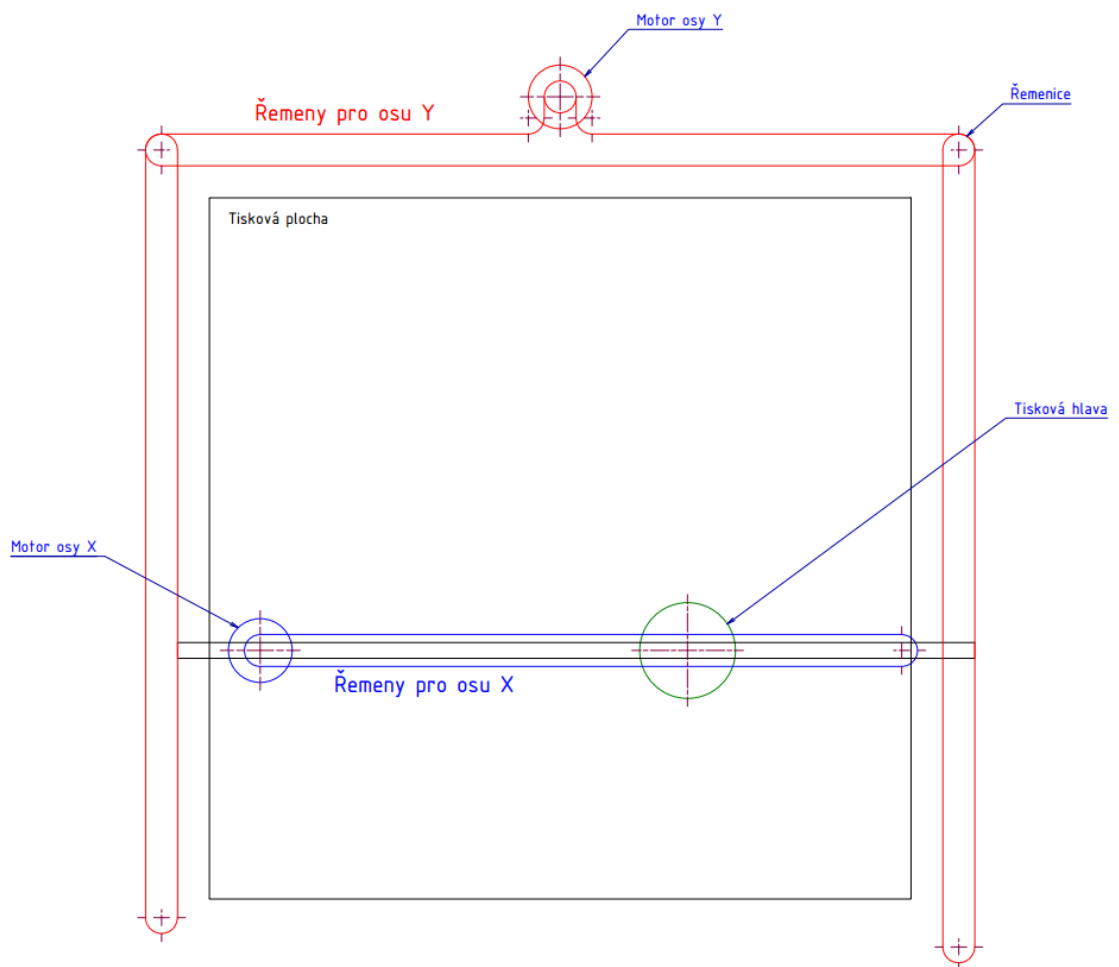
Z výše zmíněných důvodů jsem se rozhodl pro návrh řešení, kdy tisková plocha bude plně stacionární a půjde o kartézskou tiskárnu. Zároveň budu klást důraz na to, aby byl rám opravdu tuhý a zároveň, aby bylo snadné z navrženého řešení následně upravit návrh tak, aby byl určen pro tisk velkých objektů.

4 Návrh 3D FDM tiskárny

4.1 Koncept návrhu

Pro mnou navrženou tiskárnu jsem si zvolil kartézské uspořádání tiskárny. Odlišnost od běžně používaných kartézských uspořádání je v tom, že tisková plocha je stacionární. Na ose Z se pohybuje konstrukce nesoucí ostatní dvě osy. Tato varianta přináší výhody stacionárního výtisku, a to zejména při tisku větších, a tedy těžších objektů, jak jsem zmínil v přechozí kapitole.

Pro pohon os X a Y bude tiskárna vybavena dvěma motory, každý pro jednu osu. Pro přenos bude použito řemenů v následujícím rozložení:



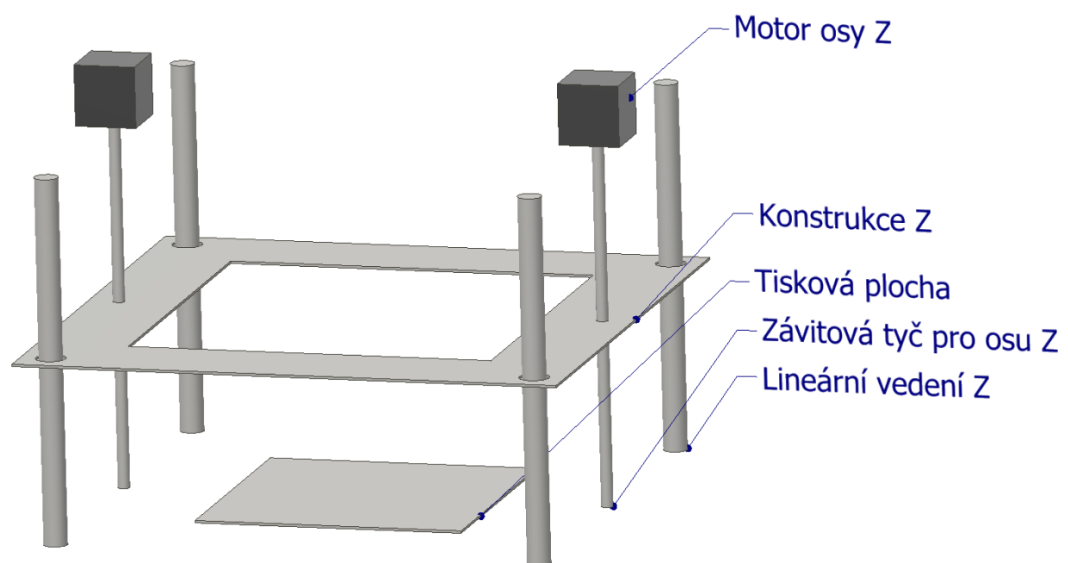
Obrázek 26: schématický nákres vedení řemenů pro osu X a Y

Toto rozložení přináší výhodu v tom, že konstrukce nesoucí osu X nebude mít tendenci se křížit, protože oba její konce budou mechanicky svázaný. Rozdělení řemenů pro osu Y jsem zvolil proto, aby byla snadnější jejich instalace a také pro případný servis.

Při použití jednoho řemenu na celou smyčku by byl tento řemen dlouhý, při jeho poškození by byla výměna následně podstatně dražší.

Motor pro osu X se bude pohybovat s konstrukcí této osy. To s sebou přináší zvýšenou hmotnost a lehkou stranovou nevyváženost. Jediným řešením tohoto problému by bylo využití koncepce CoreXY. Pro jednoduchost ale chci zachovat běžné rozložení.

Pro pohon platformy v ose Z budou použity dva nezávislé krokové motory umístěné po dvou stranách se závitovou tyčí pro translaci pohybu. Vedení bude zajištěno čtyřmi vodícími tyčemi.



Obrázek 27: koncepce pro pohon v ose Z

U lineárního vedení osy Z mohu využít masivní tyče, nezvyšují hmotnost pohybujících se částí a použitím tyčí o větším průměru získám tužší konstrukci. Konstrukce nesoucí osy X a Y v ose Z bude vyrobena z již zmíněného plechu. Pro zlepšení tuhosti tohoto dílu budou kraje ohnuty, zachovám tak výrobní náklady na minimum. Na této konstrukci budou umístěny osy X a Y s pohonem a řemeny dle předchozího nákresu.

Pro zachování co nejnižší hmotnosti bude podavač materiálu umístěn na vrchní straně rámu, tedy zcela mimo pohyblivé části. Tato volba má za následek delší bowdenové vedení. Zachování nízké hmotnosti za tuto cenu stojí.

S ohledem na druh dílů, které tisknu (různé úchyty, redukce a podobné mechanické díly) je také výhodou, že pohyb tiskové hlavy po přímce je výsledkem pohybu pouze

jednoho motoru³, a ne složením více pohybů jako by tomu bylo u ostatních běžně dostupných tiskáren. U rovných hran je tedy předpokládána lepší výsledná kvalita povrchu.

Rozměr tiskárny bude zvolen s ohledem na dostupnost a cenu standartních dílů, hlavně tiskových podložek. Tiskárna je navržena tak, aby byla v budoucnu možná její snadná výroba ve větším rozměru.

Pro snadnost výroby budou hlavní nosné části navrženy pro výrobu z ohýbaných plechových dílců, další nestandardní díly budou navrženy pro snadný 3D tisk a soustružení. Využití tištěných dílů je výhodné kvůli nízké výrobní ceně při kusové výrobě.

Pro sériovou výrobu by bylo následně nutné tyto díly upravit pro využití jiné technologie výroby, například obrábění nebo vstřikování plastů. V kombinaci s využitím levných plechových dílů by bylo možné tuto tiskárnu vyrábět za nízkou cenu.

Tištěné díly budou navrženy pro tisk na SLA 3D tiskárnách, a to s ohledem na mě dostupné technologie tisku, a také možnosti tisku tvarově složitějších dílců.

Jak již bylo zmíněno, pro stavbu vlastní 3D FDM tiskárny je v dnešní době dostupné velké množství standardizovaných dílů, jejich využití je výhodné pro jejich nižší cenu, než při vývoji všech komponent. Jedná se také o odzkoušené konstrukce s velmi dobrou poskytnutou podporou. Jejich konkrétní výběr záleží na očekáváních, které uživatel od tisku má.

³ Pouze za předpokladu umístění hrany tištěného objektu rovnoběžně s jednou z os X nebo Y.

4.2 Výběr komponent pro tiskárnu

V následující kapitolách se věnuji výběru nakupovaných komponent. S ohledem na rozličnost požadavků v 3D tisku je důležité uvést požadavky, které budou od tiskárny očekávány.

Z důvodu snadnosti tisku a požadovaných mechanických vlastností vytištěných objektů je mnou nejčastěji používaný materiál pro tisk PLA (Polylactic Acid) a PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) jejichž teplotní požadavky jsou dle výrobce:

| Materiál | Teplota trysky | Teplota tiskové plochy |
|-----------|----------------|------------------------|
| PLA [37] | 200–220 °C | 50–60 °C |
| PETG [38] | 220–250 °C | 60–80 °C |

Tabulka 1: teplotní vlastnosti materiálů

Tyto materiály nevyžadují během tisku uzavřenou tiskovou komoru. Jejich teplotní roztažnost je poměrně malá a za určitých podmínek se dají tisknout i bez vyhřívání tiskové plochy.

Dalším důležitým aspektem je také fakt, že po tiskárně nebude požadován tisk flexibilních materiálů. Není tedy nutné, aby podávání filamentu bylo přímo u tiskové hlavy a je možné vedení filamentu bowdenem. Toto rozhodnutí bude mít za následek nižší hmotnost tiskové hlavy, a tedy i lepší dynamiku. Pro výrobu flexibilních dílů preferuji tisk formy a následné odlití dílu z dvoukomponentních silikonů nebo polyurethanů. Výsledné díly dosahují lepší kvality a je možné vyrobit tímto způsobem i díly s nižší tvrdostí.⁴ [39]

Pro tisk nevyžadují využití jiného podpůrného materiálu než materiálu, kterým je tvořen výtisk. Není tedy nutné mít dvě tiskové hlavy. Při předpokládaném využití bowdenu pro vedení materiálu k tiskové hlavě by v budoucnu bylo možné i využití externí výměny filamentu.

S přihlédnutím k velikosti výtisků, které běžně tisknu, je vhodnější zvolit průměr filamentu 1,75 mm a trysku o průměru 0,4 mm.

⁴ Dle vlastních zkušeností až Sh20A, tiskem je nejběžněji možno dosáhnout pouze Sh85A.

Využití filamentu o průměru 2,85 mm by mělo význam při tisku větších výtisků tryskou o větším průměru, a tedy i větší spotřebě materiálu za stejnou jednotku času.

4.2.1 Tisková hlava

Tisková hlava je složena z více komponentů. Jedná se o sestavy skládající se z hotendu, dotykové sondy a chlazení. Tato část sestavy by měla být co nejlehčí, bude se hýbat největší rychlostí během tisku.

4.2.1.1 Hotend

Při volbě hotendu je důležité dodržet požadavky na dosahované teploty (konkrétně pro materiál PLA a PETG). Dále je také důležité zvolit takový hotend, aby pro něj byly snadno dostupné náhradní díly.

S ohledem na požadavek nízké hmotnosti jsem zvolil možnost vedení filamentu do hotendu bowdenem, hotend tedy musí být vyrobený pro tuto možnost.

Během užívání dochází k postupnému opotřebování trysky (zvětšování průměru, nepravidelný tvar) a je tedy potřebné trysky měnit. Při snadné dostupnosti (a tedy i nižší ceně) je také možné trysky měnit (různý průměr) dle aktuálních požadavků na tištěný objekt.

Porovnání části aktuálně dostupných hotendů je v následující tabulce:

| Název | Průměry filamentů [mm] | Průměry trysek [mm] | Dosahované teploty [°C] | Cena [Kč] ⁵ |
|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| E3D V6 | 1,75; 3 | 0,15 – 0,8 | 285 | 1395 |
| J-Head mkV | 1,75 | 0,25 - 1 ⁶ | 248 | 992 |
| Merlin | 1,75; 3 | 0,2; 0,3; 0,5 | 248 | 1158 |
| RepRapDiscount Hexagon | 1,75; 3 | 0,15 – 0,8 | 300 | 935 |

Tabulka 2: porovnání hotendů

⁵ Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 17.6.2020.

⁶ Nevyměnitelná, součástí hotendu.

Nižší maximální teploty u hotendů J-Head mkV a Merlin jsou dány tím, že přechod mezi horkou a studenou zónou je tvořen z plastu PEEK. Při překročení této teploty by tedy došlo k znehodnocení tohoto dílu. [40]

Za určitých podmínek je možné provozovat hotend J-Head mkV bez chlazení, pro tisk PLA je však potřebný. Velkou nevýhodou je také integrovaná tryska v těle hotendu. Pro změnu průměru nebo při opotřebení je tedy nutné vyměnit větší a dražší díl. [40]

Hotend Merlin využívá pro tisk trysek pro airbrush. Opět využívá částí z materiálu PEEK a není tedy možné dosahovat vyšších teplot. Využití nalezne hlavně při tisku objektů s malými detaily. [41]

RepRapDiscount Hexagon dosahuje poměrně vysokých teplot, trysky jsou snadno vyměnitelné. Jeho rozšíření je však poměrně malé a nemá tedy velkou uživatelskou základnu, která by byla schopná pomoci s řešením problémů. [42]

Nejvíce rozšířený hotend, který je pro projekt vhodný, je E3D V6. Je možné dosáhnout s ním teplot požadovaných zadáním. Trysky jsou snadno vyměnitelné a dají se pořídit z různých materiálů. Dostupné jsou například i trysky s rubínovou špičkou, tyto trysky jsou vhodné například pro tisk materiálů s příměsí vláken. [43]

S ohledem na velké rozšíření a splnění požadovaných vlastností jsem pro projekt zvolil hotend E3D V6.

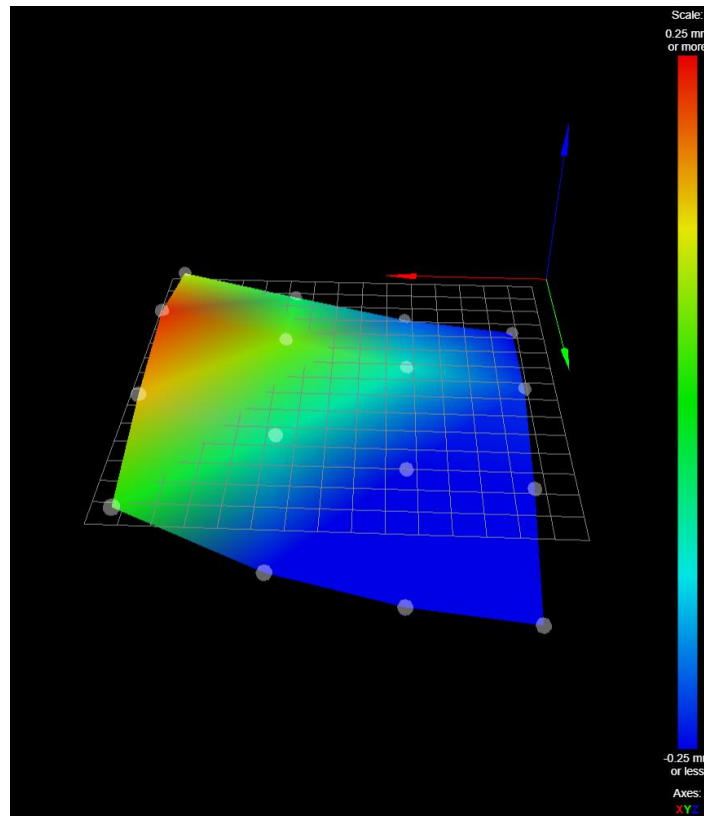


Obrázek 28: E3D V6

Součástí hotendu E3D V6 je nahřívací cartridge a termistor potřebný pro regulaci teploty. Pro dobré chlazení je vybaven ofukem a větráčkem.

4.2.1.2 Sonda pro vyrovnání

Sonda je u 3D FDM tiskáren využita pro korekci zkroucení tiskové plochy (například vlivem teplotní roztažnosti nebo výrobní nepřesnosti), využita je také pro nastavení tloušťky první vrstvy. Tloušťka dalších vrstev je následně určena posunem oproti vrstvám předchozím. [44,45]



Obrázek 29: mesh auto bed leveling

Při výběru sondy pro vyrovnání je důležité určit, pro jaký druh povrchu má být sonda použitelná.

Pro vyrovnávání tiskové plochy jsou v 3D tisku využívány tyto druhy sond:

| Typ | Použitelné pro povrchy |
|-----------|--------------------------------|
| Dotyková | Všechny |
| Kapacitní | Všechny, různá citlivost |
| Indukční | Pouze kovové |
| Optické | Problém s odrazivými materiály |

Tabulka 3: porovnání sond pro vyrovnání [44]

Z důvodu možnosti výměny tiskové plochy v budoucnu a zároveň absenci nutné změny nastavení při změně typu tiskové plochy jsem zvolil použití dotykové sondy.

Základní dotykovou sondou může být obyčejný mikrospínač, který je do pozice pro měření přesunut servomotorem. Toto řešení je levné, není však spolehlivé a je tedy vhodné spíše pro hobby řešení.

Hotovým řešením dotykové sondy s automatickým posuvem sondy do pozice pro měření je sonda BLTouch. Tato sonda používá dotykový hrot a hallův senzor určující sepnutí namísto klasického spínacího kontaktu. [45]

Specifikace této sondy jsou na následujícím obrázku:

| Specifikace | | BLTouch CAD |
|----------------|---|-------------|
| Napětí | 4.8 ~ 5.1 V | |
| Proud | 15mA | |
| Špičkový proud | 300mA | |
| Výstup | 5V / 3.3V(internal) | |
| Barva | Semitransparent White | |
| Obsah olova | Lead Free | |
| Délka kabelu | 150±5 mm | |
| Hmotnost | 0.35 oz (10g) | |
| Připojení | 3Pin : Brown(-, GND) Red(+5V) Orange(control signal) 2Pin : Black(-, GND) White(Zmin) | |

Obrázek 30: specifikace BLTouch

Tuto sondu jsem zvolil pro mou konstrukci. Cena této sondy je 1062,- Kč⁷.

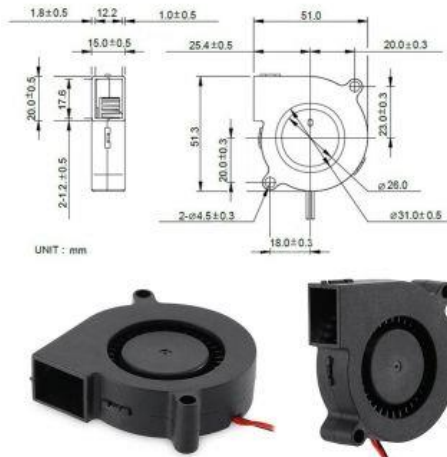
4.2.1.3 Chlazení výtisku

Pro umožnění tisku převisů je důležité, aby tisková hlava obsahovala větrák určený pro chlazení výtisku. Tento větrák je regulován řídicí elektronikou, neběží tedy neustále a je možno regulovat jeho výkon.

S ohledem na to, že proud vzduchu musí být veden přímo pod trysku jsem pro mou aplikaci zvolil radiální větrák. Průřez výstupu je podstatně menší než u axiálních větráků.

Konkrétně jsem zvolil větrák s označením 5015. Toto označení představuje rozměr 50x50x15 mm a je nejčastěji užívaným typem pro chlazení výtisků. Rozměry jsou patrné na následujícím obrázku:

⁷ Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 19.6.2020.



Obrázek 31: větrák 5015

4.2.2 Podávání a vedení materiálu do tiskové hlavy

Jak již bylo zmíněno, pro tiskárnu jsem zvolil podávání filamentu přes bowden pro snížení hmotnosti tiskové hlavy. Výhodou odděleného podavače filamentu do tiskové hlavy je také nižší teplota, při které podavač funguje. Pokud je umístěn přímo u tiskové hlavy, tak může docházet k měknutí filamentu a následnému zasekávání.

Podávání materiálu je realizováno ozubenými koly, které se zakusují do podávaného filamentu. Tato ozubená kola mohou být pouze na jedné straně filamentu, druhá strana je následně realizována volně otočným kolečkem, které určuje přítlak.



Obrázek 32: ozubená kola pro podávání filamentu

V dnešní době jsou dostupné i podavače filamentu s ozubenými koly na obou stranách. Poskytují lepší trakci a jsou tedy méně náchylné na prokluzování materiálu při vyšších rychlostech tisku (a tedy i rychlejším podávání filamentu).

Filament je z podavače veden trubicí z PTFE. Tato trubice musí mít přesný vnitřní průměr, aby nedocházelo ke vzpříčení filamentu uvnitř. Pokud by byl filament v trubici volný, přesnost tisku by byla snížena.

S ohledem na velké rozšíření a dobré uživatelské recenze jsem zvolil podavač materiálu od společnosti Bondtech. Podavač Bondtech BMG nabízí mechanický převod 3:1 pro zvýšení podávací síly, možnost nastavení přtlaku a přímou kompatibilitu s hotendem E3D V6, je tedy možné použít jej i přímo u hotendu. Cena tohoto podavače je 2376,- Kč⁸. [46]



Obrázek 33: podavač Bondtech BMG

4.2.3 Vyhřívání podložka

Na tiskovou plochu je kladeno několik nároků, konkrétně je to:

- Rovinnost
- Vyhřev modelu
- Adheze

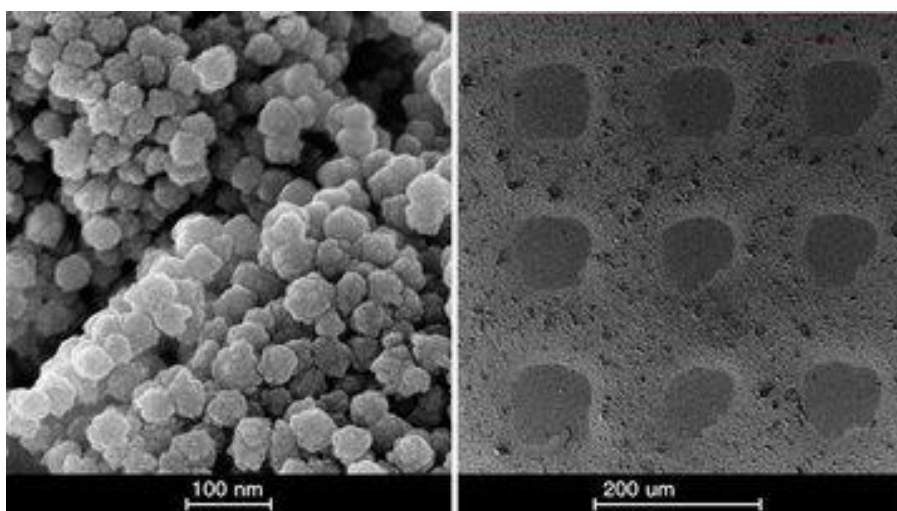
Vyhřívání tisková plocha do jisté míry nahrazuje vyhřev celého tiskového prostoru, v hobby sféře není tisk běžně realizován pro svou náročnost, nemožnost chlazení výtisku během tisku, a tedy i nutnost tisku s podporami. Další nevýhodou je také zahřívání všech

⁸ Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 19.6.2020.

mechanických komponent. V profesionální sféře zabraňoval užití vyhřívané tiskové doby do nedávné doby patent společnosti Stratasys. [17]

Nejběžněji využívané řešení povrchu tiskové plochy v dnešní době jsou například sklo, kovové povrchy a keramické povrchy. Pro zlepšení adheze bývá využito lepidel, laků, papírových pásek, nebo potažení povrchů plastem PEI. Pro výhřev slouží PCB s vodivými cestami tvořícími topné těleso.

Pro můj návrh jsem zvolil použití skleněné vyhřívané tiskové plochy, konkrétně hotové řešení Anycubic Ultrabase. Jedná se o skleněnou tiskovou plochu s povrchovou úpravou pro lepší adhezi. Tato skleněná plocha je určena pro tisk materiálů PLA, TPU, ABS, PC, Nylon, PP a PETG. [47]



Obrázek 34: povrch Anycubic Ultrabase zobrazený elektronovým mikroskopem

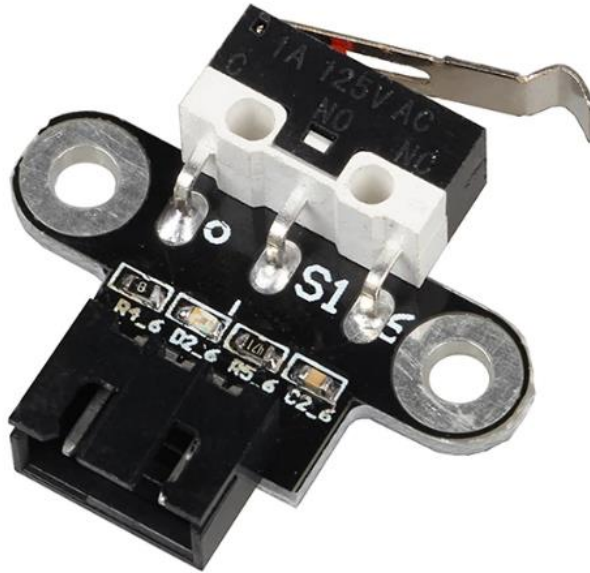
Anycubic Ultrabase je prodávána v různých rozměrech a tvarech, součástí prodeje je i hliníkové PCB schopné vyhřát plochu až na teplotu 120 °C. Cena za tuto komponentu je 665,- Kč⁹ pro rozměr tiskové plochy 220x240 mm.

4.2.4 Koncové spínače

Koncové spínače jsou v tiskárně užity pro počáteční určení souřadnicového systému stroje. Jejich přesnost neovlivňuje kvalitu tisku, pouze umístění na tiskové ploše. Protože se při tisku netiskne až úplně k okrajům tiskové plochy je zde místo pro chybu.

⁹ Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 19.6.2020.

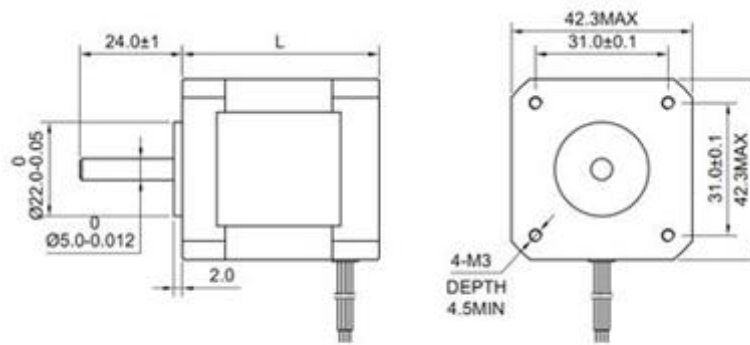
S ohledem na předchozí jsou nejběžněji užívané obyčejné mikrospínače. Pro usnadnění stavby tiskáren jsou dostupné PCB s mikrospínačem, potřebnými rezistory a konektorem. Cena jednoho kusu se pohybuje okolo 10,- Kč.



Obrázek 35: koncové spínače

4.2.5 Krokové motory

Pro 3D FDM tiskárny je standardem užití krokových motorů specifikace NEMA 17. Jedná se o krokové motory s přírubou 1,7x1,7 palce. Pro tyto rozměry jsou navrženy i již zmíněné podavače materiálu, mechanické příslušenství a také ovládací elektronika. [48]



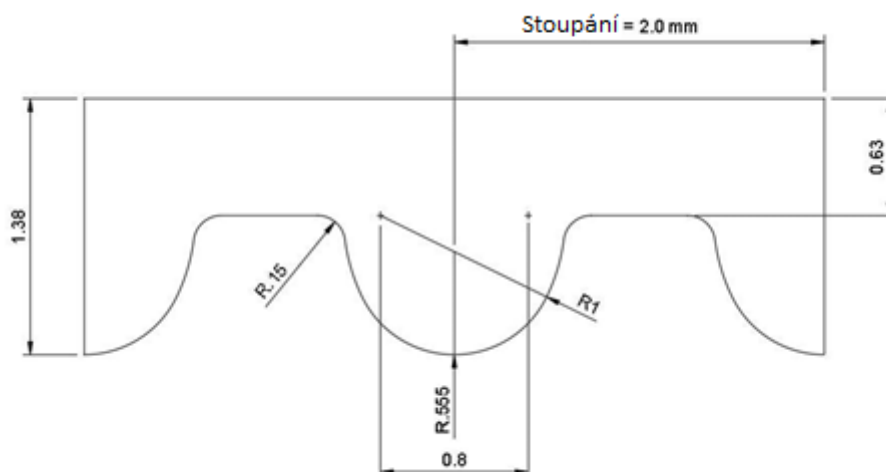
Obrázek 36: krokové motory NEMA 17

Krokové motory jsou užity i pro určení polohy tiskové hlavy v prostoru. Jejich natočení je možno řídit přesně, řídicí elektronika počítá počet otočení motoru a z historie počítá aktuální polohu. Velikost kroku je běžně $1,8^\circ$, k dostání jsou i krokové motory s krokem $0,9^\circ$. Pro zlepšení přesnosti je možno využít i mikrokorkování, pokud jej řídicí elektronika podporuje. [48,49]

Pro tiskárnu tedy budou využity krokové motory s přírubou NEMA17.

4.2.6 Řemeny

Pro translaci rotačního pohybu na lineární jsou v 3D FDM tiskárnách využívány ozubené řemeny v kombinaci s ozubenými řemenicemi pro osy s rychlejším pohybem (X a Y). S ohledem na malé přenášené síly dochází k využití řemenů standardu GT2, T2.5 a dalších řemenů pro aplikace přenosu malých sil. [50]



Obrázek 37: profil řemenu GT2

Řemeny standardu GT2 jsou navrženy přímo pro přenos lineárního pohybu, mají minimální mrtvý chod a nevadí u nich častá reverzace chodu. [50]

Pro využití na tiskárně jsem zvolil řemen GT2 o šířce 10 mm, tyto řemeny jsou dodávány buď jako uzavřená smyčka o určitém počtu zubů, nebo také v metráži. S ohledem na vlastní konstrukci jsem zvolil použití řemenu v metráži a následném spojení. Cena za 1 m řemenu GT2 o šířce 10 mm se pohybuje okolo 29,- Kč¹⁰. Tato cena je závislá na zvoleném materiálu a dodavateli.

4.2.7 Závítové tyče

Pro osu Z je u 3D FDM tiskáren využito závitových tyčí. U levnějších konstrukcí dochází k použití nevhodného metrického závitu, ten má za následek větší vůle a obecně není vhodný pro přenos lineárního pohybu. Běžně se tedy používají trapézové závity. U lepších tiskáren dochází také k použití kuličkových šroubů. Zde je cena ovšem podstatně vyšší. Pro snížení vůle dochází k použití předeprnutých matic nebo matic z materiálu POM s nižší vůlí. [51]

Pro aplikaci v 3D tisku jsou užívány trapézové tyče TR8. Pro mou tiskárnu jsem zvolil konkrétně TR8x8 – tedy čtyřchodý závit. Pro určení potřebné síly je následně možné použít online kalkulačků určených přímo pro tuto aplikaci. [52]

4.2.8 Lineární vedení

Pro vedení jednotlivých os je důležité zvolit lineární vedení. V konstrukci 3D FDM tiskáren je v dnešní době využíváno několik možností:

- Hliníkové profily a pojezdová kola
- Vodící tyče s kuličkovými nebo kluznými ložisky
- Lineární kolejnice s vozíky

Hliníkové profily s pojezdovými koly bývají pro svoji nízkou cenu využívány hlavně u levnějších konstrukcí. Tato varianta má tu výhodu, že profil většinou tvoří i část rámu, má tedy hned dvě využití. Přesnost těchto profilů je však podstatně nižší, než u profesionálních řešení jako jsou například vodící tyče nebo lineární kolejnice. Tuto variantu využívají například tiskárny Ender 3. [53]

¹⁰ Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 19.6.2020.



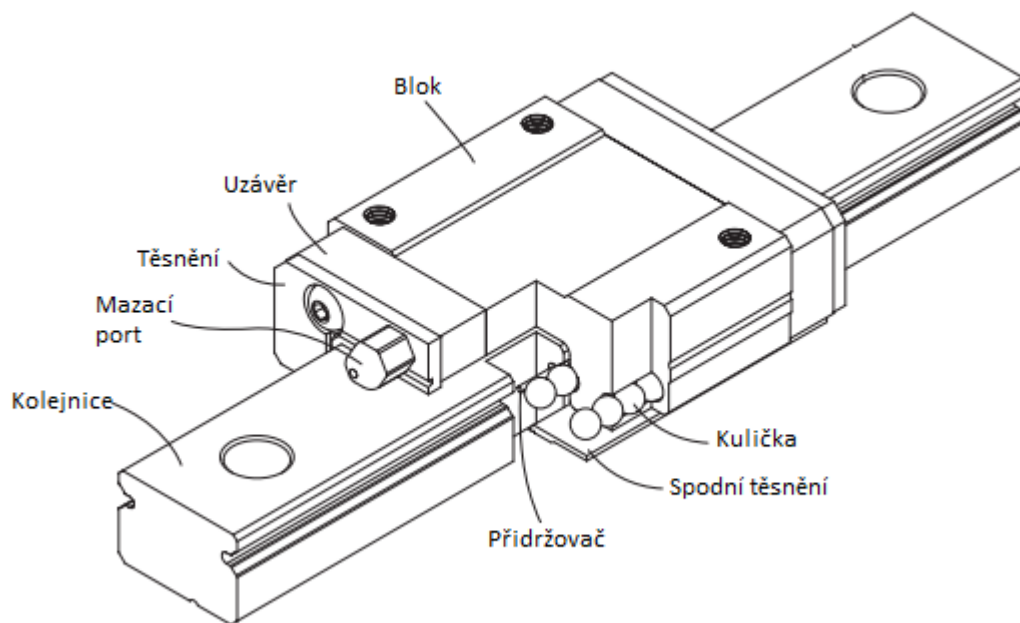
Obrázek 38: hliníkové profily s V sloty pro lineární vedení

Pro mou tiskárnu jsem již v konceptu zvolil pro osu Z využití čtyř kusů vodících tyčí. Pro tyto účely bude využito čtyř kusů odpovídajících lineárních kuličkových ložisek. Kluzná ložiska jsem nezvolil pro jejich relativně vyšší cenu. Vodící tyče s lineárními ložisky jsou standardními komponenty, jsou dodávány v metráži. Cena vodící tyče o průměru 16 mm se pohybuje okolo 470,- Kč za 1000 mm. Odpovídající lineární ložisko pro tento druh vodící tyče je dostupné za 170,- Kč¹¹ kus. [54]

S ohledem na umístění osy Y jsem pro tuto osu zvolil lineární kolejnice, ty je nutné přichytit na podklad a jejich využití pro osu Z by bylo složitější. Tento druh dodává společnost Hiwin, vyznačuje se vysokou tuhostí a únosností. Kolejnice s délkou 500 mm a patřičným vozíkem se cenově pohybuje okolo 1000,- Kč¹². [55]

¹¹ Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 19.6.2020.

¹² Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 19.6.2020.



Obrázek 39: lineární kolejnice Hiwin MG

4.3 Řídící elektronika a ovládací panel

Pro řízení celé elektroniky jsem vybral použití 32bitové řídicí elektroniky s dotykovým panelem. V dnešní době existuje velké množství těchto desek lišících se od sebe výpočetním výkonem, maximálním počtem řízených os (například několikanásobná osa Z) a počtem volných portů pro ovládání dalšího příslušenství.

Pro užití na mé tiskárně jsem zvolil desku SKR Pro V1.2. Tato deska může být osazena až šesti ovladači pro krokové motory. Konkrétně tedy bude využito 6ks ovladačů TMC2209 pro 1x osu X, 1x osu Y, 2x osu Z a 1x pro podavač materiálu. Deska také přímo podporuje již zvolenou dotykovou sondu BLTouch. Tuto desku je možno vybavit externím dotykovým displejem pro řízení chodu stroje. O chod desky se stará 32bitový procesor STM32F407ZGT6 s frekvencí 168 MHz. Tato ovládací elektronika umožňuje využití firmwaru Marlin, který je snadno upravitelný pro potřeby tohoto stroje. Cena této desky s šesti kusy ovladači TMC2209 je 1907,- Kč¹³. [56,57]

¹³ Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 19.6.2020.



Obrázek 40: deska SKR Pro V1.2

4.4 Napájecí zdroj

Pro napájení celé tiskárny jsem se rozhodl použít zdroj 24VDC o výkonu nejméně 300 W, tento výkon je dostatečný pro všechny již zvolené komponenty a zaručí také rychlé nahřívání trysky a vyhřívané tiskové plochy.

Konkrétní volbou pro mou tiskárnu je zdroj HRP-300-24 od společnosti Mean Well. Tento zdroj poskytuje vysokou účinnost až 89 % a ochranu proti zkratu, přetížení, přepětí a přehřátí. Cena tohoto zdroje je 2295,- Kč¹⁴. [58,59]



Obrázek 41: napájecí zdroj HRP-300-24

¹⁴ Přepočítáno dle aktuálních cen a kurzu dne 19.6.2020.

4.5 Návrh rámu a držáků jednotlivých komponent rámu

4.5.1 Hlavní rám

Pro konstrukci rámu jsem zvolil již zmíněného ohýbaného plechu. Velikost vychází z požadavků na tiskový prostor a následné iterace s ohledem na umístění ostatních komponent.

Pro spojení jednotlivých komponent rámu jsem vybral využití metrických šroubů. Při následné sériové výrobě by bylo možné i použití přípravku a bodového svaření jednotlivých dílů. Došlo by tak k ušetření ceny za spojovací materiál.

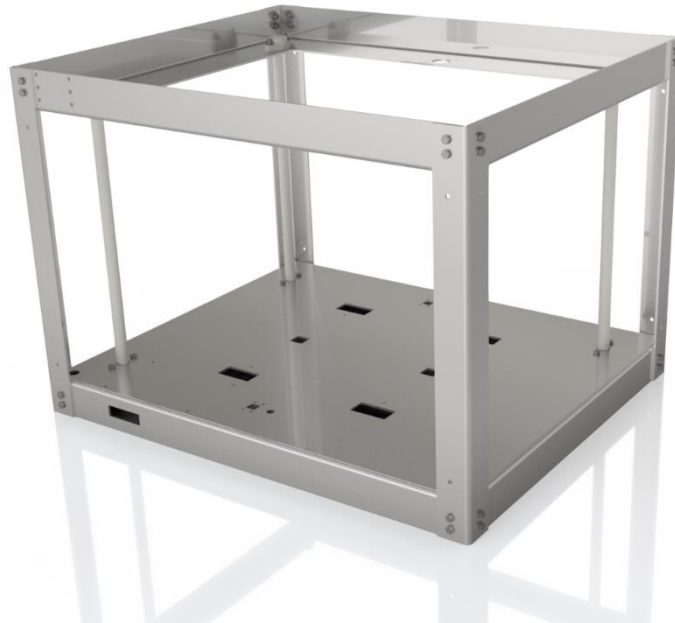


Obrázek 42: rám tiskárny

Při tloušťce plechu 3 mm a použití materiálu S235JR je celková hmotnost rámu 18,9kg. Je tedy nutno počítat s poměrně velkou hmotností celé tiskárny, tiskárna však není určena k mobilnímu provozu, a tak zvýšená hmotnost ničemu nevadí.

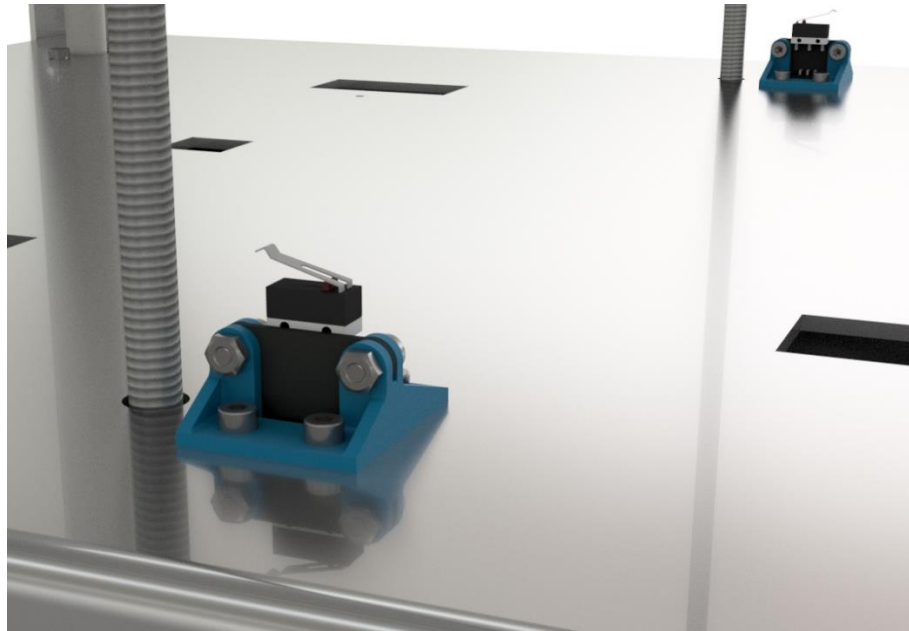
Dalším zpevněním rámu jsou lineární tyče, které jsou vloženy mezi spodní a vrchní plech. Na krajních sloupech jsou připraveny otvory pro zpevnění ocelovými lankami napnutými do kříže. Tyto otvory také bude možné použít při sestavování pro přidržení vrchního a spodního plechu, a to kvůli jejich vyšší hmotnosti.

Lineární tyče o průměru 16 mm pro osu Z jsou na rámu přichyceny pomocí odpovídajícího uchycení. Pro snadnější montáž je vůle u těchto uchycení větší. K jejich usazení dojde až při finální montáži, kdy je bude možné přesně srovnat celou konstrukci Z. Toto řešení má za následek nižší výrobní náklady.



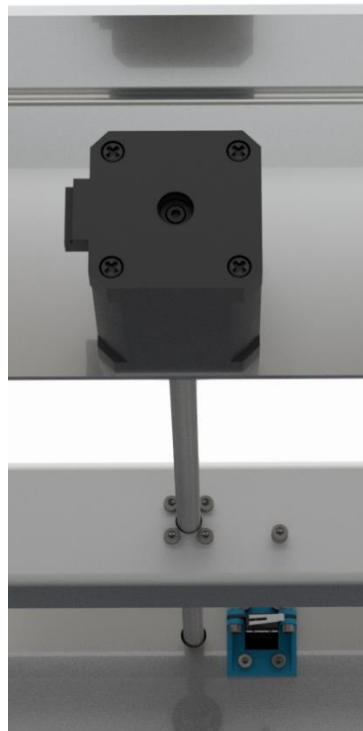
Obrázek 43: uchycení vodících tyčí pro osu Z

Na rámu jsou také umístěny koncové spínače pro osu Z. S ohledem na možnosti ovládací elektroniky je u každé závitové tyče umístěn jeden, firmware Marlin je následně schopný vyrovnat tisk otočením pouze jednoho krokového motoru nezávisle. Tyto koncové spínače jsou umístěny co nejbližší k závitovým tyčím osy Z. Držáky pro tyto koncové spínače jsou navrženy pro SLA tisk z materiálu Tough na 3D tiskárně Formlabs Form 3. Pro nastavení výšky bude na konstrukci Z proti kontaktu umístěn šroub.



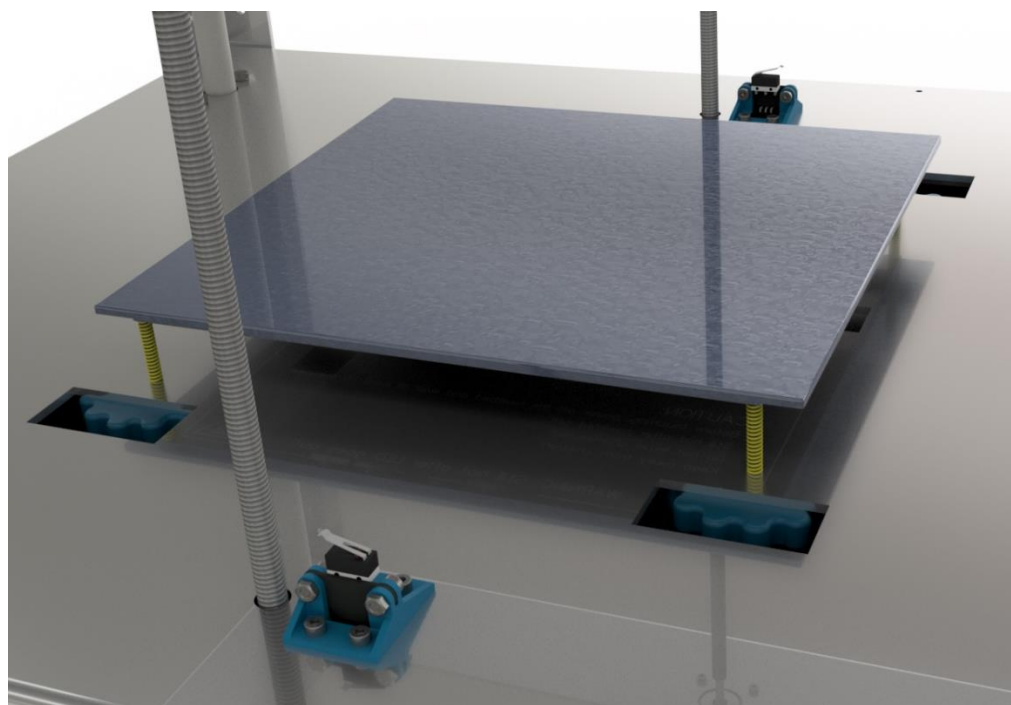
Obrázek 44: koncové spínače pro osu Z

Krokové motory pro osu Z jsou umístěny na vrchní straně rámu, závitové tyče jsou tedy namáhány na tah, ne tlak a nedochází tak ke vzpěru. Umístění motorů na vrchní stranu je umožněno robustním rámem. Závitové tyče v dolní části rámu pouze volně procházejí.



Obrázek 45: umístění motoru pro osu Z

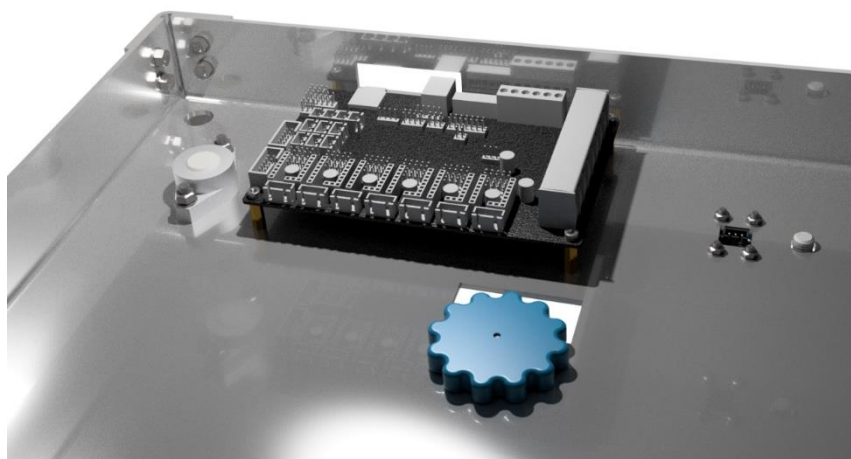
Tisková plocha je, stejně jako u většiny 3D FDM tiskáren, upevněna k rámu za pomoci čtyř šroubů a pružin. Utahováním jednotlivých rohů tiskové plochy je umožněno její ruční vyrovnaní. Pro utahování těchto šroubů je rám opatřen výseky, matice jsou následně umístěny na spodní části rámu. Při případné kolizi tiskové hlavy s tiskovou plochou by také došlo k utlumení části nárazu.



Obrázek 46: uložení tiskové plochy

Ovládací elektronika je umístěna na spodní straně rámu. Je zde mechanicky ochráněna. Toto umístění také umožňuje snadné vedení kabeláže ke všem komponentům tiskárny skrz připravené otvory v rámu. Pro uchycení je použito standardních distančních sloupků M3 a matic na druhé straně plechu. Při sériové výrobě by bylo možné použít navařené trny, pro snížení počtu potřebných technologií jsem je však na tuto verzi tiskárny nepoužil.

Napájecí zdroj a ovládací panel bude umístěn zvlášť, mimo rám tiskárny. Toto řešení jsem zvolil z toho důvodu, aby bylo možno použít libovolný zdroj v případě opětovné výroby tiskárny. Pro sériovou výrobu by bylo vhodnější použití uzavřeného síťového adaptéru s konektorem na výstupu, toto řešení využívají například tiskárny Ultimaker.



Obrázek 47: uchycení ovládací elektroniky

Posledním důležitým komponentem umístěným na rám tiskárny je podavač materiálu. Ten je k rámu, společně s příslušným krokovým motorem, uchycen pomocí dodávané příruby. Jeho umístění, s ohledem na vedení materiálu bowdenem, jsem zvolil na vrchní hraně rámu. Filament na špulce bude umístěn mimo rám tiskárny na samostatném stojanu. Při použití bowdenu i na vstupu do podavače materiálu je také možné propojit jej přímo s uzavřeným boxem s držákem špulek. Toto řešení je vhodné pro zamezení navlhání filamentů během tisku.



Obrázek 48: umístění podavače materiálu

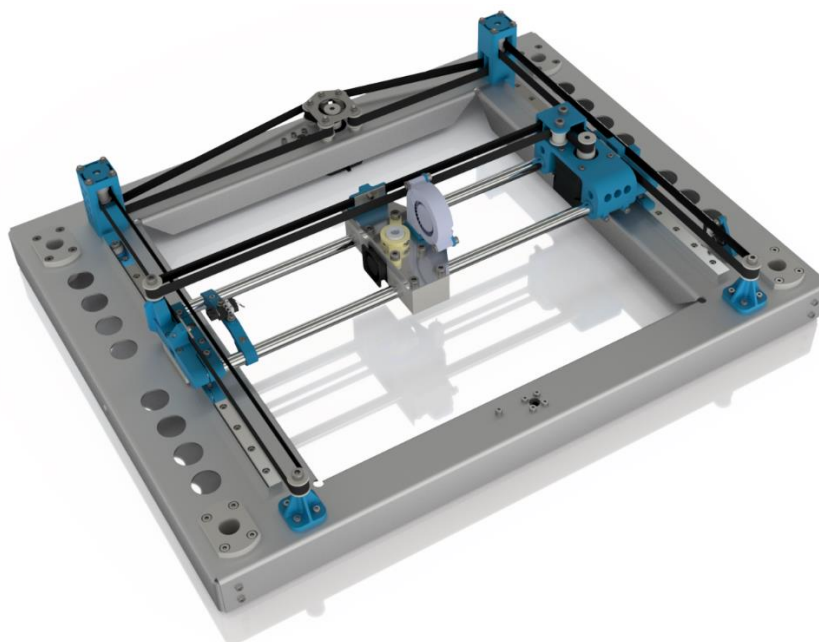
4.5.2 Konstrukce Z

Konstrukce nesoucí osu X a Y v ose Z je navržena opět z ohýbaného, tentokrát hliníkového, plechu. Pro zvýšení tuhosti je plech opatřen ohyby na vnější i vnitřní straně. Na vnější straně jsou ohyby pro dodatečné zvýšení tuhosti spojeny šroubovým spojem, opět by mohlo být použito bodové svařování.



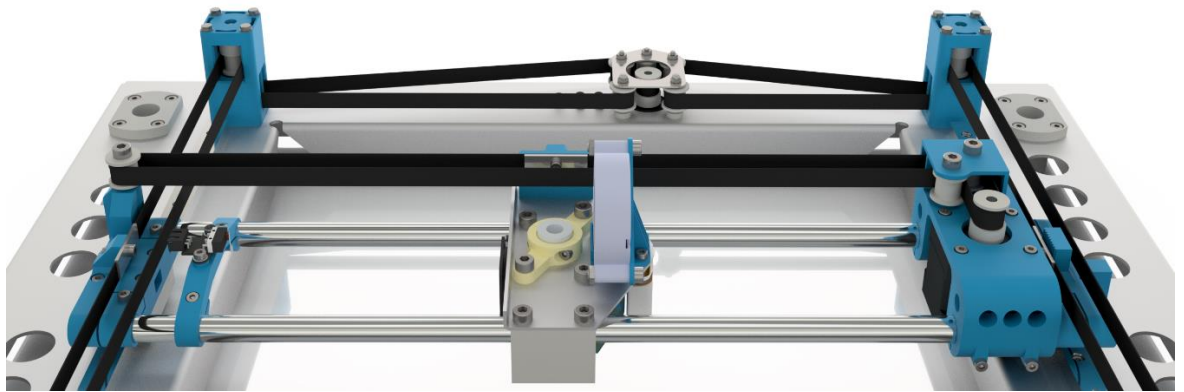
Obrázek 49: plechová konstrukce Z

Na konstrukci jsou přímo umístěny lineární kolejnice osy Y. Osa X je tvořena dvěma plastovými díly a dvojicí vodících tyčí. Na těchto vodících tyčích je následně umístěn jeden koncový spínač a také držák jednoho krokového motoru. Tyto díly jsou na vodících tyčích drženy svěrným spojem. Jejich posunutím je možné korigovat napnutí řemenu a doladit sepnutí koncového spínače. Plastové díly jsou opět navrženy pro SLA tisk na tiskárně Formlabs Form 3 z materiálu Tough.



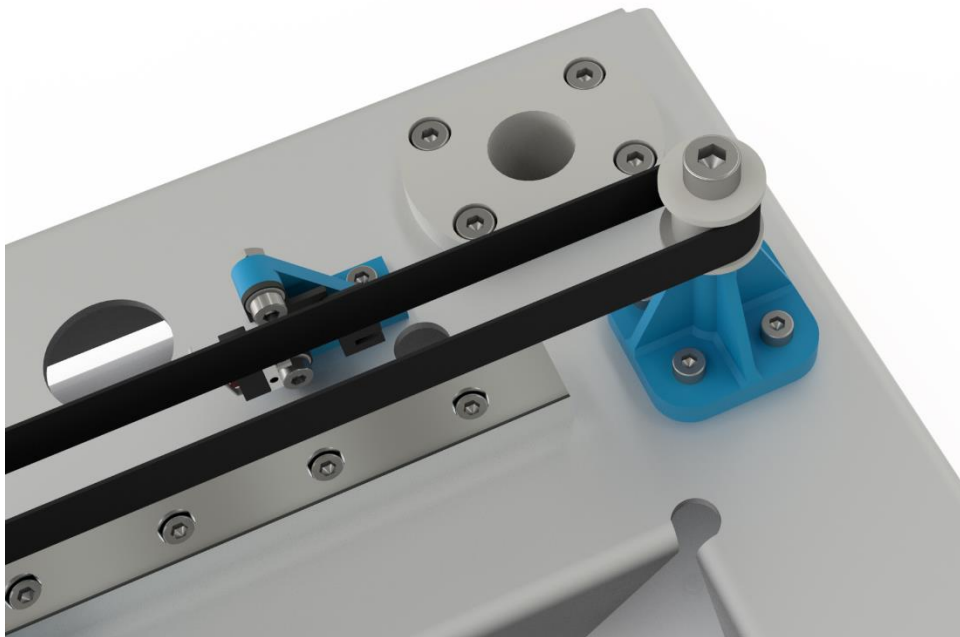
Obrázek 50: konstrukce Z

Na této konstrukci jsou umístěny celkem 4 řemeny. Jeden je použit pro pohyb tiskové hlavy v ose X, ostatní jsou použity pro pohyb osy Y. Využití tří řemenů pro osu Y jsem zvolil s ohledem na to, aby nedocházelo ke křížení konstrukce. Od krokového motoru vede jedna smyčka řemenu, která přes dvě osičky s pevně uchycenými řemenicemi pohybuje postranními řemeny. Pro uchycení těchto osiček jsem navrhl tištěné díly s nalisovanými ložisky 625ZZ. Aby nebyla osička namáhaná a byla co nejkratší je jedno z ložisek umístěno na spodní straně plechového dílu. Poloha postranních řemenů ve směru osy Z je dána výškou lineárních kolejnic společně s vozíky a plastovými díly, kterým je potřebné se vyhnout. S ohledem na to, že pro osy X a Y je vždy zvolen pouze jeden krokový motor, nebylo potřebné použití více koncových spínačů pro jednu osu jako je tomu u osy Z.



Obrázek 51: řemeny pro osu Y

Pro uchycení řemenů na druhém konci jsem zvolil využití plastového tištěného dílu a šroubu M5, na kterém je umístěna řemenice s ložisky. V případě sériové výroby většího počtu tiskáren by bylo vhodné nahradit šrouby vysoustruženými díly tak, aby ložiska nebyla usazena na závitech. S ohledem na malé síly a snahu zachovat nízkou výrobní cenu to však není nutné.

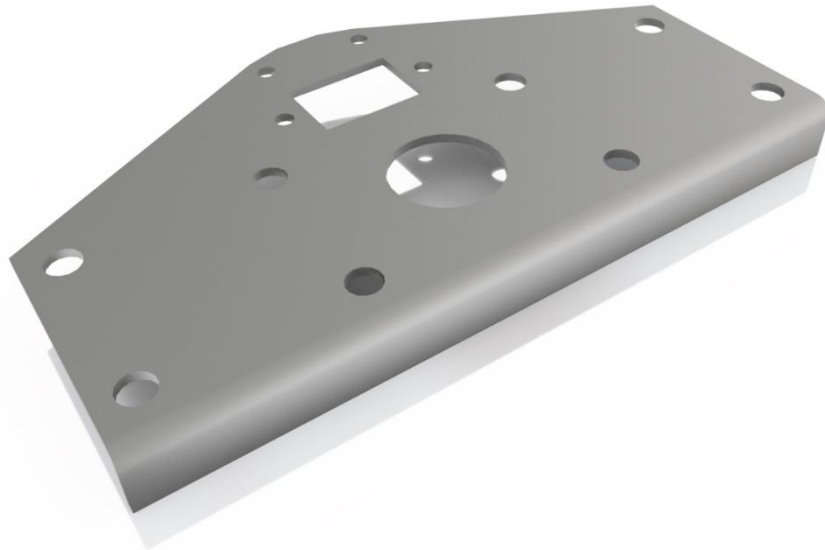


Obrázek 52: uchycení řemenice

Kabely ke koncovému spínači a krokovému motoru budou vedeny skrz plastové díly, které jsou přišroubovány na vozíky lineárních kolejnic. Na příslušných bočních stěnách plechové konstrukce Z jsou umístěny otvory, kterými jsou kabely vedeny zpět do konstrukce. Do základny tiskárny k řídicí elektronice pak povede jeden kabelový svazek se všemi vodiči.

4.5.3 Konstrukce tiskové hlavy

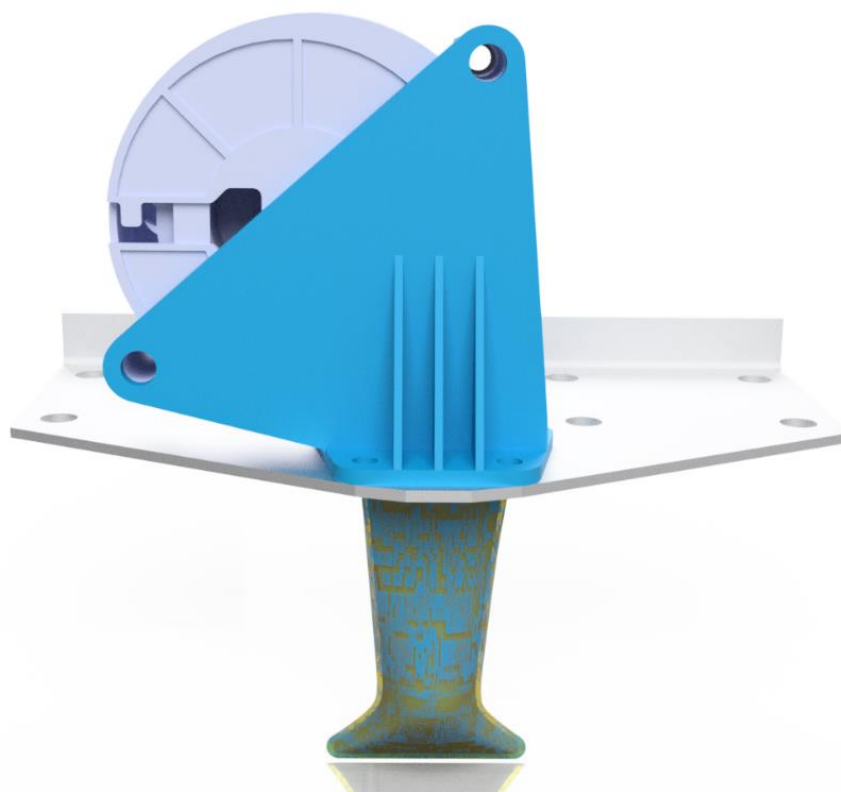
Tisková hlava je vytvořena z hliníkového plechu jednoduchého tvaru, ke kterému jsou přišroubovány čtyři kusy lineárních ložisek v domečkách. Rozteč vodících tyčí pro osu X je dána rozměrem hotendu E3D V6 a domečků SMA12 pro lineární ložiska.



Obrázek 53: plech tiskové hlavy

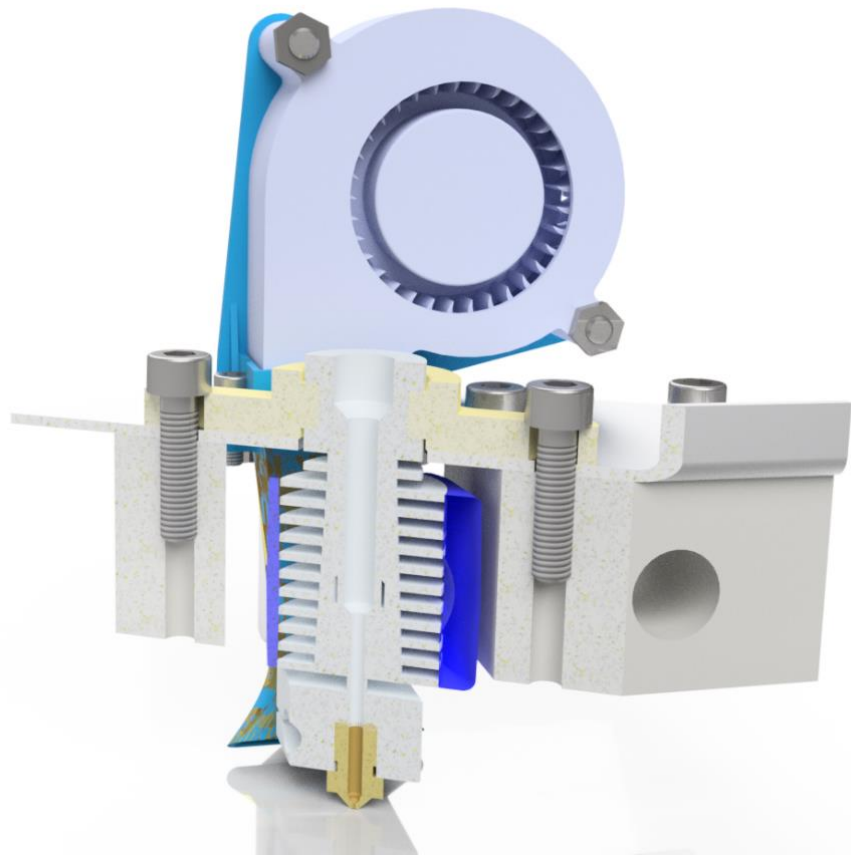
Pro zvýšení tuhosti je plech opatřen ohybem. Tento ohyb také plní funkci dotykové plochy pro koncový spínač.

Ventilátor pro chlazení výtisku, kvůli jeho rozměru, je lepší umístit na vrchní stranu plechu. Výhodou také je, že není v blízkosti hotendu, a nenasává tedy ohřátý vzduch. Pro uchycení ventilátoru a vedení vzduchu jsem navrhl dva díly, které jsou spojeny šroubovým spojem. Každý je umístěn na jedné straně plechu.



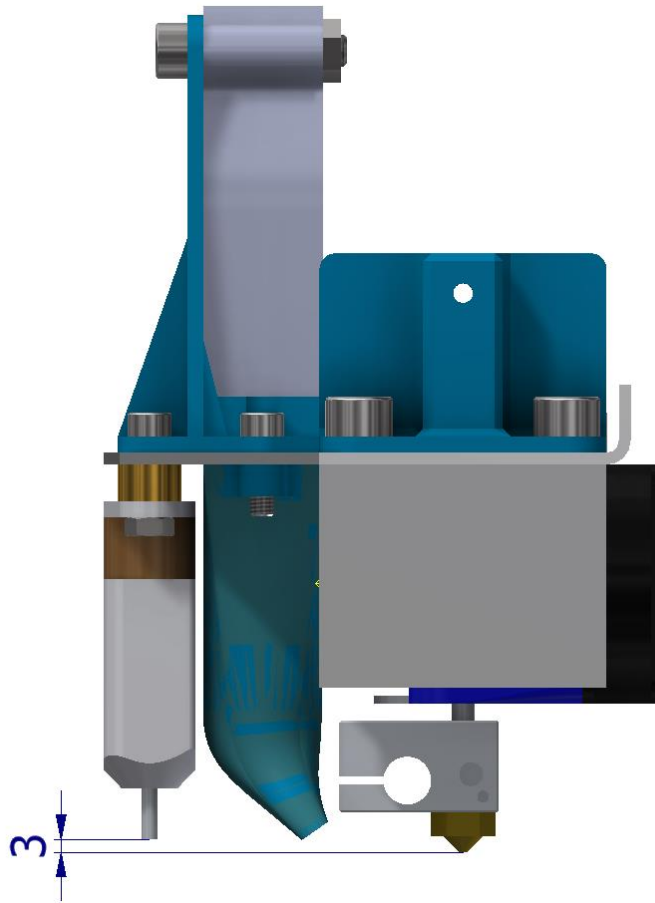
Obrázek 54: chlazení výtisků

Hotend E3D V6 je uchycen za drážku ve vrchní části chladiče. Toto uchycení je realizováno dvěma díly, které chladič objímají. Tyto díly jsou ke konstrukci tiskové hlavy přichyceny dvěma šrouby, které zajišťují domečky lineárních ložisek. Oba díly pro uchycení hotendu jsou stejné.

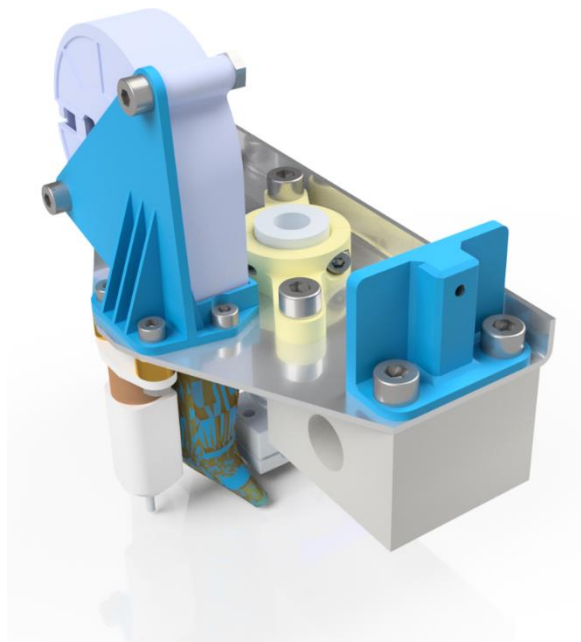


Obrázek 55: řez uchycením hotendu

Pro uchycení dotykové sondy je nutné využít distančních sloupků. Ty zajistí správnou vzdálenost hrotu dotykové sondy a trysky v ose Z. Tyto distanční sloupky mohou být tištěné nebo soustružené.



Obrázek 56: poloha dotykové sondy



Obrázek 57: sestava tiskové hlavy

Kabelové vedení k hotendu, ventilátoru a dotykové sondě bude na rám vedeno společně s bowdenem, který povede filament. Pro přichycení kabeláže k bowdenu je vhodné využít spirálovou plastovou ochranu kabelů.

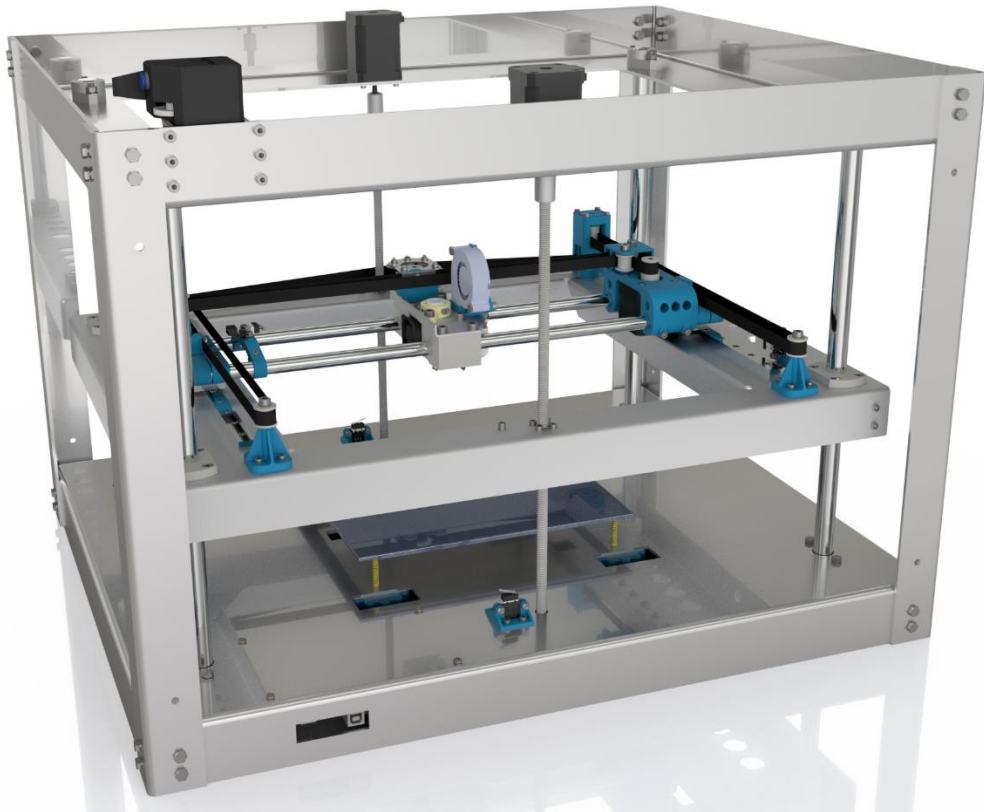


Obrázek 58: spirálová ochrana kabelů

Pro uchycení řemenu jsem zvolil použití plastového dílu, který je přichycen šrouby držícími jedno z lineárních ložisek. Dochází tak k minimalizaci potřebného množství spojovacího materiálu a snížení celkové hmotnosti.

4.5.4 Celková konstrukce

Složením všech již zmíněných dílů vznikne 3D FDM tiskárna o výsledném tiskovém prostoru 220x240x230 mm. Hmotnost této tiskárny je 30 kg. S ohledem na zvolené technické řešení je velmi snadné navrženou tiskárnu modifikovat pro využití jinak veliké tiskové plochy a zvýšit velikost tiskového prostoru.



Obrázek 59: navržená tiskárna

Pro spojení všech částí tiskárny je použito celkem 456 kusů šroubů, podložek a matic. Při skládání je potřeba využít závitové lepidlo, kvůli vibracím, které se mohou při rychlém tisku vyskytnout. Pro tento účel je vhodné použít lepidlo, které je určeno pro rozebíratelné spoje. Konkrétním příkladem tohoto lepidla je například Loctite 243.

Při skládání je potřeba dbát na kolmost a rovnoběžnost lineárních pojezdů, při sériové výrobě by pro zajištění kolmosti bylo vhodné použít montážního přípravku.

4.6 Sestavení prototypu

Z navržených dat jsem sestavil prototyp této tiskárny. Prvním krokem ke složení tiskárny bylo sestavení plechového rámu, nejprve jsem ke spodnímu plechu základny připevnil čtyři postranní plechy. Takto složenou konstrukci jsem položil na bok, abych k ní mohl připevnit vrchní plech.



Obrázek 60: sestavení hlavního rámu

Dalším krokem ke složení tiskárny je upevnění lineárních ložisek na konstrukci plechu Z. Tuto konstrukci jsem vložil do hotového rámu a skrz lineární ložiska jsem do rámu vsunul vodící tyče.



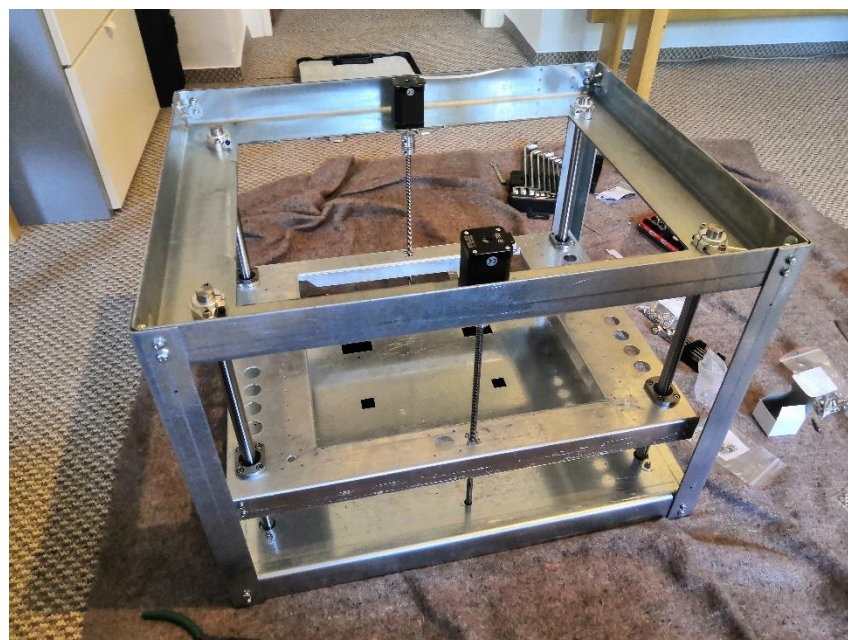
Obrázek 61: konstrukce Z s připevněnými lineárními ložisky

Při utahování držáků vodících tyčí je vždy nutno vyjet konstrukci Z až ke straně, na které jsou držáky do rámu právě utahovány. S ohledem na vůli v uchycení těchto držáků je tedy možné nastavit vodící tyče do správné pozice tak, aby nedocházelo k jejich křížení. K zajištění pohybu jsem použil závitové lepidlo, aby nedocházelo k povolování šroubů u držáků vodících tyčí. Při nastavování této pozice je vhodné provádět tuto operaci ve vzpřímené poloze tiskárny. Při položení na bok by gravitace mohla negativně vychylovat konstrukci do boku.



Obrázek 62: usazení vodících tyčí osy Z

Aby bylo možné si pro instalaci dalších prvků aretovat konstrukci Z v konkrétní poloze, bylo dalším krokem připevnění krokových motorů a závitových tyčí pro osu Z.

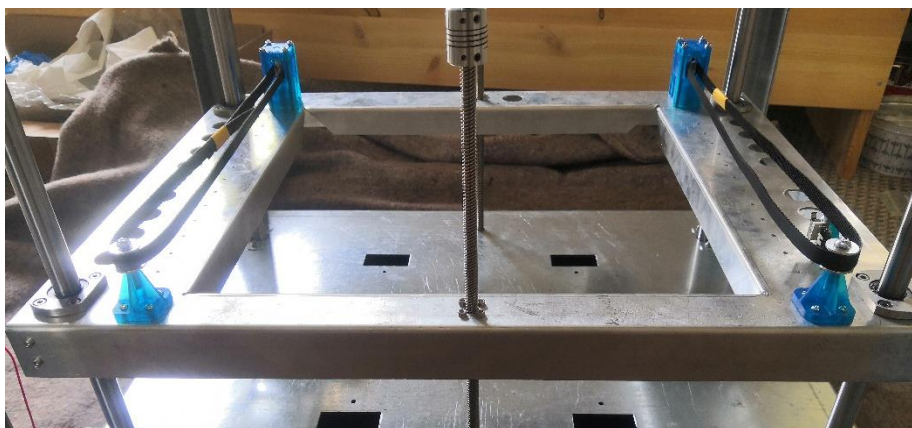


Obrázek 63: připevněné krokové motory a závitové tyče osy Z

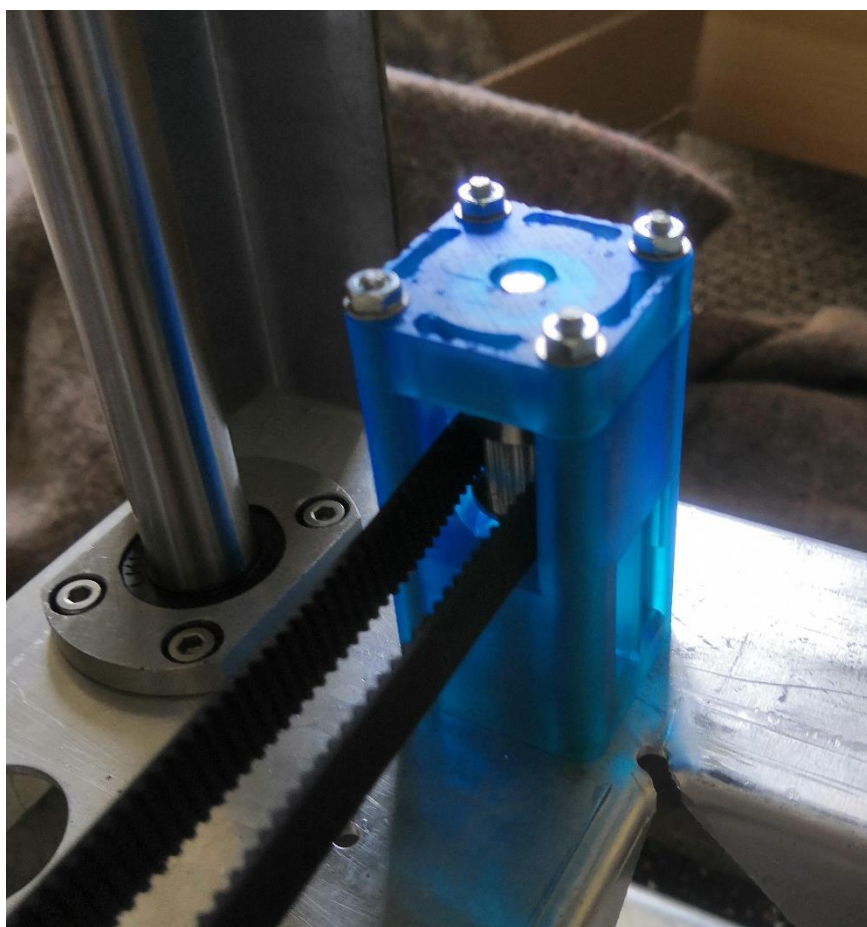
Po osazení krokových motorů pro osu Z jsem si celou konstrukci Z zajistil ve střední poloze a začal jsem s osazováním jednotlivých komponent. Tyto komponenty nebyly

na konstrukci umístěny před vložením do rámu z toho důvodu, aby nedošlo k jejich poškození.

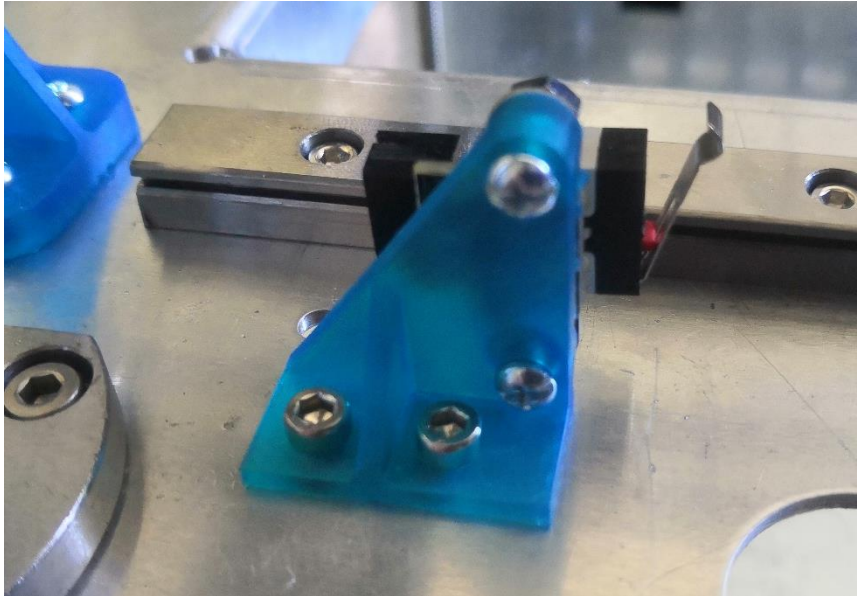
Nejdříve jsem osadil řemenice a postranní řemeny pro osu Y. Aby nedošlo k uvolnění protažených řemenů, provizorně jsem je spojil za pomoci lepicí pásky. Ve stejném kroku došlo také k připevnění koncového spínače pro osu Y.



Obrázek 64: postranní řemeny osy Y

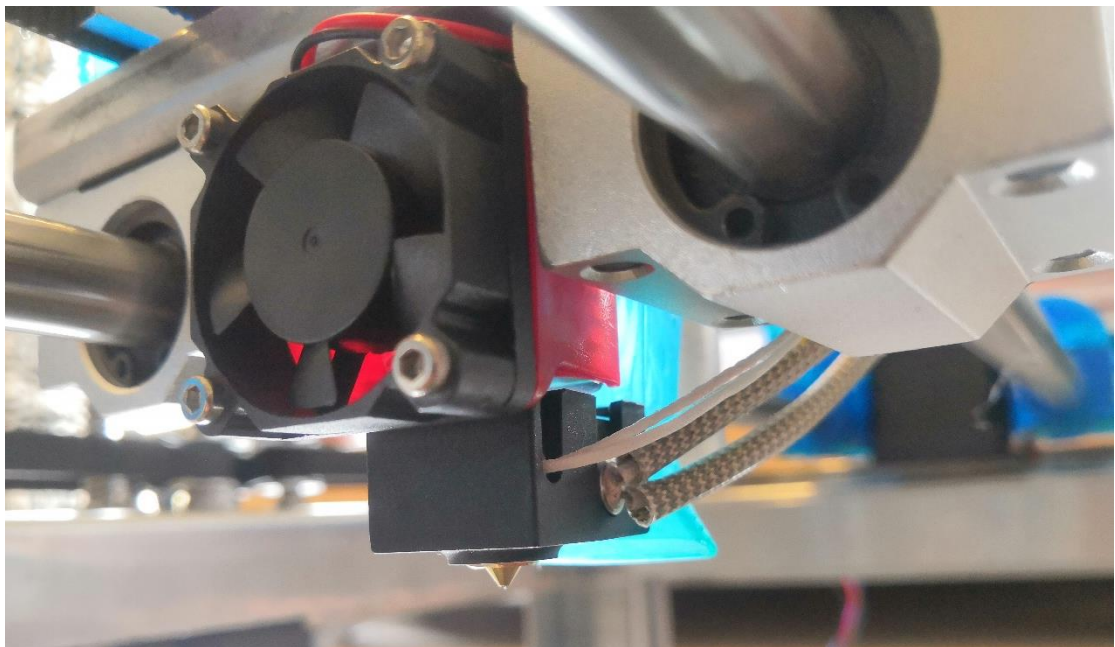


Obrázek 65: držák s ložisky pro uchycení řemenic

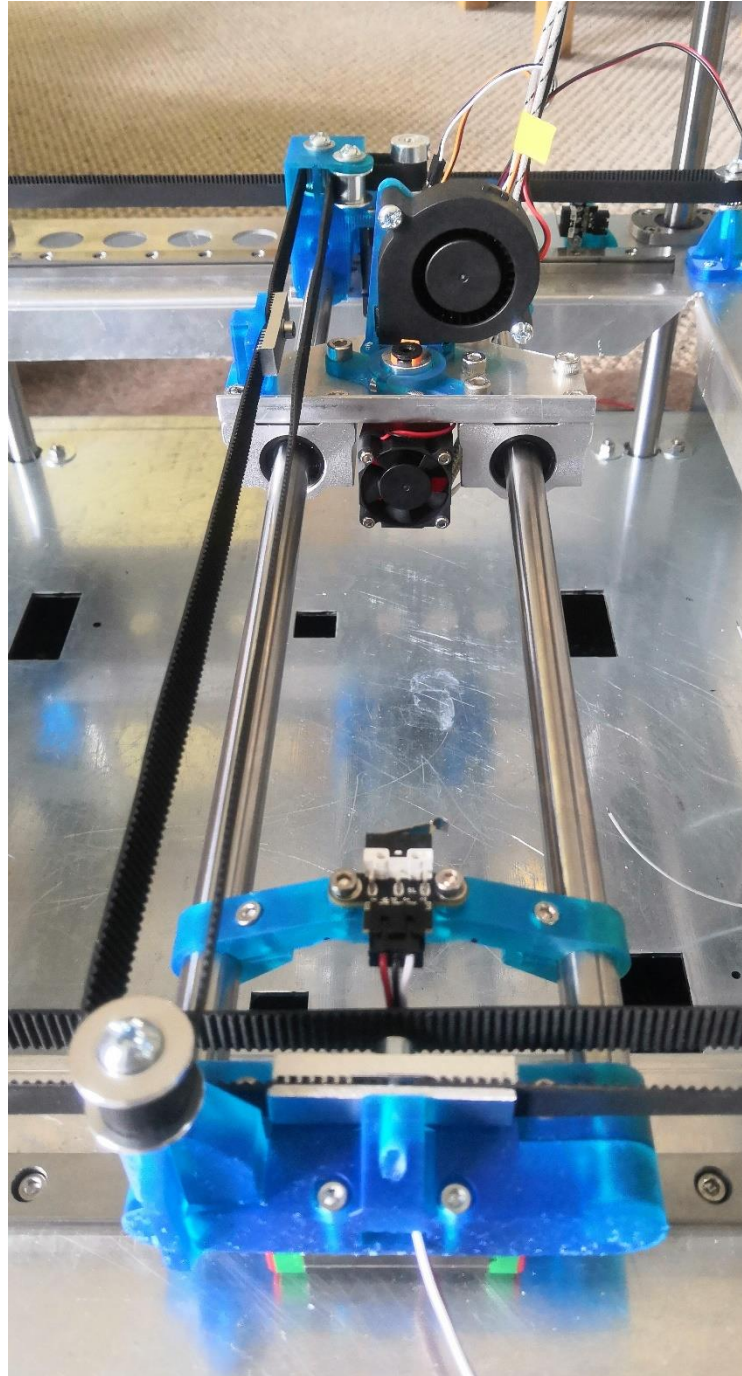


Obrázek 66: koncový spínač

Ke konstrukci jsem následně připevnil lineární kolejnice. Nedošlo k jejich pevnému utažení, byli připevněny pouze volně tak, aby nemohly spadnout. Pro další kroky bylo nutné sestavit konstrukci osy X, její složení je velmi jednoduché a sestává se pouze z nasunutí jednotlivých komponent. K plechu tiskové hlavy jsem sestavil jednotlivé komponenty a křížem jsem utáhl domečky pro lineární ložiska.



Obrázek 67: sestava tiskové hlavy



Obrázek 68: sestavená osa X

Na lineární kolejnice byla posléze umístěna celá osazená osa X. Po připevnění postranních držáků na vozíky kolejnice jsem přistoupil k utažení šroubů a matic, které drží samotné lineární kolejnice. Opět, stejně jako u vodících tyčí pro osu Z, jsem nejdříve utáhl začátek obou kolejnic s tím, že osa X byla co nejbližší. Po utažení začátku obou kolejnic jsem osu X přemístil na konec kolejnic a utáhl jsem příslušné šrouby. Následovalo postupné utažení ostatních šroubů a matic v křížem tak, aby došlo k rovnoměrnému usazení kolejnic.

K osazené ose X byly následně připevněny pomocí příslušných držáků postranní řemeny. Dále byl připevněn krokový motor pro osu Y s řemenicemi a byl natáhnut řemen spojující postranní řemeny osy Y.

Dalším krokem bylo připevnění podavače materiálu a příslušného krokového motoru na rám tiskárny a jeho propojení bowdenem s hotendem. Aby nemohlo docházet k poškození filamentu před vstupem do podavače o hranu rámu byl podavač opatřen krátkým bowdem i na vstupu.

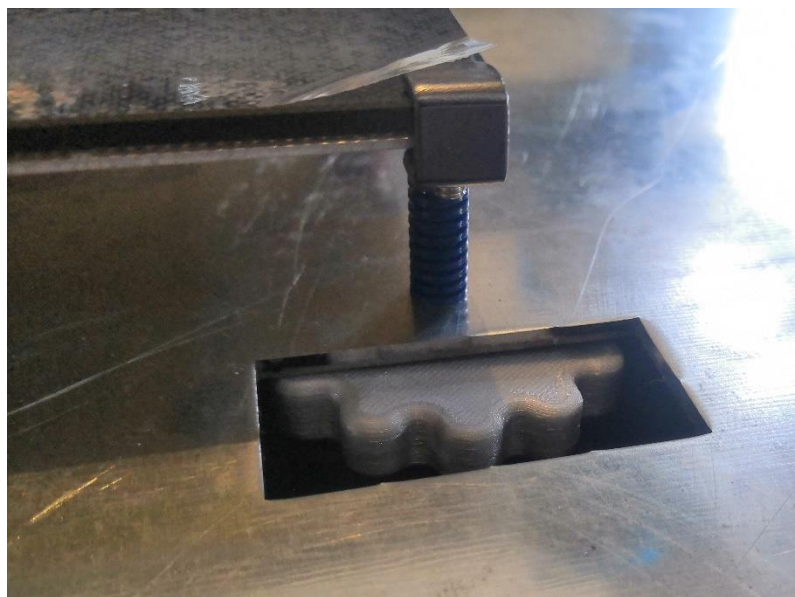


Obrázek 69: podavač materiálu

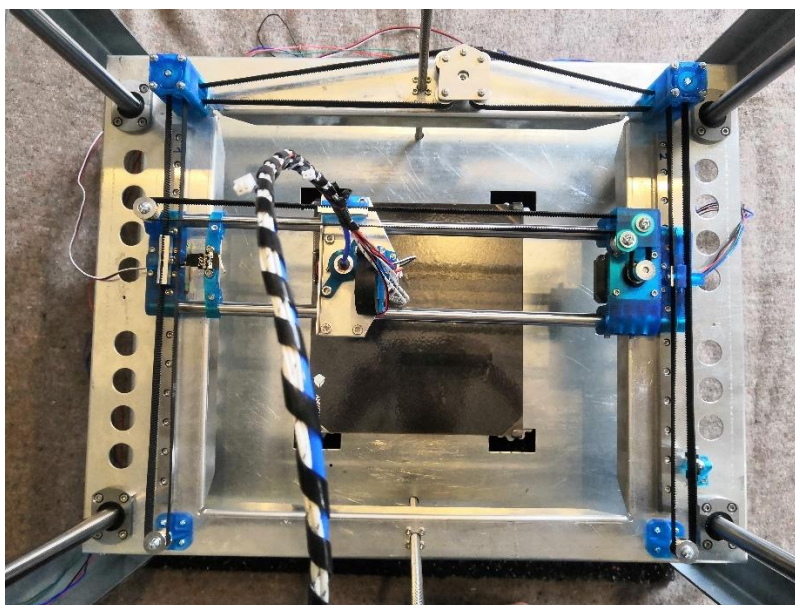
Posledním krokem v sestavení mechanické konstrukce tiskárny bylo připevnění koncových spínačů pro osu Z a vyhřívané tiskové plochy. Ta nebyla připevněna dříve, neboť je vyrobena ze skla a mohla by být velmi snadno poškozena pádem jiného dílu.



Obrázek 70: koncový spínač osy Z

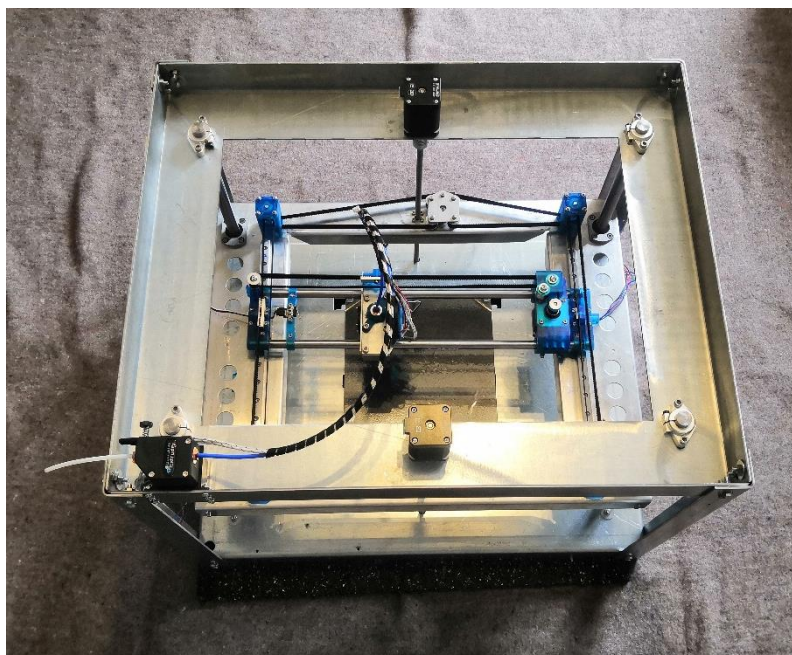


Obrázek 71: uchycení tiskové plochy

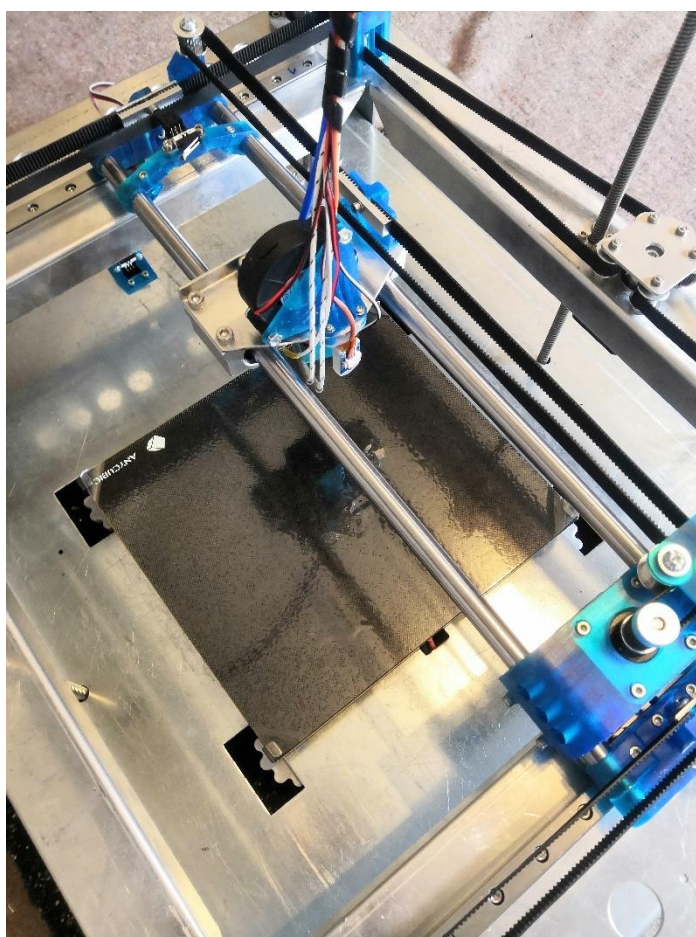


Obrázek 72: osazená tisková plocha

Přípevněním těchto dílů byla mechanická konstrukce plně hotová. Následují obrázky celé sestavené tiskárny.



Obrázek 73: sestavená tiskárna



Obrázek 74: sestavená tiskárna

5 Cenová kalkulace a porovnání

Pro srovnání navržené tiskárny s konkurencí je důležité uvést zde i náklady na její výrobu. Pro přehled jsou umístěny v následující tabulce:

| Název komponenty | Cena [Kč] |
|---|--------------|
| E3D V6 | 1395 |
| BLTouch | 1062 |
| Větrák 5015 | 15 |
| Bondtech BMG | 2376 |
| Bowden | 150 |
| Anycubic Ultrabase | 665 |
| Koncové spínače | 40 |
| Krokové motory | 1754 |
| Lineární vedení HIWIN | 2000 |
| Lineární vodící tyče + příslušenství | 3451 |
| Závitové tyče | 280 |
| SKR Pro V1.2 | 1907 |
| Napájecí zdroj | 2295 |
| Spojovací materiál | 1431 |
| Plechové díly | 950 |
| Tištěné díly | 5000 |
| Soustružené díly | 500 |
| Vodiče | 300 |
| Přibližná celková cena komponent | 25571 |

Tabulka 4: cenová kalkulace¹⁵

Do výsledné prodejní ceny by bylo nutné zahrnout náklady na certifikaci, montáž a marži. Výsledná cena komponent je velmi podobná jako prodejní cena tiskárny Prusa i3 mk3, 19990,- Kč za stavebnici nebo 26990,- Kč za složenou tiskárnu.

Pro posouzení konkurenceschopnosti této tiskárny by bylo potřebné zjistit výrobní ceny pro větší série a zajistit potřebné technické a ekonomické zázemí.

¹⁵ Ceny vyráběných dílů jsou uvedeny na základě poptávek u externích dodavatelů a jsou přibližné.

6 Závěr

V této práci jsem se věnoval 3D FDM tisku, který je stále poměrně novým odvětvím průmyslu, jeho rozvoj je však velmi rychlý a v budoucnu bude 3D tisk pravděpodobně rovnocenným výrobním postupem například k vstřikováním plastů.

Velké množství firem v dnešní době začíná používat 3D tiskárny, nejen na plast, pro tvorbu prototypů pro své produkty. Přejít k prototypování 3D tiskem je ve velké části firem zpomalováno nedůvěrou, a hlavně také představou, že 3D tiskárny jsou složité a drahé stroje. Výhodou dnešního trhu je poměrně velký výběr z širokého cenového spektra nabídek výrobců 3D tiskáren.

Množství zdrojů v knižní podobě, které je na toto téma dostupné je poměrně omezené. Skutečnost, že 3D tisku se věnuje poměrně velké množství nadšenců, kteří svoje poznatky sdílejí na internetu, tento nedostatek vyvažuje. Velkým přínosem pro komunitu 3D FDM tisku je komunita RepRap, která dle mého názoru může za velkou část tak rychlého rozvoje. Pokud by data nebyla volně dostupná veřejnosti, nedošlo by k tak rychlému rozvoji 3D FDM tisku mezi nadšenci z řad veřejnosti.

Knižní zdroje, které jsou dostupné, jsou velmi často zastaralé nebo obsahují pouze velmi malé množství informací. [60]

Při návrhu vlastní konstrukce tiskárny jsem použil převážně znalosti, které jsem získal dlouhodobou obsluhou a servisem těchto strojů. Hlavním důvodem pro použití jiné, velmi málo používané koncepce byla skutečnost, že bych rád posunul hranice 3D FDM tisku a odklonil se od názoru, že pro své velmi malé působení sil na tiskovou hlavu není nutné, aby byl stroj konstruován s co největší tuhostí rámu – viz například používání plastového deskového materiálu pro konstrukci rámu tiskárny.

Sestavení vlastního návrhu považuji za úspěch, z navrženého prototypu jsem vyzkoušel další úpravy, které bych v budoucnu rád udělal na další generaci mého návrhu.

Seznam použité literatury

- [1] CRUMP, Steven Scott. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. U.S.A. US5121329A. Uděleno 1992-06-09.
- [2] Category:32-bit board. RepRap [online]. 2018 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Category:32-bit_board
- [3] CARRIER, Philippe. 3D printing filament size: 1.75mm vs 3.00mm. DYZE DESIGN [online]. 2018 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://dyzedesign.com/2018/02/3d-printing-filament-size-1-75mm-vs-3-00mm/>
- [4] KROGH, Paolo von. Direct pellet extruder developed for LEDC. Lund, 2017. Disertace. Lund University. Vedoucí práce Olaf Diegel.
- [5] RepRap. RepRap [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/RepRap>
- [6] JONES, Michael. 3D Printer Firmware: Which to Choose & How to Change It. All3DP [online]. 2019, Feb 25, 2019 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-firmware-which-to-choose-and-how-to-change-it/>
- [7] LOCKER, Anatol. 2020 Best 3D Printer Slicer Software. All3DP [online]. 2020, Jan 2, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-3d-slicer-software-3d-printer/>
- [8] Professional-level CAD, CAM, and CAE software, free for you.: FUSION 360 FOR PERSONAL USE. Autodesk [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/campaigns/fusion-360-for-hobbyists>
- [9] KS, Ashutosh. 50 Sites to Download Free 3D Models – Best Of. HONGKIAT [online]. 2019, July 9, 2019 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.hongkiat.com/blog/60-excellent-free-3d-model-websites/>
- [10] Fused filament fabrication. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication
- [11] PEELS, Joris. Start Non-Planar 3D Printing Today on your Ender 3 with nonplanar.xyz. 3Dprint.com [online]. 2020, March 27, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://3dprint.com/265174/start-non-planar-3d-printing-today-on-your-ender-3-with-nonplanar-xyz/>

- [12] CHAKRAVORTY, Dibya. 3D Printing Support Structures – The Ultimate Guide: Support Structures Simplified. All3DP [online]. 2020, June 15, 2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>
- [13] Layer thickness in 3D printing: An additive manufacturing basic. Sculpteo [online]. c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/layer-thickness-definition/>
- [14] Finish your print quicker than ever before, the SuperVolcano has erupted... E3D-ONLINE [online]. 2019, MARCH 28, 2019, [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/blogs/news/finish-your-print-quicker-than-ever-before-the-supervolcano-has-erupted>
- [15] SuperVolcano Upgrade Kit. E3D-ONLINE [online]. E3D-Online, c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/products/supervolcano-upgrade-kit>
- [16] V6 Titanium HeatBreak. E3D-ONLINE [online]. E3D-Online, c2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://e3d-online.com/products/v6-titanium-heat-break?_pos=3&_sid=313bbcfea&_ss=r
- [17] SWANSON, William J., Patrick W. TURLEY, Paul J. LEAVITT, Peter J. KARWOSKI, Joseph E. E. LABOSSIÈRE a Robert L. SKUBIC. High temperature modeling apparatus. U.S.A. US6722872B1. Uděleno 2004-04-20.
- [18] Coordinate system. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate_system
- [19] What is a 3D Pen? 3Doodler [online]. WobbleWorks, c2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://learn.the3doodler.com/about/what-is-a-3d-pen/>
- [20] Category:Mechanical arrangement. RepRap [online]. 2014, 28 November 2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Category:Mechanical_arrangement
- [21] , kamuro. Differences between moving build plate vs. extruder. StackExchange [online]. Stack Exchange, 2016, Jun 17 '16 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://3dprinting.stackexchange.com/a/1365>
- [22] Ultimaker S3: Easy-to-use 3D printing starts here. Ultimaker [online]. Ultimaker BV, c2011-2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s3>

- [23] CoreXY. RepRap [online]. 2020, 21 January 2020 [cit. 2020-06-17].
Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/CoreXY>
- [24] MOYER, Ilan E. Core(X,Y): Principle of Operation. Core(X,Y) [online].
c2012 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://corexy.com/theory.html>
- [25] OOI, Tian. What is a Delta 3D Printer? – Simply Explained: Best of Three.
All3DP [online]. 2018, Aug 30, 2018 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z:
<https://all3dp.com/2/what-is-a-delta-3d-printer-simply-explained/>
- [26] JORGENSON, Logan. How to Choose Between Cartesian and Delta 3D
Printers. FARGO 3D PRINTING [online]. Fargo 3D Printing, 2017, November
15, 2017 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z:
<https://www.fargo3dprinting.com/choose-cartesian-delta-3d-printers/>
- [27] FLYNT, Joseph. What is a Delta 3D Printer? Pros, Cons, and Best Brands:
3D Printing. 3DINSIDER [online]. 3DInsider, 2020, February 6, 2020 [cit. 2020-
06-17]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/what-is-a-delta-3d-printer/>
- [28] Z probe. RepRap [online]. 2018, 4 August 2018 [cit. 2020-06-17].
Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Z_probe
- [29] Scary maths or how to convert from x,y,z coordinates to delta robot
position. Tiny gadgets [online]. 2013, February 22, 2013 [cit. 2020-06-17].
Dostupné z: <http://robinsonia.com/?p=161>
- [30] BOWDEN VS DIRECT: QUEST FOR THE BEST 3D PRINTER
EXTRUDER. 3D PRINTER POWER [online]. 2019 [cit. 2020-06-17]. Dostupné
z: <https://3dprinterpower.com/bowden-extruder-vs-direct-extruder-showdown/>
- [31] HAVLÍČEK, Ing. Daniel. Co jsou to SCARA roboty? FACTORY
AUTOMATION [online]. FANUC Czech, 2018, 23. března 2018 [cit. 2020-06-
17]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/co-jsou-to-scara-roboty/>
- [32] COWARD, Cameron. This Interesting Parallel SCARA Robot 3D Prints
Remarkably Fast: Pontus Borg's five bar parallel arm SCARA robot is capable of
printing at incredible speeds. Hackster.io [online]. Hackster.io, an Avnet
Community, 2020, 2020-03 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z:
<https://www.hackster.io/news/this-interesting-parallel-scara-robot-3d-prints-remarkably-fast-7f766a99d645>
- [33] YUSUF, Bulent. 3D Printers Explained: Delta, Cartesian, Polar, Scara:
Mechanical Wonders. All3DP [online]. 2015, Nov 10, 2015 [cit. 2020-06-17].

- Dostupné z: <https://all3dp.com/know-your-fdm-3d-printers-cartesian-delta-polar-and-scara/>
- [34] The R-360 Modular 3D Printer. Allabout3Dprinting.com [online]. All About 3D Printing, 2013, 10 NOV 2013 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://allabout3dprinting.com/r-360-modular-3d-printer/>
- [35] GREGURIĆ, Leo. Concrete 3D Printing: How it Works & Applications: Concrete Evidence. All3DP [online]. 2018, Aug 23, 2018 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/concrete-3d-printing-how-to-do-it-and-application/>
- [36] HEDGES, Dan a Slade GARDNER. Lockheed Martin's Nanotechnology and 3D Printing Robot Arm. Engineering.com [online]. engineering.com, 2014, July 04, 2014 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/Education/EducationArticles/ArticleID/7955/Lockheed-Martins-Nanotechnology-and-3D-Printing-Robot-Arm.aspx>
- [37] PLA - bílá (1,75 mm; 2 kg). FilamentPM [online]. Plasty Mladeč, c2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/pla-bila-1-75-mm-2-kg/p149>
- [38] PETG - bílá (1,75 mm; 2 kg). FilamentPM [online]. Plasty Mladeč, c2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg-bila-1-75-mm-2-kg/p151>
- [39] Top 5 Tips for Best Results with Flexible Filament. Pinshape [online]. pinshape, c2017, 11 23 , 2015 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://pinshape.com/blog/tips-for-best-results-with-flexible-filament/>
- [40] J Head Nozzle. RepRap [online]. 2019, 29 May 2019 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/J_Head_Nozzle#RPW-JH_Nozzle
- [41] Merlin Hotend. RepRap [online]. 2020, 11 March 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Merlin_Hotend
- [42] Hexagon. RepRap [online]. 2016, 7 May 2016 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/Hexagon>
- [43] COMPATIBILITY PRINTERS & HOT ENDS. THE OLSSON RUBY [online]. 3DVerkstan AB, c2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://olssonruby.com/compatibility/>

- [44] CONTRENI, David. Mesh Bed Leveling: A Simple Guide: Better Than a Probe. All3DP [online]. 2019, Sep 5, 2019 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/mesh-bed-leveling-all-you-need-to-know/>
- [45] BLTouch :: Auto Bed Leveling Sensor for 3D Printers. ANTCLABS [online]. ANTCLABS, c2015-2018 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.antclabs.com/bltouch>
- [46] BMG Extruder. BONDTECH [online]. Bondtech AB., c2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.bondtech.se/en/product/bmg-extruder/>
- [47] ÜBEL, Max von. Anycubic Ultrabase Review – Is It Worth It?: Upgrade Your 3D Printer. All3DP [online]. 2019, Feb 15, 2019 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/anycubic-ultrabase-review-glass-plate-print-bed/>
- [48] NEMA 17 Stepper motor. RepRap [online]. 2020, 12 April 2020 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/NEMA_17_Stepper_motor
- [49] KHAN, Zak. FAQ: What is microstepping? MOTIONCONTROLTIPS [online]. WTWH Media, 2016, DECEMBER 30, 2016 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-is-microstepping/>
- [50] Choosing Belts and Pulleys. RepRap [online]. 2018, 28 May 2018 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://reprap.org/wiki/Choosing_Belts_and_Pulleys
- [51] ACCURACY VS PRECISION AND THREADED ROD VS LEADSCREWS IN 3D PRINTERS. SET 3D PRINTING FREE... [online]. 2014, 6/26/2014 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <http://set3dfree.weebly.com/blog/accuracy-vs-precision-and-threaded-rod-vs-leadscrews-in-3d-printers>
- [52] Motor sizing tool. Orientalmotor [online]. ORIENTAL MOTOR USA, c2018 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.orientalmotor.com/motor-sizing/index.html>
- [53] Ender 3 3D Printer. CREALITY [online]. Creality3D Store® Official Store for Creality 3D Printers and Accessories, c2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.creality3dofficial.com/products/official-creality-ender-3-3d-printer>
- [54] Lineární technika. CNCshop.cz: CNC & automatizace [online]. divDesign.cz, c2010 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: http://cncshop.cz/linearni-technika_c

- [55] Linear Guideways: MG series. HIWIN: Motion Control and System Technology [online]. U.S.A.: Hiwin Corporation, c2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://motioncontrolsystems.hiwin.com/Asset/MG-Series-Catalog.pdf>
- [56] BIGTREETECH SKR PRO V1.2 32 Bit Control Board. BIQU BIGTREETECH [online]. Biqu Equipment, c2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.biqu.equipment/products/bigtreetech-skr-pro-v1-1-32-bit-control-board?variant=29207393140834>
- [57] Marlin Firmware: Responsive, Reliable, Accurate. Marlin Firmware [online]. c2020 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://marlinfw.org/>
- [58] HRP-300-24 MEAN WELL: Napájecí zdroj: spínaný; modulový; 336W; 24VDC; 199x105x41mm; 14A. TME: Electronic Components [online]. TME Czech Republic, [2020] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/hrp-300-24/napajeci-zdroje-pro-vestavbu/mean-well/>
- [59] HRP-300 series: 300W Single Output with PFC Function. TME: Electronic Components [online]. 2014, 2014-12-12 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/2e2bb21cbc991f9c3a4b96770f960a92/HRP-300-SPEC.PDF>
- [60] KELLY, James F. a Kah Fai LEONG. 3D printing: build your own 3D printer and print your own 3D objects. 4th edition of Rapid prototyping. Indianapolis: Que, 2013. Make: (Maker Media): (Maker Media). ISBN 978-0-7897-5235-2.

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: patent společnosti Stratasys..... | 8 |
| Obrázek 2: první RepRap 3D FDM tiskárna | 9 |
| Obrázek 3: princip FDM tiskáren | 10 |
| Obrázek 4: tištěné podpory | 11 |
| Obrázek 5: tisková hlava E3D SuperVolcano | 12 |
| Obrázek 6: schéma hotendu E3D V6..... | 13 |
| Obrázek 7: chlazení výtisku..... | 13 |
| Obrázek 8: 3D pero | 14 |
| Obrázek 9: Prusa i3 | 16 |
| Obrázek 10: Ultimaker S3 | 16 |
| Obrázek 11: kartézský souřadnicový systém..... | 17 |
| Obrázek 12: CoreXY, varianty uspořádání řemenů osy X a Y | 17 |
| Obrázek 13: matematický popis souřadnic CoreXY | 18 |
| Obrázek 14: delta tiskárna - Flsun Delta Kossel..... | 19 |
| Obrázek 15: dotyková sonda BLTouch | 19 |
| Obrázek 16: schéma Delta tiskárny, přepočítání souřadnic | 20 |
| Obrázek 17: porovnání pohonu filamentu | 20 |
| Obrázek 18: schématické zobrazení SCARA tiskárny | 21 |
| Obrázek 19: Parallel SCARA | 21 |
| Obrázek 20: tiskárna R-360 | 22 |
| Obrázek 21: velkoformátový FDM tisk..... | 23 |
| Obrázek 22: 3D tisk betonu | 24 |
| Obrázek 23: boční pohled na tiskárnu Prusa i3 | 25 |
| Obrázek 24: Prusa Mini | 26 |
| Obrázek 25: tiskárny M3D | 27 |
| Obrázek 26: schématický náčrt vedení řemenů pro osu X a Y | 28 |
| Obrázek 27: koncepce pro pohon v ose Z..... | 29 |
| Obrázek 28: E3D V6..... | 33 |
| Obrázek 29: mesh auto bed leveling..... | 34 |
| Obrázek 30: specifikace BLTouch | 35 |
| Obrázek 31: větrák 5015 | 36 |
| Obrázek 32: ozubená kola pro podávání filamentu | 36 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 33: podavač Bondtech BMG | 37 |
| Obrázek 34: povrch Anycubic Ultrabase zobrazený elektronovým mikroskopem | 38 |
| Obrázek 35: koncové spínače | 39 |
| Obrázek 36: krokové motory NEMA 17 | 40 |
| Obrázek 37: profil řemenu GT2..... | 40 |
| Obrázek 38: hliníkové profily s V sloty pro lineární vedení | 42 |
| Obrázek 39: lineární kolejnice Hiwin MG | 43 |
| Obrázek 40: deska SKR Pro V1.2 | 44 |
| Obrázek 41: napájecí zdroj HRP-300-24..... | 44 |
| Obrázek 42: rám tiskárny..... | 45 |
| Obrázek 43: uchycení vodících tyčí pro osu Z | 46 |
| Obrázek 44: koncové spínače pro osu Z..... | 47 |
| Obrázek 45: umístění motoru pro osu Z | 47 |
| Obrázek 46: uložení tiskové plochy..... | 48 |
| Obrázek 47: uchycení ovládací elektroniky..... | 49 |
| Obrázek 48: umístění podavače materiálu..... | 49 |
| Obrázek 49: plechová konstrukce Z | 50 |
| Obrázek 50: konstrukce Z..... | 51 |
| Obrázek 51: řemeny pro osu Y | 52 |
| Obrázek 52: uchycení řemenice..... | 52 |
| Obrázek 53: plech tiskové hlavy..... | 53 |
| Obrázek 54: chlazení výtisků..... | 54 |
| Obrázek 55: řez uchycením hotendu | 55 |
| Obrázek 56: poloha dotykové sondy | 56 |
| Obrázek 57: sestava tiskové hlavy..... | 56 |
| Obrázek 58: spirálová ochrana kabelů..... | 57 |
| Obrázek 59: navržená tiskárna..... | 58 |
| Obrázek 60: sestavení hlavního rámu | 59 |
| Obrázek 61: konstrukce Z s připevněnými lineárními ložisky | 60 |
| Obrázek 62: usazení vodících tyčí osy Z | 61 |
| Obrázek 63: připevněné krokové motory a závitové tyče osy Z | 61 |
| Obrázek 64: postranní řemeny osy Y | 62 |
| Obrázek 65: držák s ložisky pro uchycení řemenic | 62 |
| Obrázek 66: koncový spínač..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 67: sestava tiskové hlavy | 63 |
| Obrázek 68: sestavená osa X | 64 |
| Obrázek 69: podavač materiálu | 65 |
| Obrázek 70: koncový spínač osy Z | 65 |
| Obrázek 71: uchycení tiskové plochy | 66 |
| Obrázek 72: osazená tisková plocha | 66 |
| Obrázek 73: sestavená tiskárna | 67 |
| Obrázek 74: sestavená tiskárna | 67 |

Zdroje obrázků

- Obrázek 1: <https://reprage.com/post/44316648000/why-did-reprap-pick-fdm-and-not-another-3d-printing>
- Obrázek 2: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>
- Obrázek 3: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/fdm-fused-deposition-modeling-fff-pjp-lpd/>
- Obrázek 4: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/fdm-fused-deposition-modeling-fff-pjp-lpd/>
- Obrázek 5: <https://e3d-online.com/blog/2019/02/28/supervolcano/>
- Obrázek 6: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/1519/what-are-the-parts-that-make-up-a-hotend-and-what-do-they-do>
- Obrázek 7: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_printing_calibration_part-cooling_fan_airflow.png
- Obrázek 8: <https://www.walmart.ca/en/ip/3D-Printing-Pen-3D-Pen-for-Doodling-Art-Craft-Making-3D-Modeling-and-Education-Comes-with-30-Grams-1-75mm-ABS-Filament-Blue/PRD2YR7EKYI9H5X>
- Obrázek 9: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/2593/how-does-the-home-position-work-on-a-prusa-i3-reprap-printer>
- Obrázek 10: <https://eshop.3dwiser.com/3d-tiskarny/ultimaker-s3/>
- Obrázek 11: <https://socratic.org/questions/what-is-meant-by-the-3-d-cartesian-coordinate-system>
- Obrázek 12: <https://all3dp.com/2/corexy-3d-printer-is-it-worth-buying/>
- Obrázek 13: <https://corexy.com/theory.html>
- Obrázek 14: https://www.banggood.com/cs/FLSUN-Delta-Kossel-3D-Printer-180315mm-Printing-Size-With-Auto-leveling-Dual-Cooling-Fans-p-1227767.html?cur_warehouse=CN
- Obrázek 15: <https://www.thingiverse.com/thing:3977061>
- Obrázek 16: <http://robinsonia.com/?p=161>
- Obrázek 17: <https://3dprinterpower.com/bowden-extruder-vs-direct-extruder-showdown/>
- Obrázek 18: https://www.researchgate.net/profile/Abdullah_Cakan/publication/311953230_Modeling_And_Position_Control_Of_Scara_Type_3D_Printer/links/5864d7f

[d08ae329d62044ee9/Modeling-And-Position-Control-Of-Scara-Type-3D-Printer.pdf](https://www.researchgate.net/publication/320444444/figure/fig1/figure-pdf/d08ae329d62044ee9/Modeling-And-Position-Control-Of-Scara-Type-3D-Printer.pdf)

- Obrázek 19: <https://www.hackster.io/news/this-interesting-parallel-scara-robot-3d-prints-remarkably-fast-7f766a99d645>
- Obrázek 20: https://reprap.org/wiki/R_360
- Obrázek 21: https://file2.engineering.com/july-2014/ls_ep46.jpg
- Obrázek 22: <https://all3dp.com/2/concrete-3d-printing-how-to-do-it-and-application/>
- Obrázek 23: <https://robertjohner.ch/assets/img/printer/1-side.jpg>
- Obrázek 24: https://cdn.shop.prusa3d.com/1557-large_default/original-prusa-mini.jpg
- Obrázek 25: <https://i.all3dp.com/cdn-cgi/image/fit=cover,w=1284,h=722,gravity=0.5x0.5,format=auto/wp-content/uploads/2016/06/27053914/pro.png>
- Obrázek 26: Vlastní obrázek
- Obrázek 27: Vlastní obrázek
- Obrázek 28: <https://e3d-online.com/products/v6-all-metal-hotend>
- Obrázek 29: <https://forum.duet3d.com/topic/9404/mesh-auto-bed-leveling>
- Obrázek 30: <https://www.antclabs.com/bltouch>
- Obrázek 31: <https://grobotronics.com/cooling-blower-fan-5015-12v.html?sl=en>
- Obrázek 32: <https://www.instructables.com/id/Extruder-Drive-Gear-Shootout/>
- Obrázek 33: <https://www.bondtech.se/en/product/bmg-extruder/>
- Obrázek 34: <https://all3dp.com/1/anycubic-ultrabase-review-glass-plate-print-bed/>
- Obrázek 35: <https://www.aliexpress.com/item/32816845922.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.27424c4dllFdC6>
- Obrázek 36: https://reprap.org/wiki/NEMA_17_Stepper_motor
- Obrázek 37: <https://spool3d.ca/gt2-high-temperature-timing-belt/>
- Obrázek 38: <https://forum.duet3d.com/topic/13161/need-your-advice-v-slot-vs-linear-rail>
- Obrázek 39: <https://motioncontrolsystems.hiwin.com/Asset/MG-Series-Catalog.pdf>
- Obrázek 40: <https://www.biqu.equipment/products/bigtreotech-skr-pro-v1-1-32-bit-control-board>
- Obrázek 41: <https://www.tme.eu/cz/details/hrp-300-24/napajeci-zdroje-pro-vestavbu/mean-well/>
- Obrázek 42: Vlastní obrázek
- Obrázek 43: Vlastní obrázek
- Obrázek 44: Vlastní obrázek
- Obrázek 45: Vlastní obrázek
- Obrázek 46: Vlastní obrázek
- Obrázek 47: Vlastní obrázek
- Obrázek 48: https://www.abctech.cz/paska-spiralova-k-organizaci-kabelaze-7-5-60mm-10m-cerna_d20238.html
- Obrázek 49: až Obrázek 74: Vlastní obrázek

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: teplotní vlastnosti materiálů..... | 31 |
| Tabulka 2: porovnání hotendů | 32 |
| Tabulka 3: porovnání sond pro vyrovnání [44] | 34 |
| Tabulka 4: cenová kalkulace..... | 68 |

Seznam příloh

Příloha 1: CAD data návrhu tiskárny

Příloha 2: Výkresová dokumentace