



Diplomová práce

Konstrukce kompaktní 3D tiskárny na čokoládu

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

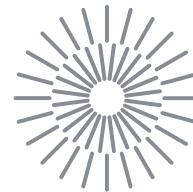
Bc. Daniel Nosek

Vedoucí práce:

Ing. Petr Keller, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Konstrukce kompaktní 3D tiskárny na čokoládu

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Daniel Nosek
<i>Osobní číslo:</i>	S22000240
<i>Studijní program:</i>	N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra výrobních systémů a automatizace
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

Cílem této práce je zkonstruovat kompaktní 3D tiskárnu pro 3D tisk z čokolády (či materiálů na podobné bázi) na základě technologie FFF. Při konstrukci je možné využít předchozích zkušeností na pracovišti, zejména s dříve navrženou tiskovou hlavou na čokoládu. Pracovní prostor tiskárny by měl být cca 150 x 150 x 100 mm, celková koncepce tiskárny by měla umožňovat jednoduché přemísťování.

Doporučené způsoby zpracování:

1. Proveďte rešerši existujících prací zabývajících se 3D tiskem z čokolády nebo podobných materiálů pomocí aditivních technologií vytlačování (FLM, FDM, FFF).
2. Seznamte se s konstrukčním uspořádáním tiskové hlavy na čokoládu a s existujícími konstrukčními řešeními 3D tiskáren založených na technologii vytlačování.
3. Proveďte konstrukční návrh 3D tiskárny s danou velikostí pracovního prostoru, při návrhu zohledněte zejména možnost jejího snadného přemísťování (celková velikost, hmotnost). Dále respektujte snadnou dostupnost nakupovaných dílů a výrobní možnosti na TUL.
4. Připravte podklady k výrobě navržené tiskárny a podílejte se při její výrobě a testování.
5. Zhodnoťte svou práci.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 55 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] RYCHTÁRECH, J. *Návrh vyměnitelné tiskové hlavy pro 3D tisk z čokolády*. Liberec, 2023. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Petr Keller, Ph.D.
- [2] GEBHARDT, A. *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing*. Munich: Hanser, 2011. ISBN 978-3-446-42552-1
- [3] WIMPENNY, D. I., L. J. KUMAR a P. M. PANDEY. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-981-10-0811-5.
- [4] SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: Taylor & Francis, 2016. ISBN 9781498714785.
- [5] REPRAP. *RepRap Forums* [online]. 2016 [cit. 2023-09-15]. Available from: <http://forums.reprap.org/index.php>
- [6] STRATASYS LTD. *Introduction to Fused Deposition Modeling Technology – FDM – Stratasys* [online]. 2023 [cit. 2023-09-12]. Available from: <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/FDM-technology>

Vedoucí práce: Ing. Petr Keller, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání práce: 6. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 6. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 6. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Kellerovi, Ph.D za vedení mé diplomové práce a poskytnutí spoustu užitečných informací. Dále bych chtěl poděkovat celé mé rodině a přátelům za podporu během celého mého studia.

Konstrukce kompaktní 3D tiskárny na čokoládu

Anotace

Tato diplomová práce obsahuje rešerši existujících prací v oblasti 3D tisku z čokolády a podobných materiálů. Hlavním cílem je návrh, konstrukce a optimalizace tiskové hlavy pro 3D tisk využívající technologii vytlačování. Hlava byla navržena s ohledem na minimalizaci rozměrů.

Dalším důležitým aspektem práce je konstrukce samotné 3D tiskárny. Tato konstrukce byla navržena s pracovním prostorem o rozměrech přibližně 150 x 150 x 100 mm, což zajišťuje dostatek místa pro různé tiskové projekty. Při návrhu byl kladen důraz na kompaktnost tiskárny a minimalizaci velikosti a hmotnosti jednotlivých komponent. Práce se dále věnuje výrobě a sestavení 3D tiskárny.

Klíčová slova: 3D tisk, čokoláda, vytlačování, FFF, kompaktní

Design of a compact 3D printer for chocolate

Annotation

This thesis contains a search of existing works in the field of 3D printing from chocolate and similar materials. The main objective is the design, construction and optimization of a print head for 3D printing using extrusion technology. The head was conceived with a view to minimizing the dimensions.

Another important aspect of the work is the design of the 3D printer itself. This structure was designed with a workspace of approximately 150 x 150 x 100 mm, which provides enough space for various printing projects. During the design process, emphasis was placed on the compactness of the printer and minimizing the size and weight of the individual components. The thesis further discusses the fabrication and assembly of the 3D printer.

Keywords: 3D printing, chocolate, extrude, FFF, compact

Obsah

Seznam zkratk	9
1 Úvod, cíl práce a motivace	11
2 Aditivní výroba	12
2.1 Rozdělení aditivních technologií	13
2.2 Metoda FFF	14
2.2.1 Trysky	14
2.2.2 Tisková hlava	15
3 3D tisk čokolády	16
3.1 Čokoláda a její vlastnosti	16
3.2 Tiskárny založené na 3D tisk čokolády	17
3.2.1 FoodBot S2	17
3.2.2 WiiBox Sweetin	18
3.2.3 MyCusiny 2.0	19
3.3 Konstrukční materiály určené pro styk s čokoládou	20
3.3.1 Potravinářská ocel	20
3.3.2 Polyoxymetylen	20
3.3.3 Další materiály	21
4 Konstrukční uspořádání tiskové hlavy pro čokoládu	22
4.1 Injekční stříkačka	22
4.2 Tisková hlava navržená na KSA TUL - DP Ing. Jan Rychtářech	23
4.3 Využití elektrostatického inkoustového tisku	24
5 Analýza aktuální 3D tiskárny v laboratoři KSA	25
5.1 Popis konstrukce	25
5.2 Popis pohonů	26
5.3 Popis elektroniky	27
6 Návrh 3D tiskárny	28
6.1 Rám 3D tiskárny	28
6.1.1 Tvorba skeleton modelu	28
6.1.2 Tvorba rámu	29
6.1.3 Spojení rámu	30
6.1.4 Přidané prvky k rámu	32

6.2	Pohony 3D tiskárny	33
6.2.1	Osa Z	34
6.2.2	Osa X a osa Y	40
6.3	Hlava tiskárny	42
6.3.1	Návrh čerpadla	43
6.3.2	Návrh uchopení zásobníku	44
6.3.3	Chlazení	45
6.3.4	Teplotní analýza	46
6.3.5	Klopný moment	47
6.4	Zakrytování tiskárny	48
6.5	Elektronika	51
6.6	Vedení vodičů	54
7	Výroba a stavba 3D tiskárny	55
7.1	Výroba a stavba rámu	55
7.2	Stavba osy X a Y	57
7.3	Stavba osy Z	59
7.4	Výroba a stavba hlavy tiskárny	60
7.5	Závěrečná montáž	61
8	Závěr	62
	Seznam obrázků	64
	Seznam tabulek	64
	Bibliografie	67
	Přílohy	68

Seznam zkratek

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AC	Alternating Current (Střídavý proud)
Al	Aluminium (Hliník)
APF	ARBURG Plastic Freeforming
CAD	Computer Aided Design (Počítačem podporované projektování)
CNC	Computer Numerical Control
l	Délka závitové tyče [m]
DLP	Digital Light Processing
DC	Direct Current (Stejnoseměrný proud)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DXF	Drawing Exchange Format
DOD	Drop On Demand
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (Elektricky vymazatelná programovatelná paměť)
EBM	Electron Beam Melting
EPDM	Ethylen-propylen-dien-monomer
FPM	Fluoro Rubber (Fluorový kaučuk)
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
FLM	Fused Layer Modelling
g	Gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
F_{kr}	Kritická síla [N]
I_{min}	Kvadratický moment v průřezu [m^4]
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LCD	Liquid Crystal Display (Kapalinový krystalový displej)
Mg	Magnesium (Hořčík)
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MVQ	Methyl Vinyl Silicone Rubber (Silikonový kaučuk s methylvinyl strukturou)
MKP	Metoda Konečných Prvků
E	Modul pružnosti v tahu [Pa]
M	Moment [Nm]
MJF	Multi Jet Fusion
NBR	Nitrile Butadiene Rubber (Nitrilový butadien kaučuk)
PC	Polycarbonate (Polykarbonát)
PTFE	Polytetrafluorethylen
d_3	Průměr jádra závitu [m]
PWM	Pulse Width Modulation (Pulzně šířková modulace)
r	Rameno [m]
RAMPS	Reprap Arduino Mega Polotu Shield
SD	Secure Digital

SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
F	Síla [N]
Si	Silicium (Křemík)
SRAM	Static Random Access Memory (Statická paměť)
SLA	Stereolithography Apparatus
STL	Stereolitografie
TIJ	Thermoplastic Ink Jet
3DP	Three dimensional Printing
Tz	Trapézový závit
3D	Trojdimenzionální
USB	Universal Serial Bus (Univerzální sériová sběrnice)

1 Úvod, cíl práce a motivace

V současné době, kdy technologický pokrok neustále zrychluje a inovace jsou nedílnou součástí každodenního života, není divu, že 3D tisk nabývá stále většího významu a uplatnění v širokém spektru odvětví. Tato technologie přináší zcela nový způsob výroby, umožňující vytváření objektů na zakázku přímo z digitálních modelů. Tyto objekty jsou vyráběny vrstvením do konečného tvaru. Aditivní technologie se uplatňují jak v automobilovém průmyslu, tak v leteckém průmyslu, ve zdravotnictví, architektuře, stavebnictví a v potravinářství.

Hlavním cílem této diplomové práce je zkonstruovat kompaktní 3D tiskárnu, která umožňuje 3D tisk čokoládových objektů, do maximální velikosti 150x150x100 mm. Tato tiskárna by měla být založena na technologii FFF a měla by mít co nejmenší rozměry a nejmenší hmotnost, aby byla možná možnost jejího snadného přemístování. Při návrhu je třeba zohlednit snadnou dostupnost nakupovaných dílů a výrobní možnosti na Technické univerzitě v Liberci.

Diplomová práce je rozdělena na několik částí. První část je teoretická a obsahuje teoretické poznatky o aditivních technologiích a o tisku z čokolády. V této části je také provedena rešerše existujících 3D tiskáren založených na 3D tisku čokolády, které jsou zavedeny na trhu. Další část se zaměřuje na rešerši existujících konstrukčních uspořádání tiskové hlavy pro čokoládu a na analýzu 3D tiskárny, která je umístěna na půdě Katedry výrobních systémů a automatizace. Poznatky z této analýzy byly dále použity při konstrukci.

Hlavní částí diplomové práce je samotný návrh 3D tiskárny, kde je detailně popsán každý krok. Tato část začíná od návrhu rámu, následuje návrh pohonů, návrh hlavy, návrh zakrytování a nakonec popis elektroniky a řízení. Po provedení celého návrhu 3D tiskárny byly vytvořeny podklady pro výrobu ve formě výrobních výkresů, CAD dat, DXF souborů, pro výrobu na laseru a STL souborů pro aditivní výrobu. Následující část diplomové práce je zaměřena na výrobu jednotlivých dílů, montáž a případné oživení 3D tiskárny. Podle časových možností je na závěr proveden zkušební výtisk 3D objektu. Výsledkem této diplomové práce je provedena konstrukce 3D tiskárny na tisk čokolády, vytvoření podkladů pro výrobu a zhotovení reálné 3D tiskárny.

Výběr této diplomové práce byl na základě rozšíření znalostí v aditivních technologiích a seznámení se s konstrukčním uspořádáním a řízením 3D tiskáren.

2 Aditivní výroba

Aditivní technologie je automatizovaný výrobní proces založený na skládání vrstev po vrstvě do finálního trojrozměrného tvaru. Tyto technologie lze charakterizovat dvěma hlavními aplikačními úrovněmi: Rapid Prototyping a Rapid Manufacturing. Pojem Rapid Prototyping popisuje všechny aplikace vedoucí k vytvoření prototypů, modelů a vzorků, zatímco Rapid Manufacturing se používá v případě, že jde o finální díly nebo výrobky.

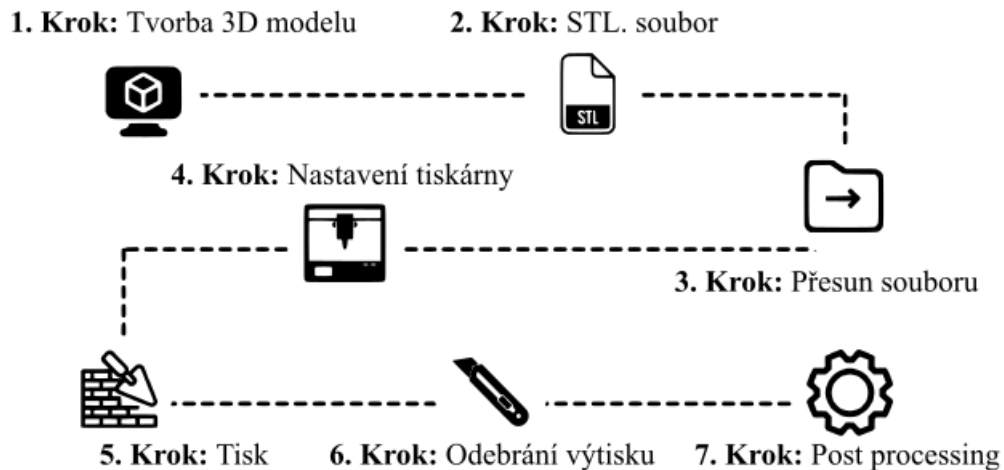
Rapid Prototyping lze dále rozdělit na dvě dílčí úrovně. Na jedné se vyskytuje „Solid Imaging” a „Concept Modeling”, a na druhé „Functional Prototyping”.

První úroveň definuje díly, které slouží k ověření základního konceptu. Používají se pouze k posouzení celkového vzhledu a proporcí. Tyto díly jsou také nazývány jako „předváděcí”. Functional Prototyping se využívá k ověření a kontrole jedné nebo více funkcí.

Rapid Manufacturing shrnuje všechny procesy, které dodávají finální výrobky nebo díly, jež je třeba sestavit, aby se z nich stal výrobek. [8]

Aditivní technologie se v podstatě skládá z několika základních kroků (Obr. 1):

1. Tvorba trojrozměrného (3D) modelu. Pro získání 3D modelu se využívají CAD softwary jako jsou SolidWorks, Inventor, Creo Parametric a mnoho dalších.
2. Poté je 3D model uložen ve formátu STL. Dále se STL načte v softwaru SLICER neboli plátkovač, který 3D model rozřeže na několik vrstev. Dále se v softwaru nastaví ostatní parametry tisku, jako je například teplota tisku, teplota vyhřívané podložky, rychlost tisku atd. Často využívané softwary jsou Prusaslicer nebo Cura.
3. Ve třetím kroku se program přesune do 3D tiskárny prostřednictvím SD karty nebo využitím dnes rozšířenější internetové sítě.
4. Po načtení programu je třeba nastavit samotnou tiskárnu a provést údržbu tiskárny. Jako například dotáhnout řemeny, vyčistit vyhřívanou podložku, provést kalibraci, atd. Poté je tiskárna připravena pro samotný tisk.
5. Po spuštění tisku je proces výroby plně automatizovaný a tiskárna pracuje až do konce programu.
6. Po skončení programu stačí výtisk odebrat z pracovního prostoru.
7. Nakonec je potřeba většinou provést post processing, jako je odebrání podpor nebo úprava povrchu. [8]



Obr. 1 Proces aditivní technologie [3]

2.1 Rozdělení aditivních technologií

Aditivních technologií je celá řada a zpravidla se odlišují podle procesu tisku, které definuje norma ISO/ASTM 52900. Nejrozšířenější je proces vytlačování materiálu, při kterém se materiál selektivně dávákuje tryskou. Tento proces umožňují technologie FLM, FDM, FFF.

Dalším rozšířeným procesem je fotopolymerizace ve vaně, při kterém je kapalný fotopolymer v nádobě selektivně vytvrzován pomocí světla. Používá se technologie SLA, u které je fotopolymer vytvrzován paprskem laseru a technologie DLP, kde je místo laseru použit projektor světla a optické čočky pro soustředění světelných paprsků do jednoho bodu.

Oba tyto procesy jsou používány jak v průmyslovém tisku, tak v hobby tisku. Další procesy se využívají spíše v průmyslu z důvodu vyšších pořizovacích i provozních nákladů. Mezi ně se řadí tryskání materiálu, kdy je materiál ve formě kapiček selektivně nanášen (technologie PolyJet, DOD, TIJ, APF). Dále tryskání pojiva, kdy je kapalné pojivo selektivně nanášen na práškový materiál (technologie 3DP).

Další používaný proces v průmyslu je spojování prášku ve vrstvách teplem, kdy při tisku koncentrované teplo spéká materiál ve formě prášku k sobě. Tento proces umožňuje technologie SLS, SLM, DMLS, EBM a MJF.

Poslední proces, který se poslední dobou z důvodu automatizace rozvíjí je řízení energie natavování, při kterém je tepelná energie soustředěná na spojení materiálů tavením v okamžiku nanášení. Tento proces se často spojuje s CNC obráběním, který jako celek tvoří hybridní stroj. Technologie LENS, Laser cladding a MIG/MAG navařování. [1], [3]

2.2 Metoda FFF

Jelikož je diplomová práce zaměřená na proces vytlačování, je na místě, aby tato technologie byla více přiblížena. Technologie FFF (Fused Filament Fabrication) je často zaměňována zkratkou FDM (Fused Deposition Modeling) nebo FLM (Fused Layer Modeling). Všechny tři technologie jsou založeny na stejném principu, kdy se 3D model staví vrstvu po vrstvě. Rozdílné označení je zde z důvodu, že označení FDM je chráněný obchodní název společností Stratatsys. Označení FDM se tedy nemůže používat u těchto tiskáren. [8]

2.2.1 Trysky

Jak již bylo psáno v předchozí podkapitole (2.1), tak FFF/FDM/FLM využívá proces vytlačování, k čemuž je použita tryska s otvorem o volitelném průměru od 0,1 mm do 2 mm. Standardní tryska má obvykle průměr 0,4 mm, která nabízí dobrou rovnováhu mezi přesností, rychlostí a rozlišení tisku. Menší otvory jsou vhodné pro detailnější a přesnější výrobky. Nevýhodou je vyšší riziko ucpání trysky a pomalejší výroba. [19]

Větší trysky než 0,4 mm umožňují rychlejší tisk a větší stabilitu tisku. Výhoda větších otvorů je, že se neucpávají a lze používat materiál i s různými přísadami (uhlíková vlákna, kovové části apod.). Nevýhodou je menší schopnost tisknout detaily modelu. [19]

Trysky se dále rozdělují podle materiálu. Mezi nejběžnější materiál patří mosaz (Obr. 2 b)), který je určen pro tisk do 300 °C. Mosaz poskytuje vysoký přenos tepla a je dostupný za relativně nízkou cenu. Jako nevýhoda se však pojí její rychlé opotřebení, které lze vyřešit povlakováním niklem nebo chromem, čímž získá tryska vyšší odolnost vůči opotřebení. [19]

Dále se trysky vyrábějí z ocele, která má lepší odolnost proti otěru než mosaz. Nevýhoda ocelových trysek je nízká tepelná vodivost a vyšší cena. Trysky se také vyrábějí z kalené oceli (Obr. 2 a)), které se používají pro tisk abrazivních materiálů. Trysky z kalené oceli jsou až desetkrát odolnější než mosazné. [19]



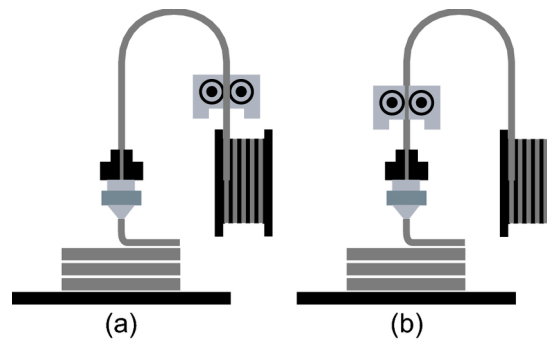
Obr. 2 Trysky: a) kalená ocel b) mosaz [25], [24]

2.2.2 Tisková hlava

Předtím, než samotný materiál projde tryskou, je třeba ho dopravit k topnému bloku, kde dojde k jeho ohřátí na teplotu tisku. Topný blok je složen z topného tělesa a termistoru, kterým lze měřit teplotu. U topného bloku se dále nachází ventilátor, který udržuje požadovanou teplotu.

Součástí tiskové hlavy může být podávací mechanismus, často skládající se z podávacího a přítlačného kola, který přepravuje strunu k topnému tělesu. V případě, že je podávací mechanismus součástí tiskové hlavy, je nezbytné přidat mezi něj a topné těleso chladič, aby se roztavený materiál nedostal k mechanismu, jinak by nemohl proběhnout tisk a mechanismus by se zanesl materiálem.

Občas je použit tzv. bowdenový extruder, kdy je podávací mechanismus umístěný na rámu tiskárny a struna je vedena přes bowdenovou trubičku (z PTFE) k tiskové hlavě. Tato varianta se často využívá u typu tiskárny DELTA, která je více popsána v kapitole 6.2. Toto uspořádání umožňuje zvýšit rychlost tisku a minimalizovat vibrace z důvodu menší pohybuující se hmoty. Nevýhoda bowdenového extruderu je obtížnost tisku elastických materiálů jako je například TPU, z důvodu velké stlačitelnosti struny v bowdenové trubičce a tím pádem se hůře kontroluje vytlačování materiálu. [22], [4]



Obr. 3 Extruder: a) bowden b) přímý [4]

3 3D tisk čokolády

Tisk z čokolády je poměrně složitý a náročný proces, při kterém je potřeba čokoládu dostat do stavu zpracování bez toho, aby se výrazně ovlivnila její struktura a chuť. Schopnost zhotovení tisku závisí na mnoha parametrech, jako je nastavení výšky vrstvy, rychlost tisku, teplota čokolády, teplota prostředí, velikost trysky a aktivní chlazení.

3.1 Čokoláda a její vlastnosti

Proces výroby čokolády má významný vliv na chuť, strukturu a mechanické vlastnosti. Proces výroby začíná od sklizně kakaových bobů, po které následuje jejich fermentace a sušení. Sušením se boby stanou inertní, což umožní jejich přepravu a skladování. Poté se usušené boby přesunou do továrny, kde následuje pražení, mletí a konšování. Z kakaových bobů se mletím extrahuje kakaové máslo (tuk). Proces konšování dokonale rozprostře kakaové máslo v čokoládě a vytvoří jí lesklý povrch. Tímto způsobem se také podporuje prohlubování chuti díky tření, uvolňování aromatických látek, kyselin a oxidace. [10]



Obr. 4 a) před konšováním b) po konšování [9]

Tuk v čokoládě je vysoce polymorfní a může nabývat řady různých forem. Tuky jsou obvykle označovány α , β' . Nicméně tuk β' může v čokoládě existovat v mnoha dalších formách. Tyto formy lze vidět v Tab. 2 společně s jejich body tání.

Obecně platí, že nižší formy jsou méně stabilní a mají tendenci se transformovat do stabilnějších vyšších forem s vyšším bodem tání. Během tohoto přechodu může tuk měnit objem nebo se přemísťovat, což může mít negativní vliv na čokoládu v drsnosti povrchu nebo výkvětu tuku. Pro průmyslové aplikace se využívá forma

β^V , která je stabilní v řádech několika dní. Tato forma je pro průmysl nejžádanější díky lesku, prasknutí a bez výkvětu tuku. Pro dosažení této formy se čokoláda temperuje. [10]

Tab. 2 Formy čokolády a jejich body tání [10]

Forma	Bod tání [°C]
γ	(-5 - 5)
α	5 - 22
β'	15 - 27
β^V	22 - 27
β^{VI}	22 - 27

Temperování se provádí zahřátím čokolády na 50°C, čímž se rozpustí všechny tukové krystaly a vymaže se tepelná paměť. Poté následuje ochlazení na 27°C, kde se vytvoří jak nestabilní krystaly formy β^{IV} , tak stabilní krystaly formy β^V . Aby se odstranily nestabilní krystaly, čokoláda je opět zahřáta na 30-32°C. [10]

3.2 Tiskárny založené na 3D tisk čokolády

Na trhu existuje celá řada tiskáren určených na tisk čokolády. Lze najít tiskárny určené pro tisk malých i velkých čokoládových výtisků. Většina tiskáren umožňuje tisk i jiných materiálů na podobné bázi. V této kapitole jsou přiblíženy 3 používané tiskárny v průmyslu.

3.2.1 FoodBot S2

Jedná se o 3D tiskárnu, která umožňuje tisknout čokoládu, karamel, džemy, bramborovou kaši atd. Pracovní prostor tiskárny je 150x150x100 mm, tedy stejný, jaký má mít navržená tiskárna v této práci.

Tato tiskárna je také k dispozici s dvěma hlavami, které umožňují tisk vícesložkových potravin. Prodává se pod označením Foodbot D2 a je k dispozici za 162 122 Kč. Obě varianty lze vidět na Obr. 5.



Obr. 5 Foodbot S2 a Foodbot D2 [7], [6]

Tiskárna funguje na principu natavení čokolády v injekční stříkačce, přičemž materiál je dodáván do trysky stlačením této stříkačky. Tyto stříkačky výrobce dodává s několika druhy náplní. Nevýhodou této metody je nutnost kupovat spotřební materiál od stejného výrobce, protože stříkačky mají speciální tvar. Pro chod tiskárny je třeba spoléhat se na jednoho výrobce.

Tab. 3 Specifikace tiskárny FoodBot S2 [7]

Výška:	45 cm
Šířka:	42 cm
Hloubka:	38 cm
Váha:	15 kg
Tisková plocha (D x Š x V):	150 x 150 x 100 mm
Přesnost XY:	0,01/100 mm
Rychlost tisku:	15 – 70 mm·s ⁻¹

3.2.2 WiiBoox Sweetin

Tiskárna WiiBoox Sweetin má futuristický vzhled s menšími rozměry (Obr. 6). Jedná se o jednu z nejdostupnějších 3D tiskáren na čokoládu. Pracovní prostor má 100x100x70 mm a cena se pohybuje okolo 2000 \$. Tato tiskárna umožňuje tisknout z materiálu jako je čokoláda, bramborová kaše, mleté maso, krémové bonbóny a ovocný džem. Její hlavní výhodou je automatické vyrovnávání lůžka a 2,8" barevný dotykový displej. Další technické parametry tiskárny lze vidět v Tab. 4.

Tab. 4 Specifikace tiskárny WiiBoox Sweetin

Rozměry tiskárny:	192 x 380 x 420 mm
Přesnost tisku:	0,2 mm
Rychlost tisku:	17 - 70 mm·s ⁻¹
Materiálová kapacita:	60 ml
Průměr trysky:	0,6/0,84 mm
Napájení:	110/220 V, 50 Hz



Obr. 6 Wiiboox [29]

3.2.3 MyCusiny 2.0

Tiskárna od německé firmy Print2Taste umožňuje tisk dílu z čokolády o maximální velikosti 110x80x50 mm (Obr. 7). Tato tiskárna opět pracuje se speciálními náplněmi 3D Choco, kde je dostupných 5 příchutí (tmavá čokoláda, bílá čokoláda, pomeranč, malina, kokos). Tiskárna je aktuálně k dispozici za 17 690 Kč bez náplní. Tyto náplně lze dodatečně dokoupit za 300 Kč za jeden 160g kus.



Obr. 7 Mycusini 2.0 [2]

Nevýhodou této tiskárny je opět využití speciálních náplní, které když se přestanou vyrábět, nelze tiskárnu dále používat.

Tab. 5 Specifikace tiskárny Mycusini 2.0 [2]

Výška:	25 cm
Šířka:	19 cm
Hloubka:	19,5 cm
Váha:	3,5 kg
Tisková plocha (D x Š x V):	110 x 80 x 50 mm
Napájení:	12 V
Rychlost tisku:	9,5 – 25 mm·s ⁻¹

3.3 Konstrukční materiály určené pro styk s čokoládou

Jelikož navržená tiskárna bude pracovat s potravinami, je třeba volit vhodné díly a materiály, které jsou pro tyto potraviny neškodné.

Díly navržené pro kontakt s potravinami musí být konstruovány tak, aby umožňovaly snadné čištění, sterilizaci a dezinfekci před každým použitím s potravinou. [27]

3.3.1 Potravinářská ocel

Nerezová ocel 1.4301/7 (ČSN 17240), známá také jako potravinářská ocel, je často používaným typem korozivzdorné oceli díky své vysoké odolnosti vůči korozi a vhodnosti pro aplikace ve spojení s potravinářskými výrobky. Obsahuje 18 % chromu a 10 % niklu, což vytváří austenitickou strukturu, poskytující vynikající mechanické vlastnosti a odolnost v různých prostředích. Tato ocel je oblíbená v potravinářském průmyslu a farmaceutických aplikacích díky své schopnosti odolávat korozivnímu působení chemických látek.

Nicméně nerezová ocel 1.4301/7 (ČSN 17240) může mít omezení ve svém zpracování a použití. Její vyšší tvrdost a pevnost mohou ztížit některé operace zpracování, což může vést k prodloužení času výroby. [15]

3.3.2 Polyoxymetylén

Polyoxymetylén (POM-C), známý také jako acetal, je plast s vysokou pevností a skvělými mechanickými vlastnostmi, což ho činí ideálním materiálem pro mnoho aplikací včetně potravinářství. Má vysokou pevnost v tahu, odolnost proti opotřebení a minimální schopnost nasáknout vodu, což zajišťuje jeho stabilitu i ve vlhkém prostředí. Díky snadné obrobitelnosti a dostupnosti ve formě desek a tyčí v různých odstínech, jako je přírodní nebo černý, je POM-C preferovanou volbou pro mnoho průmyslových a technických aplikací. [26]

3.3.3 Další materiály

Jelikož čokoláda často prochází soustavou několika dílů, je třeba tyto díly utěsnit, aby čokoláda neunikala do volného prostoru nebo nepřicházela do kontaktu s materiálem, který je pro potraviny závadný. K tomuto účelu slouží těsnění, které se vyrábí v několika variantách. Nejpoužívanějšími těsněními jsou gufera nebo o-kroužky. Gufera slouží pro těsnění rotačních dílů, které se na tiskárnách většinou nevyskytují. Z tohoto důvodu se na tiskárnách využívají o-kroužky, které lze koupit v několika materiálových variantách.

Mezi nejpoužívanější materiály pro o-kroužky se řadí: NBR, EPDM, FPM, PTFE a MVQ.

FPM

Fluorokaučková pryž je vysoce odolný materiál používaný do teplot až 200°C v různých odvětvích. Tyto o-kroužky se používají pro těsnění minerálních olejů, maziv, pohonných hmot a rostlinného a živočišného oleje. [18]

NBR

Nitrilový kaučuk lze použít při provozních teplotách od -40°C do 110°C. O-kroužky z tohoto materiálu lze použít pro těsnění maziv na základě minerálního oleje nebo alifatické uhlovodíky. [18]

MVQ

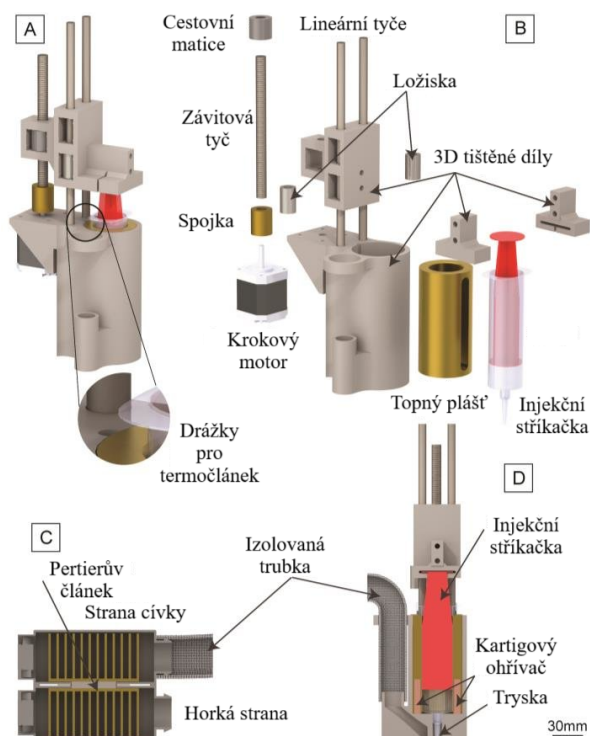
Silikonové o-kroužky se používají od teploty -50°C do 150°C. Oproti ostatním materiálům o-kroužků je odolný proti chladu. Používá se pro těsnění potravin a velmi dobře odolává alkoholům. [18] V konstrukci byly použity právě o-kroužky z MVQ.

4 Konstrukční uspořádání tiskové hlavy pro čokoládu

V této kapitole se nachází popis několika uspořádání tiskové hlavy určené pro tisk čokolády. U každého uspořádání jsou uvedeny výhody a nevýhody.

4.1 Injekční stříkačka

Tato metoda byla využita u všech zmíněných tiskáren v předchozí kapitole. Konstrukce tiskové hlavy spočívá v tom, že se materiál vloží do válce pístu, kde se rozežřeje a následně je pomocí pístu vytlačován. Před samotným tiskem je třeba počkat, aby byl materiál ohřátý v celém svém objemu. Tato metoda je velmi jednoduchá a využívá se ve většině tiskáren, zaměřené na tisk čokolády a podobných materiálů. Nevýhoda této metody je taková, že při ohřátí dochází k oddělení jednotlivých složek vlivem různých hustot a výtisk není homogenní napříč vrstev. [11]



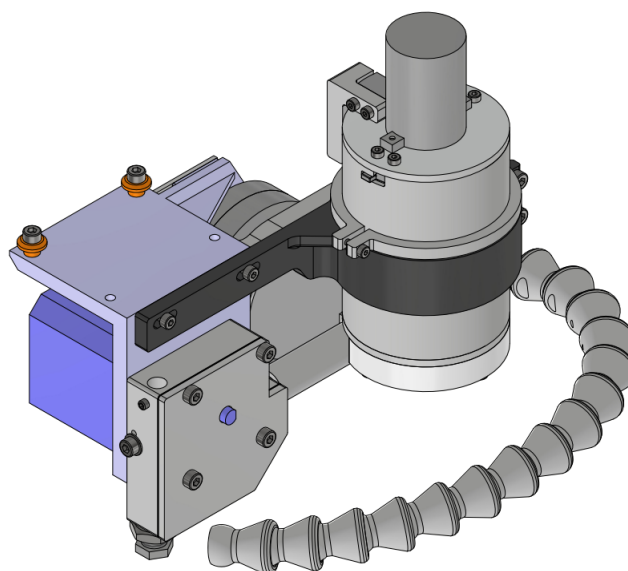
Obr. 8 Hlava založená na vytlačování pomocí pístu [11]

4.2 Tisková hlava navržená na KSA TUL - DP Ing. Jan Rychtářech

V rámci diplomové práce pana Ing. Jana Rychtárka vznikla na katedře KSA tisková hlava, která umožňuje tisk čokolády. Pan Rychtárek měl za úkol navrhnout hlavu pro tiskárnu, která byla původně určena pro tisk polymerů.

V této diplomové práci bylo vytvořeno několik možných variant, které se od sebe lišily způsobem dopravy materiálu k trysce. Finální návrh je zobrazen na Obr. 9. Tato hlava funguje na principu natavení jakékoliv čokolády v zásobníku. K tomuto zásobníku je připevněn motor s převodovkou a míchadlem, které během tisku míchá roztavenou čokoládu, čímž se zabrání separaci jejích složek.

Roztavená čokoláda je dopravována k trysce pomocí ozubeného čerpadla. Chlazení tisknuté čokolády je zajištěno pomocí Peltierova článku a radiálního ventilátoru 5012, který dodává ochlazený vzduch přes segmentovou hadici. [21]

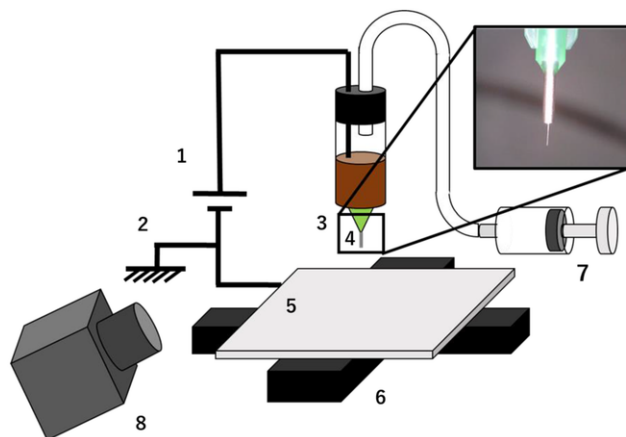


Obr. 9 Model hlavy [21]

Výhodou tohoto uspořádání je, že nedochází k separaci složek čokolády a umožňuje tisk z jakékoliv čokolády, která neobsahuje pevné částice, jako jsou například ořechy. Nevýhodou však je, že zásobník je umístěn daleko od trysky, což způsobuje obtížnější kontrolu teploty čokolády vycházející z trysky. Hlava je také složena z několika dílů, kterými protéká čokoláda. Tyto díly je třeba před každým spuštěním tisku rozmontovat a vyčistit, proto je velké množství dílů značnou nevýhodou. Další nevýhodou tohoto uspořádání je použití principu chlazení hlavy s využitím segmentové hadice, která má tendenci způsobovat relativně velké ztráty proudění.

4.3 Využití elektrostatického inkoustového tisku

Tato technologie, na rozdíl od klasické technologie FFF, umožňuje tisk dílů s mnohem vyšším stupněm detailů. Schéma uspořádání hlavy je znázorněno na Obr. 10, kde jsou: 1) zdroj napětí, 2) zem, 3) tryska, 4) ABS vlákno, 5) kovová deska, 6) osa X,Y, 7) tlakové zařízení, 8) vysoko-rychlostní kamera. Na rozdíl od technologie FFF, kde je stupeň detailů omezen průměrem otvoru trysky, tato technologie umožňuje tisk detailů až do velikosti 70 mikrometrů, což je úroveň, kterou lidské oko už nedokáže rozeznat. [28]



Obr. 10 Hlava založená na elektrostatického inkoustového tisku [28]

Technologie elektrostatického inkoustového tisku využívá elektrostatickou sílu, která je generována zavedením napětí na tiskový materiál a jeho natažením na tiskový povrch. Tato metoda vytváří kapičky tiskového materiálu menší než průměr trysky. Tento efekt je dosažen pouze tehdy, pokud je aplikováno dostatečně vysoké napětí. [28]

Tryska je zde vyrobena pomocí mikrovlákn z ABS. Tento materiál byl vybrán, protože neovlivňuje elektrické pole, lze ho snadno zpracovávat a v pevném stavu není toxický. Tato tryska využívá povrchového napětí k vytvoření Taylorova kužele. Tento kužel vzniká tak, že kapka tisknutého materiálu mění svůj tvar se zvyšujícím se napětím, až dosáhne tvaru kužele. V okamžiku, kdy napětí dosáhne kritické hranice, se z vrcholu tohoto kužele vytvoří vlákno. [17], [28]

Tato hlava byla vyvinuta na základě studie, kde bylo cílem vytvořit potravinářskou tiskárnu s dostatečnou přesností. Nejedná se o komerčně dostupný produkt a není běžně vyráběna pro komerční účely.

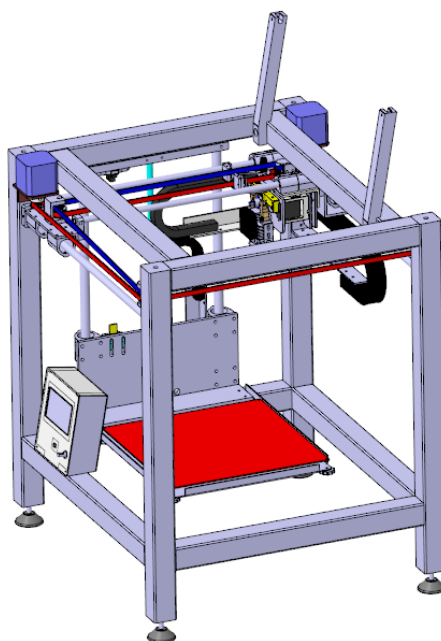
5 Analýza aktuální 3D tiskárny v laboratoři KSA

Jak již bylo dříve uvedeno, tato diplomová práce je inspirována 3D tiskárnou, která byla navržena a vyrobena na katedře výrobních systémů a automatizace.

Tiskárna je založena na technologii FFF. Byla navržena a vyrobena mým vedoucím, Ing. Petrem Kellerem, Ph.D. V rámci diplomové práce Ing. Jana Rychtárka byla navržena tisková hlava, která umožňuje tisk čokolády. Tato hlava byla navržena tak, aby mohla být snadno vyměněna za hlavu určenou pro tisk z polymeru.

5.1 Popis konstrukce

Pro konstrukci tiskárny byl použit tažený hliníkový profil o průřezu 30x30 mm. Celkové rozměry rámu jsou 470x440x395 mm. Na Obr. 11 je zobrazen 3D model tiskárny s přidělanou hlavou pro tisk polymeru. Tato hlava umožňuje tisk ze dvou polymerů o maximální velikosti 200x200x200 mm.

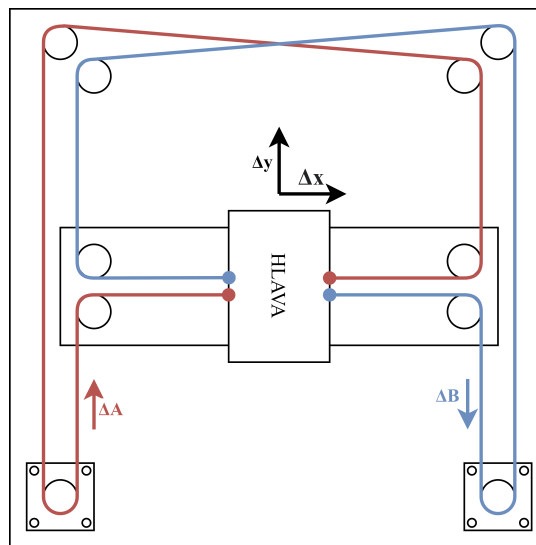


Obr. 11 3D model tiskárny s hlavou pro polymer

5.2 Popis pohonů

Tiskárna je v konfiguraci CoreXY (Obr. 12), která umožňuje pohyb tiskové hlavy v ose X a Y pomocí ozubených řemenů a krokových motorů. Osa Z je realizována pomocí krokového motoru a trapézového závitu, který umožňuje transformaci rotačního pohybu na přímočarý.

Pohyb v ose X a Y je zajišťován krokovými motory NEMA 17 Microcon s označením SX17005, které jsou umístěny k rámu tiskárny. Na hřídele těchto motorů jsou přidělaný pomocí stavěcích šroubů řemenice s 20 zuby s označením GT2, které přenáší výkon do řemenů s označením GT2. Tento řemen je veden přes soustavu kladek až k hlavě tiskárny. Tato hlava byla popsána v kapitole č. 4.2



Pohybové rovnice:

$$\begin{aligned}\Delta x &= 1/2(\Delta A + \Delta B), & \Delta y &= 1/2(\Delta A - \Delta B) \\ \Delta A &= \Delta x + \Delta y, & \Delta B &= \Delta x - \Delta y\end{aligned}$$

Obr. 12 Konfigurace CoreXY [5]

Konfigurace CoreXY umožňuje pohyb hlavy tak, že polovina součtu posunutí řemene A a řemene B ve směru znázorněném na Obr. 12 se rovná posunutí hlavy v ose X. Posunutí hlavy v ose Y se rovná polovině rozdílu posuvu řemene A a řemene B.

Tisková hlava je v ose X vedena pomocí hlazených tyčí o průměru 10 mm a lineárními ložisky s označením LM10UU. Pro osu Y jsou opět použity lineární tyče a lineární ložiska, tentokrát ale o průměru 8 mm (LM8UU).

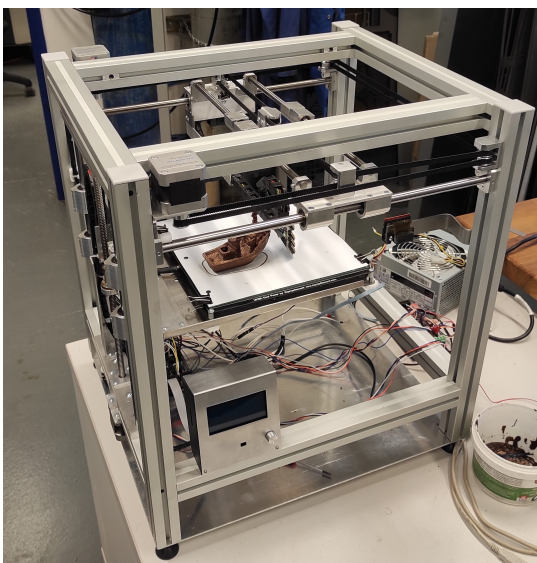
Pro osu Z je použit stejný krokový motor NEMA 17 Microcon s označením SX17005, který je spojen se závitovou tyčí pomocí pružný spojky. Použitá závitová tyč má trapézový závit Tr8x4. Rotační pohyb je zde transformován do přímočarého pohybu mosazné matice, která je rozdělena na dvě části, které se od sebe pomocí pružiny oddalují a vymezují tak vůli. Tato matice je přidělaná pomocí šroubů k plechu, který slouží jako stůl tiskárny. Stůl je veden hlazenými tyčí o průměru 12 mm a lineárními ložisky s označením LM12UU. [21]

5.3 Popis elektroniky

Celá tiskárna je poháněna zdrojem o výkonu 300 W, který na svém výstupu poskytuje 12V stejnosměrné napětí. Tento zdroj je připojen k řídicí desce RAMPS 1.4, jež společně s Arduino Mega 2560 Rev3 tvoří jádro tiskárny. Deska RAMPS 1.4 umožňuje připojení jednotlivých elektronických komponent, jako jsou krokové motory, topná tělesa, termistory, atd.

Tiskárnu lze ovládat pomocí potenciometru a tlačítka, které jsou společně s LCD displejem umístěny na plošném spoji. Tyto prvky jsou uloženy v krabici z ohýbaného plechu. Z této krabičky vedou kabely až k desce RAMPS 1.6.

Celou tiskárnu lze vidět na Obr. 13.



Obr. 13 Tiskárna v laboratoři s hlavou pro čokoládu

6 Návrh 3D tiskárny

Pro konstrukci byl použit program Creo Parametric 10.0.2.0. Na úplném začátku byla vytvořena složka, která byla nastavena jako pracovní složka pro ukládání dokumentů. Dále byla založena celková sestava pod názvem "KOMPAKT-NI_TISKARNA.asm" a byla uložena do dané složky.

Před pokračováním je třeba poznamenat, že uspořádání textu není v souladu s montáží tiskárny, ale s návrhem tiskárny a s cílem poskytnout srozumitelný popis konstrukce.

6.1 Rám 3D tiskárny

Rám 3D tiskárny nebude v kontaktu s čokoládou, takže se může použít jakýkoliv materiál. Pro konstrukci 3D tiskáren se nejčastěji používá hliníkový stavebnicový profil, jehož vlastnosti jsou ideální pro tento případ tiskárny (relativně vysoká tuhost, malá hustota a nízká cena z důvodu velké produkce).

6.1.1 Tvorba skeleton modelu

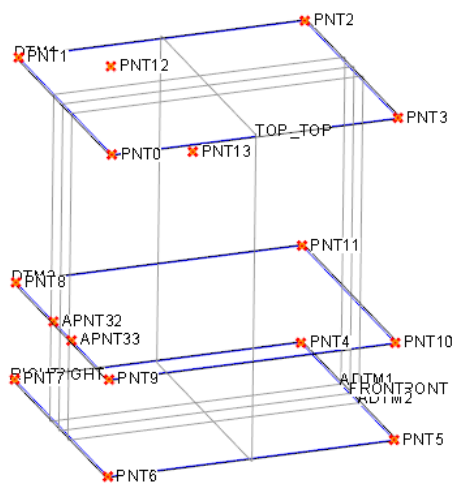
Pro vytvoření rámu byl vytvořen skeleton model, který už podle názvu naznačuje, že tvoří samotnou kostru rámu. Skeleton model byl tvořen podle následujících požadavků:

- Tiskárna musí obsahovat prostor pro elektroniku.
- Do skeleton modelu se musí vejít pracovní prostor 150x150x100 mm.
- Při návrhu je třeba brát zřetel i na velikost tiskové hlavy a velikost pohonu a vedení.

Jelikož jde o kompaktnost existující 3D tiskárny, lze se inspirovat tím, o kolik je třeba udělat větší konstrukci, než je samotný pracovní prostor. Z důvodu uložení hlavy je třeba rám v Y ose udělat o něco větší než v X ose. Pro začátek byl zvolen rozměr 300x260 mm v horizontálním směru. Výška prostoru pro elektroniku byla zvolena 80 mm a výška prostoru pro pracovní prostor byla zvolena 210 mm.

Za pomoci skic a rovin bylo vytvořeno několik bodů, které po spojení tvoří kostru rámu. Na Obr. 14 lze vidět i body APNT32 a APNT33, které dělí profil z důvodu umístění pohonu pro osu Z, která bude konstrukčně obdobná, jako na aktuální tiskárně, lze s tímto prvek tedy počítat.

Tyto rozměry jsou pouze předběžné a podle potřeby se budou později upravovat.

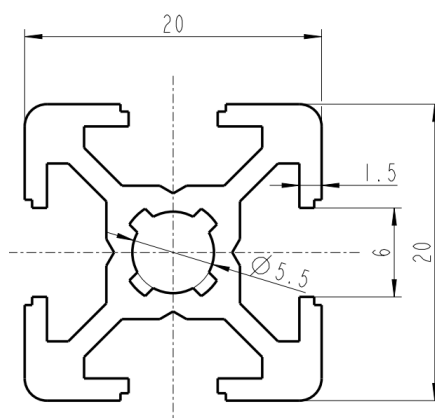


Obr. 14 Skeleton model

6.1.2 Tvorba rámu

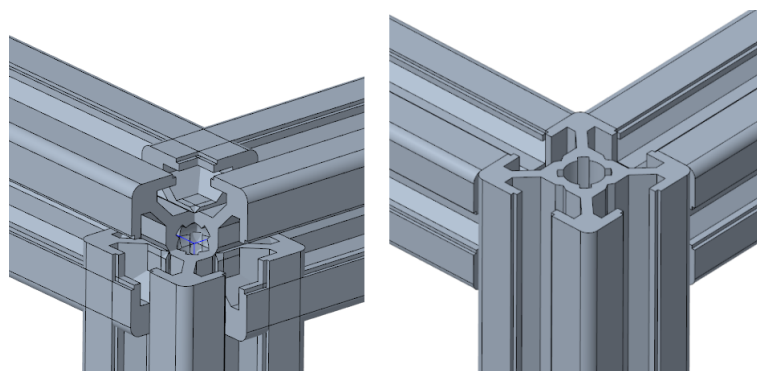
Vytvořený skeleton model lze nyní použít pro vysunutí profilu, který byl zvolen v kapitole č. 5. Tedy stavebnicový hliníkový profil o rozměrech 20x20 mm s drážkou 6 mm a průměrem jádra 5,5 mm pro závit M6. Tento profil je z materiálu EN AW-6063 (AlMg0.7Si).

Pro proložení bodů profilem byla v Creo Parametric použita záložka Framework, kde byl vytvořen nový projekt pomocí ikony "Create new project". Dále byl zvolen profil pomocí "New Profile", kde Creo už má předdefinované nejpoužívanější profily, jako jsou kulatiny, hranoly, atd. V knihovně byl nalezen potřebný profil, takže nebylo třeba tvořit nový (Obr. 15).



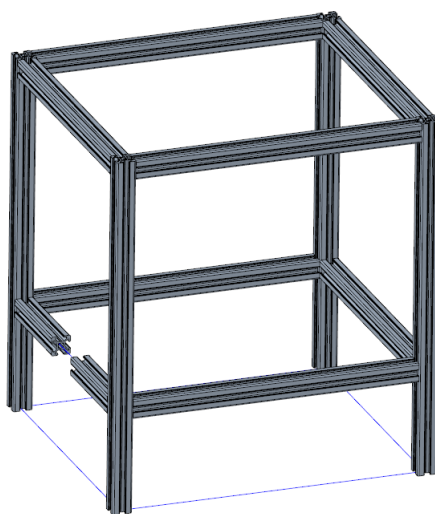
Obr. 15 Základní rozměry profilu

Jelikož se profily vytvoří až k daným bodům, tak se v rozích protínají. Pomocí ikony "Basic Joints" lze profily zkrátit tak, aby se ukončily po plochu následujícího profilu (Obr. 16).



Obr. 16 Roh před a po použití funkce Basic Joints

Tato funkce byla použita pro každý roh a nakonec vznikla samotná konstrukce (Obr. 17), kterou lze pomocí skeleton modelu předefinovat a není třeba při změně jakéhokoliv rozměru měnit rozměry jednotlivých profilů.



Obr. 17 Základní rám tiskárny

6.1.3 Spojení rámu

Pro spojení profilů existuje řada metod, které lze využít. Existují standardizovaná spojení jak pro pravoúhlé spoje, tak pro úhlové, různoběžné, čelní nebo rovnoběžné. V tomto konkrétním případě se vyskytuje pouze pravoúhlá orientace, u které existuje celá řada typů spojení.

Automatické spoje

Tento typ spoje se řadí mezi nejrychlejší a nejflexibilnější. Funguje na bázi silového styku. Tělo spoje se čelně zašroubuje do drážky profilu, přičemž se do drážky nařeže závit. Tento závit je levotočivý, aby se předešlo povolením těla při utahování šroubu, který se do těla vsune. Tento šroub se dále utáhne přes matici, která je vsunuta do drážky druhého profilu. Tento spoj by se měl používat zásadně v páru. [23]

Univerzální spoje

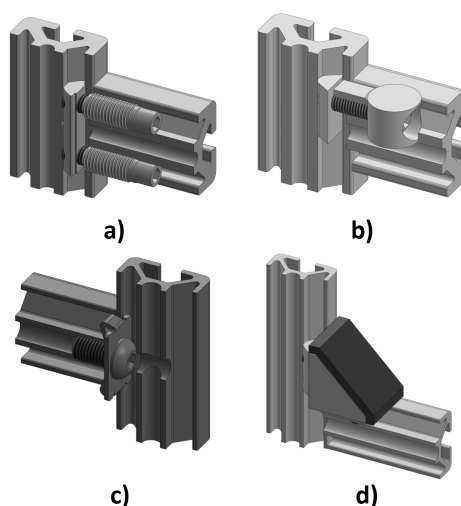
Tento typ spoje se řadí mezi vysoce pevné a flexibilní. Je vysoce odolný proti zatížení v posuvu, krutu i ohybu. Spoj je realizován pomocí nerezového válečku, který je vsunut do předvrtané díry na straně profilu. Přes tento váleček je prostrčený šroub, který je zašroubován do T matice v drážce druhého profilu. Univerzální spoj by se měl opět používat v páru. [23]

Standardní spoje

V této variantě je využito jádro profilu, ve kterém se vyřeže závit (často M5 nebo M6). Do druhého profilu se kolmo k ose jádra vyvrtá díra, která umožňuje utahování šroubu. Dále se do drážky profilu s vyvrtanou dírou vloží šroub, který se utáhne k jádru druhého profilu. Předchozí dvě varianty umožňovaly spoj povolit a posunout jeden profil vůči druhému, což standardní spoj neumožňuje z důvodu nemožnosti utažení. Tento spoj odolává vysokému zatížení v posuvu a krutu. [23]

Použití úhelníku

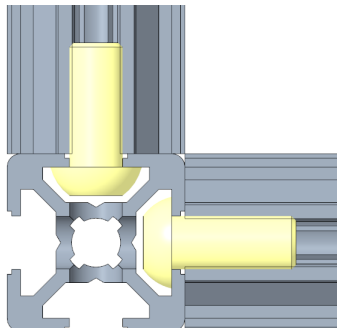
Výhoda použití úhelníku či spojovací desky spočívá v tom, že není třeba opracovávat profily. Nevýhoda je taková, že je třeba použít další prvek (úhelník nebo spojovací desku) a na každém rohu utáhnout minimálně o 1 šroub více. [23]



Obr. 18 Spoje: a) automatický b) univerzální c) standardní d) úhelník [20]

Výběr spoje a realizace

Pro spojení profilů byl použit standardní spoj, zejména proto, že není nutné využívat výhody automatického nebo univerzálního spoje (který by umožňoval povolení a posouvání profilů vzhledem k sobě) na úkor složitější výroby spoje.

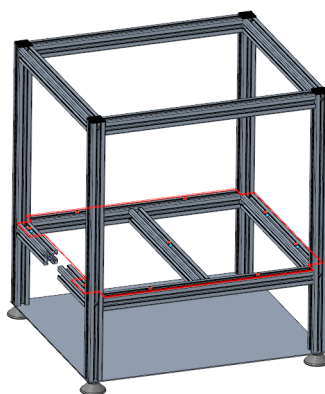


Obr. 19 Způsob spojení profilu

6.1.4 Přidané prvky k rámu

Aktuálně by byl rám dostačující, ale pro lepší vzhled a lepší usazení na stůl se mohou přidat krytky na konec profilů a stojany pod tiskárnu. Dále je třeba rozdělit pracovní prostor od prostoru s elektronikou. Proto byl vložen jeden plech na vodorovné hliníkové profily a druhý plech mezi hliníkovými profily a stojany.

Po konzultaci s katedrou bylo zjištěno, že laser dostupný v laboratoři přeřízne maximálně hliníkový plech o tloušťce 1 mm. Tento plech by byl prověšený a za chodu tiskárny by docházelo k jeho vibracím. Proto byl zvolen plech z nerezové oceli o stejné tloušťce, který laser zvládne přeříznout, a není třeba vyrábět plech na míru, který by byl o dost dražší. Pro zvětšení tuhosti byl přidán napříč tiskárny hliníkový profil jako výztuž.

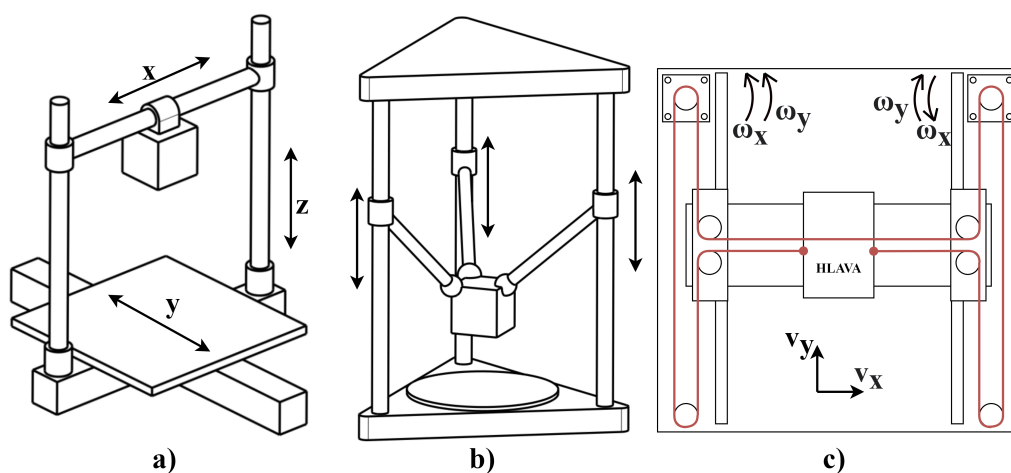


Obr. 20 Rám s krytkami, stojany a plechy

6.2 Pohony 3D tiskárny

Existuje několik různých konfigurací 3D tiskáren, mezi které například patří nejrozšířenější kartézská, kterou s oblibou používá firma Prusa Research. V této konfiguraci se hlava tiskárny pohybuje ve třech vzájemně kolmých osách X, Y a Z, a každá z těchto os je poháněna vlastním krokovým motorem. Často je tiskárna realizována tak, že se hlava pohybuje v ose X a Z a stůl se pohybuje v ose Y (Obr. 21 a)).

Dalším, již méně běžným uspořádáním, je delta, která je spíše určena pro tisk rotačních dílů. V této konfiguraci je tisková hlava připojena k třem vozíkům, které se pohybují ve svislé ose. Pro plynulý pohyb v jedné ose je nezbytná spolupráce mezi všemi třemi motory (Obr. 21 b)).



Obr. 21 Konfigurace tiskáren: a) Kartézská, b) Delta, c) H-Bot

Další běžnou konfigurací je CoreXY, která je používána i na tiskárně v laboratoři. V této konfiguraci jsou k dispozici samostatné krokové motory pro osy X a Y, které pohánějí ozubené řemeny propojené s hlavou tiskárny. Pro pohyb v jedné ose X nebo Y se vyžaduje spolupráce obou motorů (Obr. 12). Pro osu Z je k dispozici samostatný krokový motor, který zvedá stůl tiskárny.

Další konfigurace je H-Bot. Tato konfigurace je podobná jako CoreXY, ale odlišuje se v uspořádání kladek a použitím jednoho řemene, kde řemen tvoří tvar písmena H (Obr. 21 c)). Pro pohyb v ose X je potřeba, aby se motory otáčely ve stejném směru. Při otáčení motorů protisměru se hlava pohybuje v ose Y. Tato konfigurace je méně běžná, než CoreXY nebo kartézská.

Při návrhu rámu bylo počítáno s využitím stejné konfigurace jako na tiskárně v laboratoři, tedy uspořádání CoreXY. Pro osu Z byla tedy použita závitová tyč s maticí, která bude připojena ke stolu tiskárny. Pro osy X a Y byly použity stejné kladky a řemeny jako na tiskárně v laboratoři, ale princip vedení se zde liší. Pro osy X a Y bylo zvoleno lineární vedení s vozíkem místo válcového lineárního vedení, a to zejména v ose X, kde není nutné párové vedení. Tímto způsobem bylo minimalizováno přemísťování hmoty v ose Y.

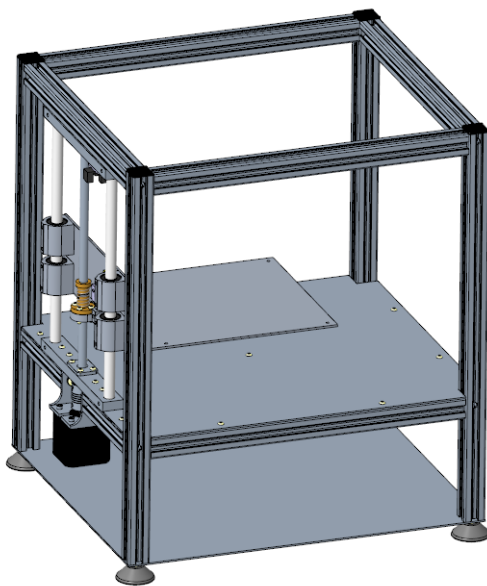
6.2.1 Osa Z

Pro pohyb v ose Z byl použit krokový motor NEMA 17 s kroutícím momentem 0,5 Nm s krokem $1,8^\circ$, čemuž odpovídá 200 kroků na otáčku. Tento motor je ve svislé poloze přidělán pomocí držáků k rámu tiskárny. Kroutící moment motoru se přenáší přes pružnou spojku k závitové tyči, která je uložena přes kuličková ložiska s označením 685ZZ a jejich domků k rámu tiskárny.

Rotační pohyb nerezové závitové tyče se převádí na lineární pohyb bronzové matice. Jelikož šroub bude zvedat minimální hmotnost (do 1 kg + výtisk) byla zvolena závitová tyč o průměr 8 mm se stoupáním 8 mm. Jedna otáčka rotoru tedy posune stůl o 8 mm. S 200 kroky motoru lze se stolem posouvat o vzdálenost $L = 8/200 = 0,04 \text{ mm}$.

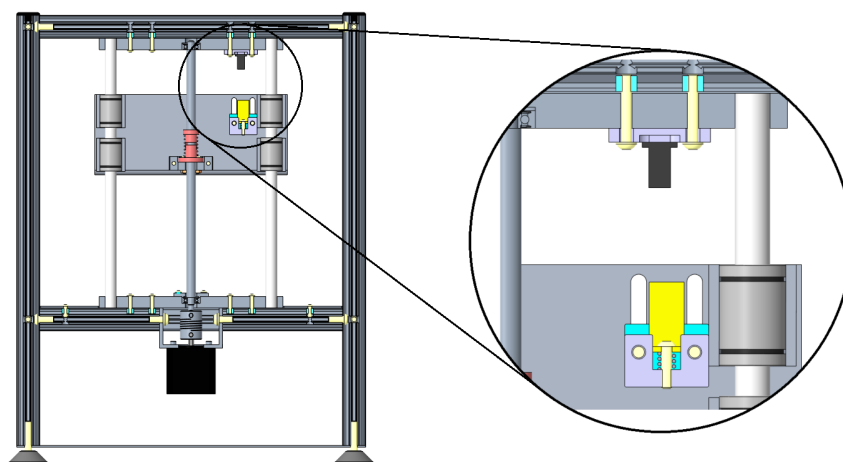
Matice s trapézovým závitem je rozdělena na dvě části, které jsou navzájem odtahovány pružinou, která vymezuje vůli na závitu. K bronzové matici je pomocí 4 šroubů a matic přidělán držák matice, ke kterému je následně přidělán držák stolu.

Součástí osy Z je také válcové lineární vedení, které se skládá ze dvou nerezových lineární tyčí a dvou lineárních ložisek s označením LM10UU.



Obr. 22 Osa Z

Při konstrukci bylo nutné zohlednit potřebu přesného zarovnání stolu s referenčním bodem. K tomuto účelu byl použit optický snímač s označením TCST2103, který byl připevněn k hornímu domku ložiska pomocí dvou šroubů. Dále byl na držák stolu připevněn hliníkový blok, ke kterému je připojen plech sloužící jako clona. Tento blok lze podle potřeby nastavit výškově o 20 mm pomocí drážek v držáku stolu. Plech, který slouží jako clona, je připojen k bloku prostřednictvím šroubu a pružiny, která zajišťuje bezpečnost v případě, že senzor nezareaguje (Obr. 23).



Obr. 23 Boční pohled s detailem

Kontrola závitové tyče na vzpěr

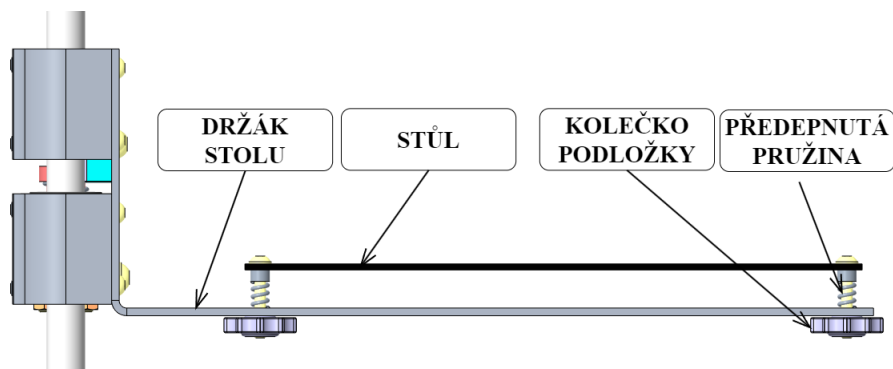
Závitová tyč má rozměry Tr8x2 se čtyřmi závity, což znamená, že stoupání závitu činí 8 mm. ($d_3 = 5,5 \text{ mm}$)

$$F_{kr} = \frac{2\pi^2 EI_{min}}{l^2} = \frac{2\pi^2 E \frac{\pi \cdot d_3^4}{64}}{l^2} = \frac{2\pi^2 (2 \cdot 10^5)^6 \cdot \frac{\pi \cdot (5,5 \cdot 10^{-3})^4}{64}}{(300 \cdot 10^{-3})^2} = 1970 \text{ N}$$

Po vydělení kritické síly gravitačním zrychlením ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) vychází, že maximální hmotnost, která může na tyč působit, aby neztratila svoji stabilitu, je 200 kg. Jedná se pouze o orientační výsledek, protože u zakoupené závitové tyče nebyl specifikován přesný materiál.

Stůl tiskárny

Pro tiskárnu byla použita podložka o celkové velikosti 162x162 mm, na kterou lze tisknout díl o maximální velikosti přibližně 150 x 150 mm v horizontální rovině. Tato podložka byla navržena tak, aby šla vyrobit, jako nerezový výpalek o tloušťce 1,6 mm. Tato podložka je přidělána pomocí 4 šroubů k držáku stolu. Spoj je realizovaný pomocí samojistící matice, která je uložena v kolečku podložky. Následným otáčením kolečka lze předepnout pružinu mezi držákem stolu a samotné podložky (Obr. 24).



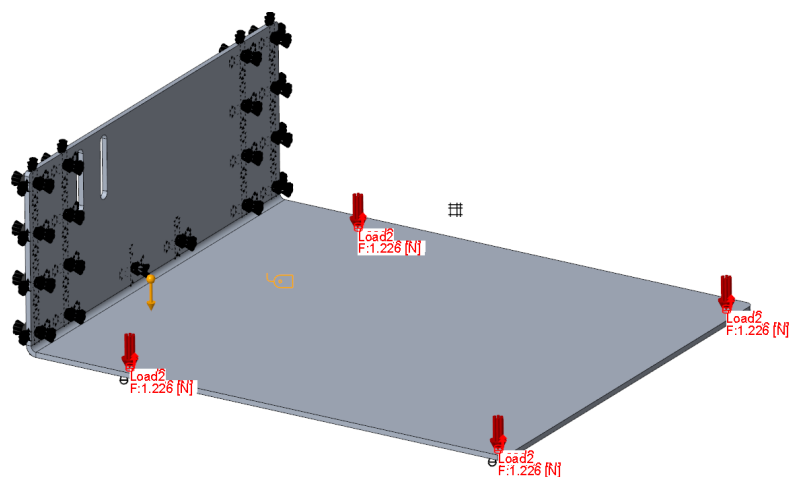
Obr. 24 Boční pohled na stůl

Deformace stolu

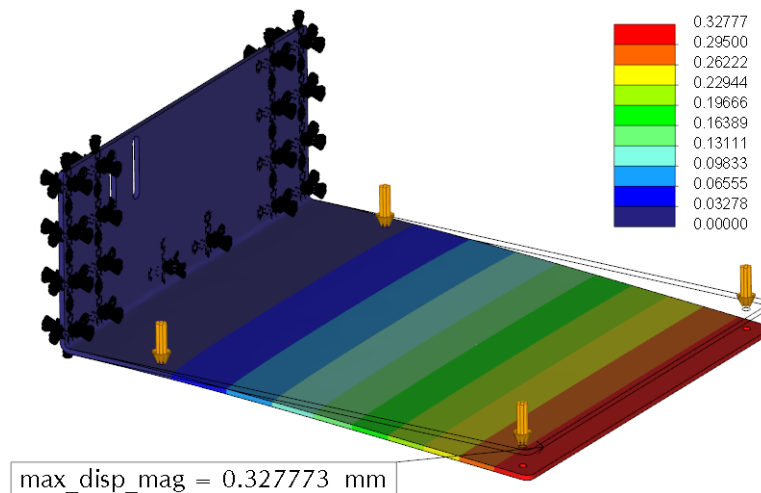
Držák stolu byl vyroben z relativně tenkého plechu a má relativně velké vyložení, proto byla provedena simulace deformace pomocí MKP. Simulace proběhla v programu Creo Parametric 10.0.2.0 s nadstavbou Simulate. Při výpočtu byla zahrnuta vlastní váha držáku stolu, podložek, šroubů, pružin, koleček, matic a nakonec i váha výtisku. Z již provedených výtisků na 3D tiskárně v laboratoři byla stanovena průměrná hmotnost výtisku do 0,3 kg, s níž bylo také počítáno při simulaci.

Nejprve bylo třeba nadefinovat materiál a okrajové podmínky. Držák stolu je přidělaný pomocí šroubů k lineárnímu vedení a k držáku matice. V těchto místech byla zavedena pevná vazba. Veškerá váha již zmíněných prvků je rozložena do 4 šroubů které spojují podložku s držákem stolu, proto do těchto šroubů byly zavedeny síly o 4x menší celkové velikosti (Obr. 25).

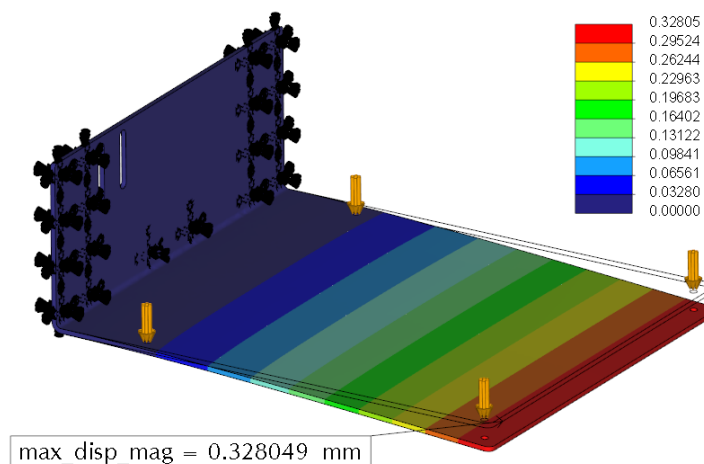
Pro ověření výsledků byla simulace provedena 2x. První při automatickém generování sítě a druhou při nastavení sítě tak, aby maximální velikost elementu sítě byla 5 mm. Pro tuto možnost byla použita funkce Maximum element size control. Výsledky lze vidět na Obr. 26 a Obr. 27.



Obr. 25 Nadefinované okrajové podmínky



Obr. 26 Průhyb stolu pomocí MKP bez mřížky (5x zvětšeno)

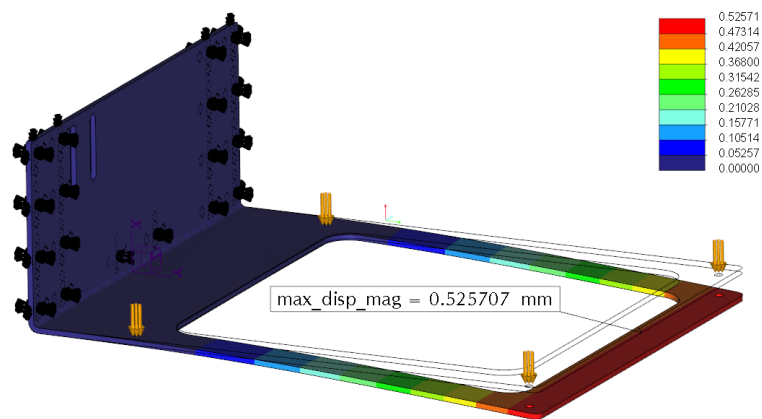


Obr. 27 Průhyb stolu pomocí MKP s mřížkou (5x zvětšeno)

Z obrázků lze vyčíst, že se při změně maximálního elementu sítě výrazně nemění výsledek průhybu. Dále byl zjištěný maximální průhyb 0,328 mm, který je na konci držáku stolu. Velikost maximálního průhybu je poměrně veliký, ale výpočet nepočítá s tuhostí samotné tiskové podložky a šroubových spojů, které tento průhyb zmenší. Výpočet byl také proveden při nejhorším možném případě, který bude při nastavování tisku zohledněn.

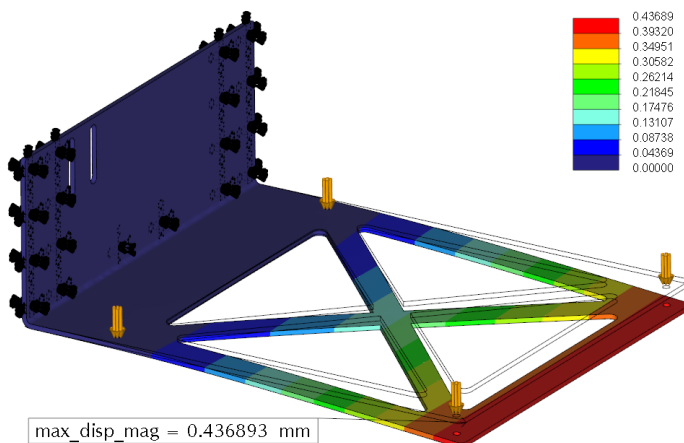
Optimalizace držáku

V rámci minimalizace hmotnosti tiskárny bylo vytvořeno několik variant držáku stolu a bylo zkoumáno, při jaké konfiguraci byla nejmenší hmotnost a nejmenší deformace. První varianta byla taková, že se odebral materiál ve tvaru čtverce o co největší velikosti. V tomto případě bude hmotnost 0,402 kg. Maximální deformace držáku byla 0,526 mm (Obr. 28).



Obr. 28 První optimalizace držáku (5x zvětšeno)

Druhá varianta vyplňuje vytvořený čtvercový prostor o kříž se šířkou materiálu 12 mm. Při této konfiguraci má držák hmotnost 0,472 kg a maximální deformaci 0,437 mm (Obr. 29).



Obr. 29 Druhá optimalizace držáku (5x zvětšeno)

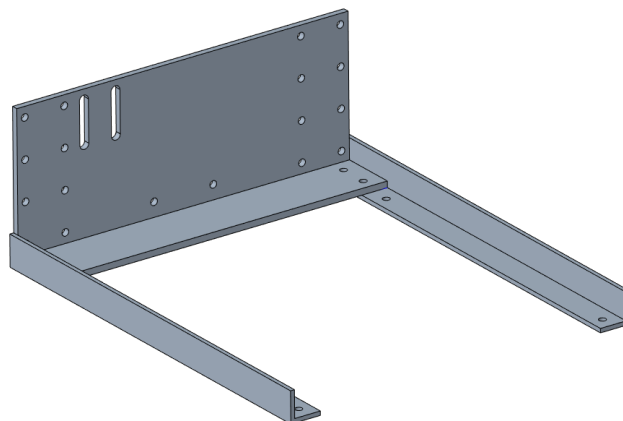
V souhrnné tabulce č. 6 lze vidět porovnání váhy a deformace držáku stolu. Kříž oproti plnému materiálu má o 0,230 kg menší váhu a deformaci o 0,1 mm větší. V porovnání prázdného materiálu a kříže je váhový rozdíl minimální a deformační rozdíl poměrně velký. Proto využití čtvercového otvoru není vhodné. Z těchto tří variant vychází neoptimálněji varianta obsahující kříž, kde je třeba počítat s o 0,1 mm větší maximální deformací oproti variantě plného materiálu.

Tab. 6 Porovnání vah a deformací držáku stolu

	Váha [kg]	Deformace [mm]
Plný	0,702	0,328
Čtverec	0,402	0,526
Kříž	0,472	0,437

Druhá varianta držáku

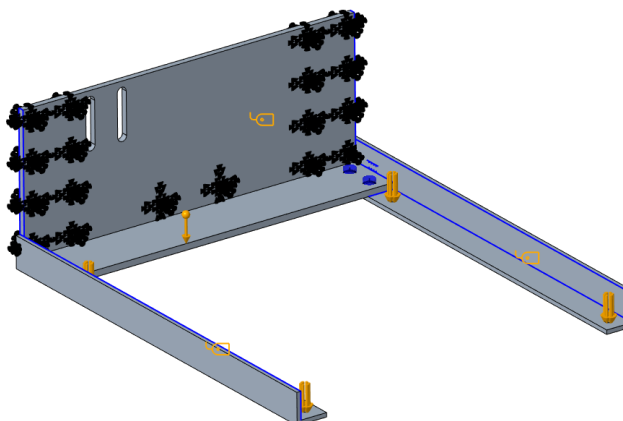
V rámci optimalizace držáku byla navržena druhá varianta, kde byly využity hliníkové L profily. Jeden hlavní profil o velikosti 70x30x3 mm, který je přidělaný k domkům lineárních ložisek. K tomuto profilu jsou dále přidělané profily o velikosti 15x15x2 mm, ke kterým se obdobně jako v předchozí variantě přidělá podložka tiskárny (Obr. 30). Tato sestava má celkovou hmotnost 193 g.



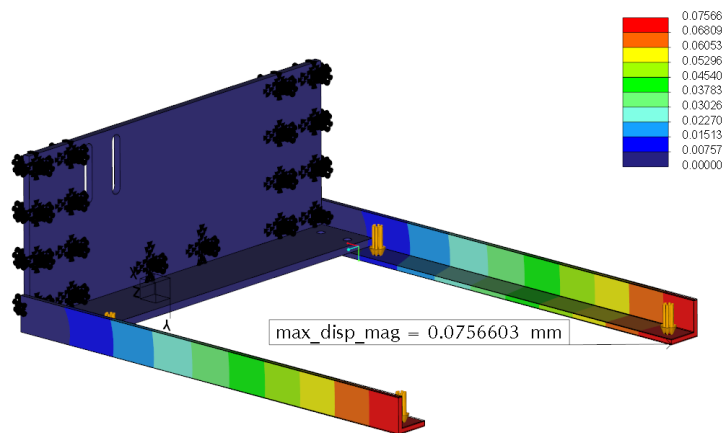
Obr. 30 Model druhé varianty stolu

Nastavení simulace je stejné, jako v předchozích variantách, se stejnými okrajovými podmínkami a stejným zatížením (Obr. 31). K simulování bylo třeba nastavit šroubový spoj mezi jednotlivými profily. Proto byla použita funkce Fastener, kde bylo třeba nastavit velikost šroubu a místo hlavy šroubu a matice.

Na Obr. 31 lze vidět modré obrysy, které znázorňují kontaktní plochy. Při simulaci bylo třeba nastavit svíslé plochy jako volné vůči sobě, protože jsou pouze v kontaktu a nedrží se navzájem. Kdyby se toto nenastavilo, program by si myslel, že díly jsou k sobě například svařeny. Naopak plochy, které jsou kolmé k ose šroubu bylo třeba nastavit, jako kontaktní.



Obr. 31 Nastavení simulace



Obr. 32 Simulace druhé varianty stolu (5x zvětšeno)

Ze simulace vyšlo, že největší deformace je na koncích profilů a činí 0,076 mm. Oproti vybrané variantě v předchozí kapitole se snížila deformace přibližně 5x a hmotnost se zmenšila přibližně 2x. Proto je z hlediska deformace a hmotnosti tato varianta nejlepší. Nevýhodou této varianty je, že je třeba vyrobit o několik dílů více a použít šroubové spoje, což je náročnější na montáž.

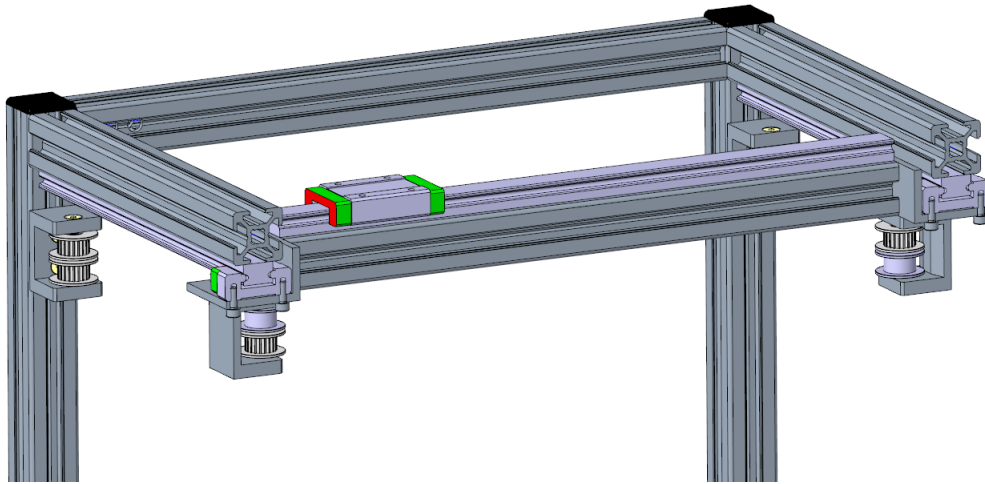
Tab. 7 Porovnání 1. a 2. varianty

	Váha [kg]	Deformace [mm]
Kříž	0,472	0,437
Hliníkové profily	0,193	0,076

6.2.2 Osa X a osa Y

V aktuálním stavu tiskárna umožňuje pohyb v jedné ose. Pro pohyb v ose Y bylo použito lineární vedení s vozíkem s označením MGN12H o délce 300 mm. Toto vedení bylo přiděleno ke spodní ploše horního hliníkového profilu. Z tohoto důvodu bylo třeba prodloužit jeden rozměr skeleton modelu z 300 mm na 320 mm.

Stejně lineární vedení s vozíkem bylo přiděleno i na protilehlý profil. K těmto vozíkům byl přidělen L profil pomocí 4 šroubů. Mezi těmito profily byl dále umístěn další hliníkový profil, který slouží jako držák pro lineární vedení s vozíkem pro osu X. Toto lineární vedení má stejné označení jako předchozí, tedy MGN12H, ale má délku 150 mm. Bylo přiděleno k horní ploše hliníkového profilu a opět bylo nutné upravit druhý rozměr skeleton modelu z 260 mm na 284 mm.

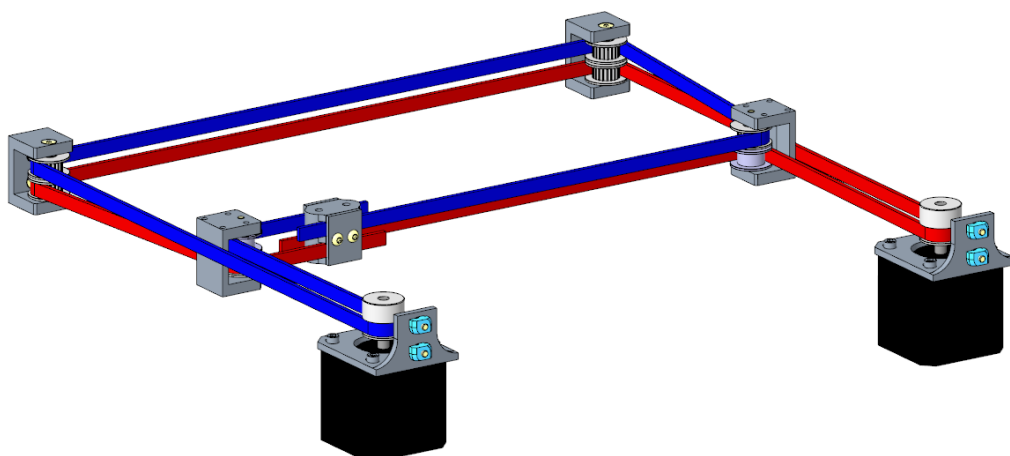


Obr. 33 Lineární vedení pro osu X a Y

Na L profily byly namontovány držáky řemenic, které mají stejný design jako ty, co jsou použity na tiskárně v laboratoři, aby se zrychlilo programování CNC. Na Obr. 33 lze dále vidět držáky řemenic na svislých hliníkových profilech. Tyto řemenice jsou součástí konfigurace CoreXY.

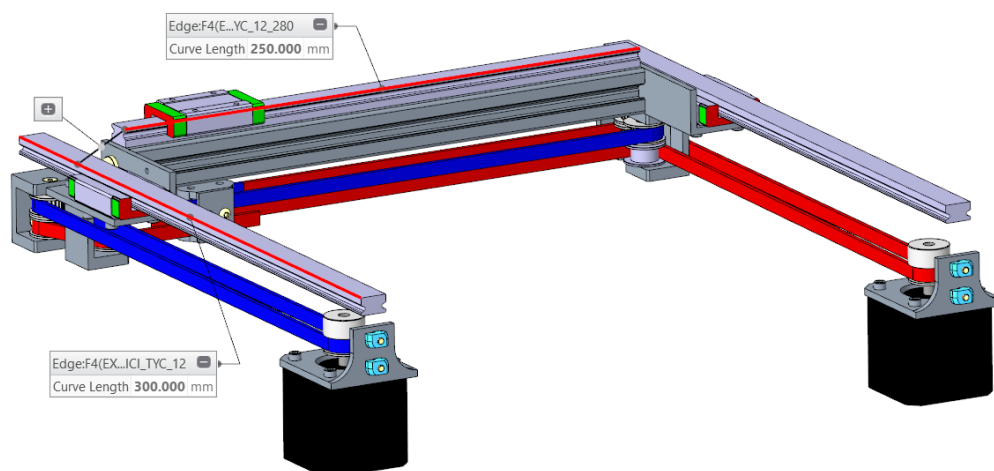
Pro pohánění tiskové hlavy v ose X a Y byly použity krokové motory se stejným označením jako motor na ose Z (NEMA 17), ale s kroutícím momentem 0,6 Nm a s krokem 1,8°. Na hřídele těchto motorů byly přidělaný řemenice s označením POWGE GT2 s 20 zuby. Tyto řemenice musí být ve stejné orientaci a ve stejné výškové rovině jako jsou řemenice na Obr. 33, proto motory byly přidělaný na zbývající dva svislé profily prostřednictvím šroubů a T matic.

Dále bylo třeba rozvést řemeny přes řemenice na motoru, na profilech a na pohyblivé části až ke spojce u hlavy tiskárny. Byly použity dva řemeny s ocelovým vláknem s označením GT2, které mají rozměr na výšku 6 mm a na šířku 2 mm a rozteč zubů 2 mm (Obr. 34).



Obr. 34 Rozvod řemenů

Tyto řemeny začínají a končí u spojky, kde jsou utaženy přídržným plechem. Tato spojka je dále přidělena k hlavě tiskárny (viz kapitola 6.3). Na Obr. 35 lze vidět kompletní sestavu pohonů pro osu X a Y s již dříve uvedenými rozměry.



Obr. 35 Pohony X a Y

6.3 Hlava tiskárny

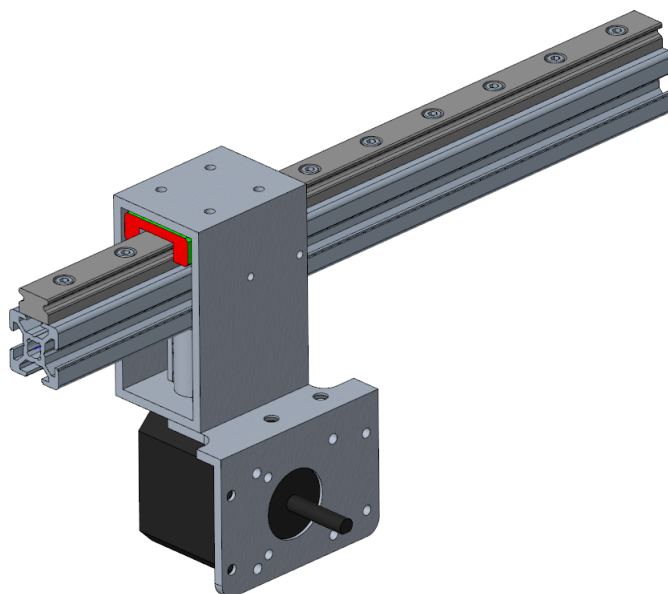
Při návrhu hlavy tiskárny byl využit koncept pana Ing. Jana Rychtárka. Zachován byl zásobník na čokoládu, z důvodu využití již vyrobeného dílu. Tento přístup byl zvolen z důvodu náročnosti výroby nového zásobníku. Na základě získaných zkušeností z předchozích tisků s touto hlavou bylo zjištěno, že umístění zásobníku vedle čerpadla vede k několika komplikacím. Umístění zásobníku nad čerpadlo by umožnilo čokoládě přirozeně přitéct do čerpadla samospádem a výkon čerpadla by byl využit pouze k dávkování čokolády a ne k dopravě čokolády ze zásobníku k čerpadlu.

Přesunutí zásobníku by také usnadnilo lepší kontrolu teploty čokolády, jelikož by termistor a topné těleso bylo blíže ke trysce a nedocházelo by tak k výrazné změně teploty mezi zásobníkem a tryskou.

Další komplikace vznikala při vypnutí topného tělesa a zastavení tisku, kdy docházelo ke ztuhnutí čokolády v čerpadle a při opětovném zapnutí trvalo dlouhou dobu, než se čokoláda zase ohřála tak, aby čerpadlo mohlo plynule pracovat. Proto bylo zapotřebí přidat další topné těleso k tělu čerpadla, které by tuto čokoládu rychleji ohřálo a tisk mohl zase pokračovat.

Jako první věc, která byla potřeba vyřešit, tak byl způsob přidělení hlavy ke spojce řemenů a k vozíku lineárního vedení. Byl použit hliníkový obdelníkový profil o velikosti 65x35x3 mm, do kterého se vejde vozík, vedení, hliníkový profil a spojka (Obr. 36).

K tomuto obdelníkovému profilu byl přidělán L profil, který slouží jako nosný prvek krokového motoru, který pohání čerpadlo. Tedy na podobný princip, jako v již zmíněné hlavě.



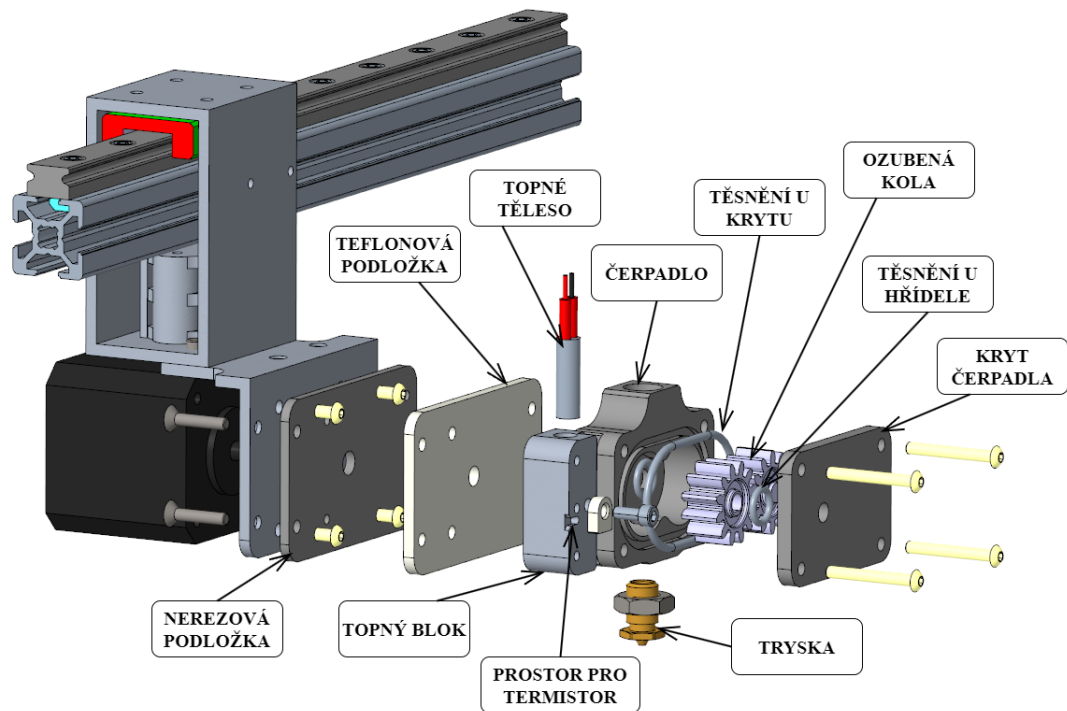
Obr. 36 Přidělení hlavy ke spojce a k vozíku

6.3.1 Návrh čerpadla

V dalším kroku bylo třeba navrhnout čerpadlo, které bude pohánět krokový motor s označením NEMA 17 s kroutícím momentem 0,5 Nm a bude připevněné k L profilu. Součástí čerpadla bude již zmíněné topné těleso, které bude uloženo v samostatném hliníkovém bloku, přes který se bude teplo přenášet k čerpadlu. Aby se teplo přenášelo co nejlépe, je třeba, aby topný blok byl co nejbližší k čerpadlu. Proto je nutné zajistit, aby se topný blok mohl posouvat v horizontálním směru a po přimáčknutí k čerpadlu se dal utáhnout. Tyto prvky je třeba izolovat od zbytku hlavy, aby se zbytečně teplo nepřenášelo do prvků, které není třeba ohřívat. Proto mezi čerpadlo a L profil byla vložena teflonová podložka, která má nízký součinitel teplotní vodivosti.

Při návrhu čerpadla bylo třeba opět zanechat pár prvků, z důvodu urychlení CNC programování a následné výroby. Byl zachován tvar ozubených kol, tudíž muselo být zachováno jádro čerpadla. Jelikož je čerpadlo v přímém kontaktu s čokoládou, musí být vyrobené z materiálu, který je nezávadný pro potraviny. Materiál pro tělo čerpadla byl zvolen ČSN 17240 a pro ozubená kola byl zvolen POM-C NATURAL. V jádru čerpadla bylo třeba přidat těsnění mezi ozubenými koly a hřídelí krokového motoru, tudíž byly použity O-kroužky o velikosti 6,75x1,78. Dále bylo třeba přidat těsnění mezi tělem čerpadla a krytem čerpadla. Byl použit O-kroužek o velikosti 35x2, který byl vložen do drážky na čerpadle o stejné obvodové délce.

Po různých úpravách čerpadla bylo zjištěno, že je velmi obtížné navrhnout rozteče děr tak, aby šlo využít roztečí děr na krokovém motoru. Proto byla mezi teflonovou podložku a L profil vložena podložka z nerezové oceli, do které byly vyříznuty závit. Tato podložka je připevněna pomocí 4 šroubů ke krokovému motoru.



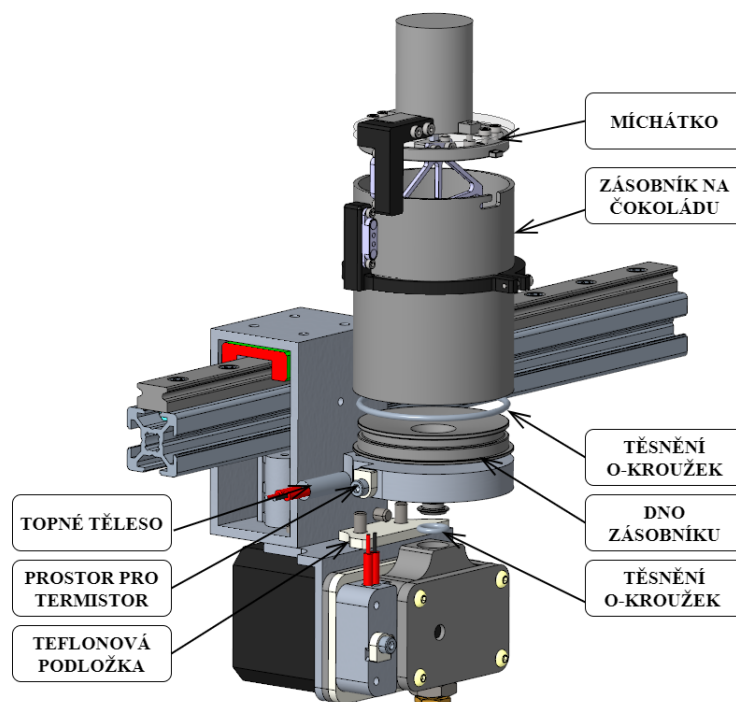
Obr. 37 Návrh čerpadla

Na spodní části čerpadla je vyříznutý závit pro ocelovou trysku, která je zajištěna nízkou maticí. Na horní části je zahluobení, do kterého se zavádí dno zásobníku. Aby se dno zásobníku mohlo zasunout do horní části čerpadla, je třeba, aby součásti mezi sebou měly volnou toleranci. Proto je i do tohoto místa třeba vložit O-kroužek, který lze vidět na Obr. 38.

6.3.2 Návrh uchopení zásobníku

Další část hlavy, která hraje velkou roli, tak je hliníkový blok, který bude ohřívat dno zásobníku a tím ohřívat čokoládu v zásobníku. Tento blok je třeba opět oddělit od zbytku hlavy, aby se teplo nešířilo, kde není potřeba. Proto byla vložena teflonová podložka mezi L profilem a topným blokem.

Na tento topný blok bylo umístěno dno zásobníku společně se zásobníkem. Opět je třeba oddělitelné části utěsnit, aby nedocházelo k úniku čokolády. Proto byl použit o-kroužek o velikosti 42x2, který je třeba roztáhnout na průměr 44 mm a nasadit na dno zásobníku. Druhý O-kroužek je o velikosti 6,75x1,78 a je nasazen na spodní část dna zásobníku, která je nasunuta do horní části čerpadla. Dno zásobníku je přizpůsobeno tak, aby čokoláda snadno stekla do jádra čerpadla a to tak, že má na vnitřní části úkos.



Obr. 38 Návrh zásobníku

Na vrchní části zásobníku lze vidět objímku a víko, do kterého je implementován stejnosměrný motor a míchátko, které čokoládu za dobu tisknu míchá a nedochází tak k oddělení jednotlivých složek. Míchátko také napomáhá k rychlejšímu ohřevu čokolády v celém objemu.

Aktuálně je část nad topným blokem pouze položena a není přidělena ke zbytku hlavy. V předchozí variantě byla tato část přišroubována k topnému bloku, to ale bylo přítěží při čistění hlavy, kdy bylo třeba odšroubovat několik šroubů a po vyčištění znovu přišroubovat. Proto byly navrženy dva pákové uzávěry, které jsou napevno přidělány k topnému bloku. Tyto pákové uzávěry stahují objímku, která je umístěna na zásobníku. Tento princip umožňuje rychlé odepnutí a připnutí horní části hlavy.

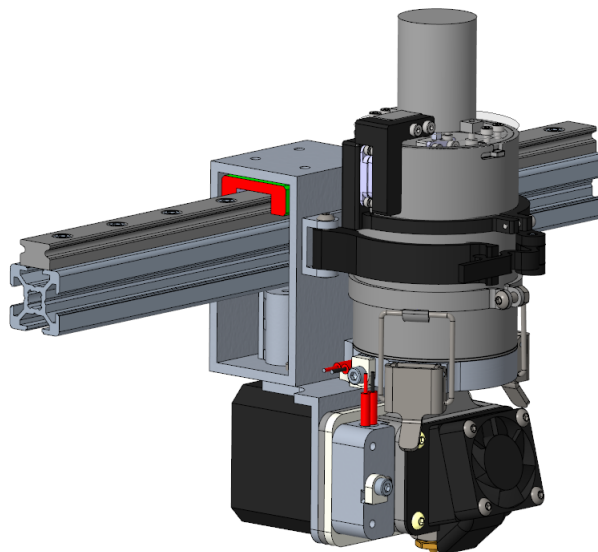
Jelikož tisk čokolády neumožňuje tiskárně pracovat za vysokých rychlostí, měly by tyto pákové uzávěry horní část hlavy udržet. Pro jistotu byl navržen další držák, který zabraňuje převrácení horní části. Držák je složený z dílu, který je přidělaný pomocí 2 šroubů k obdelníkovému profilu. K tomuto dílu jsou přidělané dvě čelisti, které uchytí zásobník po obvodu a pomocí klapky se k němu stáhnou (Obr. 39).

6.3.3 Chlazení

Při tisku čokolády je nezbytné výtisk během provozu chladit, aby nedocházelo k jeho zhroucení. Proto je nutné k hlavě tiskárny přidat aktivní chlazení, které bude směřovat k části, kde je umístěna tryska.

K tomuto účelu byl vybrán axiální ventilátor o rozměrech 30x30x10 mm, ke kterému bylo zapotřebí navrhnout držák pro připevnění k hlavě tiskárny. Držák by měl

být konstruován tak, aby ventilátor byl dostatečně nakloněný, aby tok vzduchu co nejlépe směřoval k trysce (Obr. 39).



Obr. 39 Kompletní hlava tiskárny

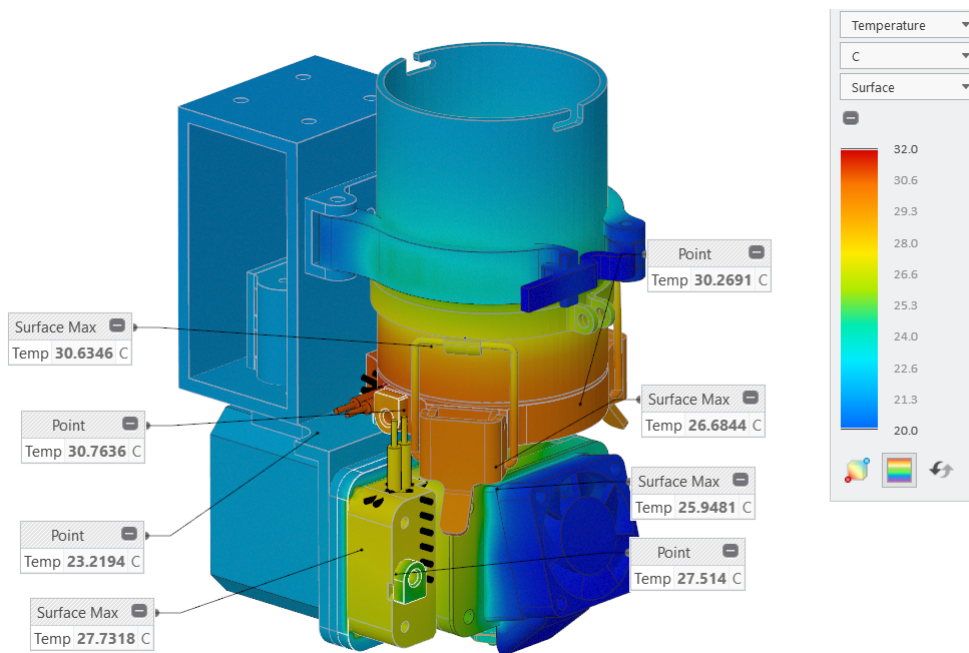
6.3.4 Teplotní analýza

Jak již bylo psáno dříve, hlava je osazena 2 topnými tělesy a 2 termistory. Vždy je usazen pár složený z topného tělesa a termistoru. Jeden pár je usazený do topného bloku u čerpadla a druhý pár je usazen do topného bloku u zásobníku. Pro zobrazení přestupu tepla hlavou tiskárny byla provedena teplotní analýza v systému Creo Parametric 10.0.2.0 za pomoci funkce Live Simulation.

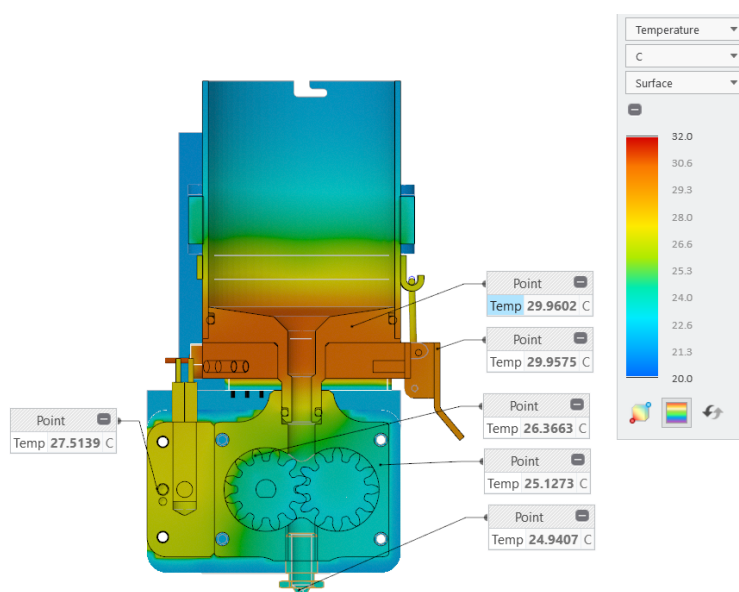
Nejprve bylo třeba nastavit okolní teplotu na 20°C a nadefinovat součinitel přestupu tepla. Tento součinitel lze určit experimentálně nebo na základě teorie podobnosti. Jelikož je hlava složena z několika částí o různých tvarech, je obtížné využít teorii podobnosti. Na základě praktických znalostí byla stanovena běžná hodnota $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Dále byla nastavena teplota 28°C na topném tělese u čerpadla a 32°C u zásobníku.

Dále bylo třeba nadefinovat materiály pro jednotlivé díly. Pro profily a topné bloky byl nastaven hliník, pro ozubená kola a držák ventilátoru byl nastavený POM. Zásobník, čerpadlo a pákový uzávěr byl nastaven na nerezovou ocel. Tyto materiály jsou primárně nastaveny v knihovně softwaru a jsou nadefinovány i koeficienty teplotní vodivosti.

Z Obr. 40 lze hlavně vyčíst, že izolace vyrobená z teflonu plní svůj účel a hliníkové topné bloky přenášejí teplo do čerpadla a zásobníku. Na Obr. 41 je patrné, že se teplo přenáší i na pákové uzávěry, což je nevhodné. Proto by bylo na místě použít teflonové podložky mezi hliníkový blok a tyto uzávěry.



Obr. 40 Teplotní analýza hlavy

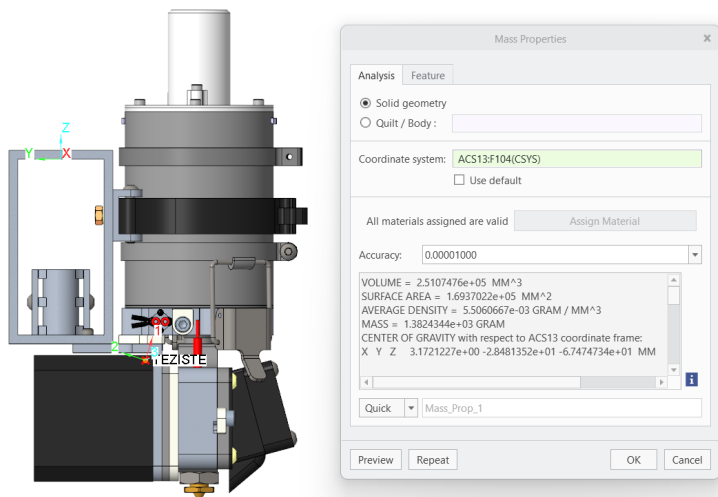


Obr. 41 Teplotní analýza v řezu hlavy

6.3.5 Klopný moment

Jelikož je hlava tiskárny umístěná jen na jeden vozík, může váha hlavy a vyosení od vozíku způsobovat klopný moment. Manuální výpočet těžiště a celkové váhy by byl velmi obtížný, proto byla využita hmotnostní analýza v Creo Parametric 10.0.2.0.

Pro tuto analýzu je potřeba, aby každý díl měl přiřazený materiál s nadefinovanou hustotou. Tento krok byl proveden v předchozí podkapitole. Proto nyní stačí otevřít hmotnostní analýzu, která okamžitě vypíše hmotnost celé sestavy. Dále je třeba nadefinovat souřadnicový systém, který bude umístěný v ose vozíku. Při spuštění hmotnostní analýzy lze změnit souřadnicový systém, od kterého se bude měřit těžiště sestavy (Obr. 42).



Obr. 42 Hmotnost a těžiště hlavy

V dalším kroku byl vytvořený bod, na který byly pomocí relací implementovány vzdálenosti vozíku od těžiště. Tyto vzdálenosti dále soužily k automatickému výpočtu klopných momentů.

$$M = F \cdot r = m \cdot g \cdot r,$$

kde m je hmotnost [kg], r je rameno [m] a g je gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$].

Tyto hodnoty jsou dále propisovány do výkresu samotné hlavy tiskárny, kterou lze vidět v příloze 3-KSA-S22000240-04-00. Největší klopný moment je okolo osy X, který aktuálně vychází 0,38 Nm. Tato hodnota se ještě může lišit od finální verze z důvodu drobných úprav. Nejposlednější hodnotu lze najít v již zmíněné příloze. K posouzení tohoto klopného momentu musel být použit katalog od jiného výrobce, který poskytuje stejnou řadu lineárního vedení. Tento výrobce udává maximální klopný moment v této ose 39 Nm. Z tohoto hlediska je zatížení v pořádku. [16]

6.4 Zakrytování tiskárny

Zakrytování 3D tiskárny je používáno hned z několika důvodů. Jeden z hlavních důvodů je, aby pracovní prostor měl v celém objemu konstantní teplotu. Při tisknutí čokolády je třeba brát velký zřetel na udržení teploty, protože jakákoliv teplotní změna ovlivní samotné vlastnosti čokolády.

Mezi další důvody zakrytování patří například prevence proti prachu a nečistotami z okolního prostoru. Při tisku by se mohlo stát, že by se prach mohl usadit do samotného tisku, který by byl nakonec nepoživatelný.

Dalším hlavním důvodem je bezpečnost. V tiskárně se nachází pohybující se členy, které mohou při otevřeném prostoru někoho poranit, případně by se mohla poškodit 3D tiskárna.

Před samotnou konstrukcí byl proveden průzkum, jak je nejčastěji zakrytování řešeno. Nejčastěji je použito plexisklo (polymethylmethakrylát nebo polykarbonát), který je připevněn přímo k rámu tiskárny. Je zvykem, že jsou 3 strany tiskárny uzavřeny pomocí šroubového spoje a na přední straně jsou přidělané panty a tato strana slouží jako vstup do pracovního prostoru.

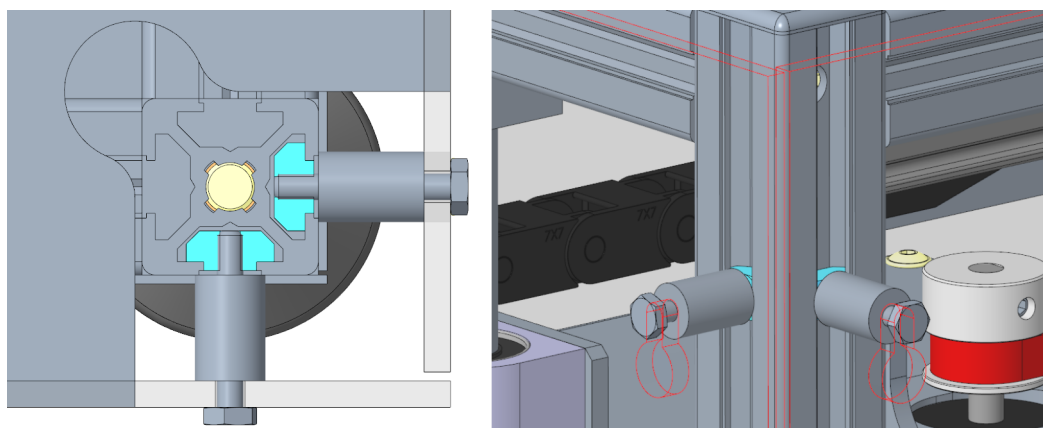
Další běžnou variantou je, že zakrytování je navrženo jako samotná konstrukce, která není přidělaná k rámu tiskárny. Jsou například použity další hliníkové profily, ke kterým se přidělá plexisklo.

Další častou variantou je použití různě tvarovaných plechů, kde jsou mechanické části tiskárny kompletně schovány a přístup je jen na samotnou vyhřívanou podložku.

Při konstrukci byl brán zřetel na to, aby zakrytování bylo finančně nenáročné, transparentní a snadné na výrobu a montáž.

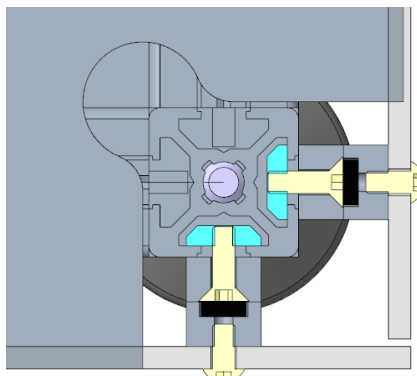
Použití různě tvarovaných plechů by bylo pro jednu 3D tiskárnu velmi finančně a výrobně náročné a nebyl by vidět samotný mechanismus tiskárny. Použití varianty zakrytování jako samostatná konstrukce by vyšla finančně náročněji, ale byla by snazší na výrobu. Varianta, kdy by se plexisklo přidělalo k samotné konstrukci tiskárny, by v tomto případě vyšla nejlevněji, takže byla zvolena jako nejlepší z těchto tří.

Z důvodu častého čištění čerpadla a zasahování do pracovního prostoru je třeba mít snadný přístup alespoň ze dvou stran. První varianta zahrnuje použití T matice a speciálního šroubu, který má závit a osazení pro přidělaní k boku profilu. Dále má šroub zápich, jehož průměr je menší, než vyfrézovaná drážka v polykarbonátové (dále jen PC) desce. Tato deska se nasadí přes hlavu šroubu a drážkou posune dolů. Pro sundání krytu stačí PC desku zvednout nahoru a vysunout (Obr. 43).



Obr. 43 Přidělaní krytu - 1. varianta

Druhá variant zahrnuje použití magnetů, které budou přidělaný na PC desce a při vstupu do pracovního prostoru nebude třeba žádná demontáž. Princip spočívá v tom, že se jeden váleček přidělá pomocí T matice a šroubu s kuželovou hlavou k hliníkovému profilu a druhý váleček se závitem se přidělá k PC desce pomocí šroubu. Do tohoto válečku se přidělá magnet pomocí pryskyřice (Obr. 44).

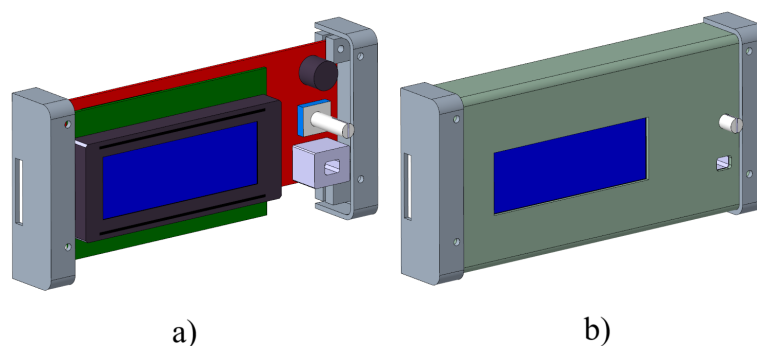


Obr. 44 Přidělaní krytu - 2. varianta

Obě varianty by vyřešily i potřebu offsetu PC desek od hliníkové konstrukce z důvodu překážení krokových motorů pro osu X a Y. Pro zajištění PC desky byl rozšířen plech, který odděluje elektroniku a podepírá tak všechny 4 desky. Pro finální návrh byla vybrána druhá varianta s použitím magnetů.

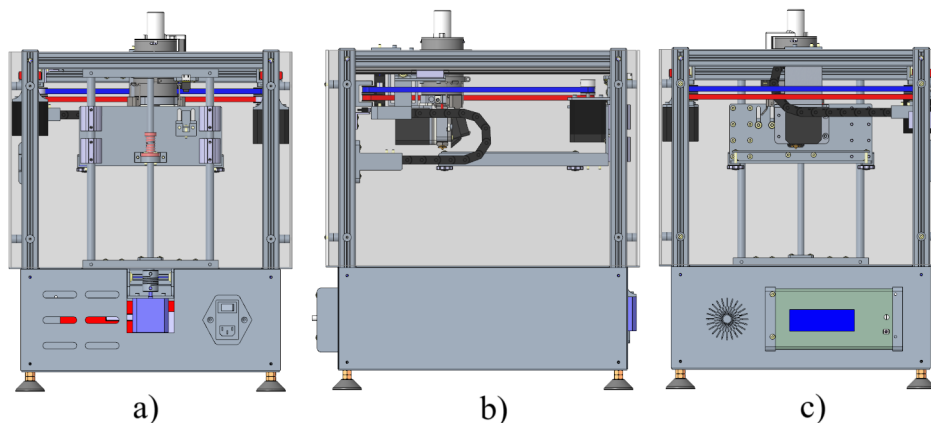
V rámci zakrytování bylo potřeba zakrytovat i spodní část s elektronikou. K tomu byly použity hliníkové plechy o tloušťce 1 mm, který lze vyřezat pomocí laseru v laboratoři. Do těchto plechů budou vyřezány díry pro šrouby, kterými se plechy přidělají k hliníkovým profilům. Do těchto plechů bylo třeba zakomponovat krabičku s LCD displejem a zásuvku pro napájení.

Krabička byla navržena pro LCD displej, který umožňuje zobrazovat 20x4 znaků. Na desce je také umístěn potenciometr, tlačítka a bzučák. Pomocí tlačítka a potenciometru lze ovládat celou tiskárnu. Na desce je také umístěn slot pro SD kartu. Celá krabička je složena z bočních krytů, které jsou navrženy pro výtisk a kryt, který je navržen jako ohnutý plech (Obr. 45).



Obr. 45 Krabička pro řízení a) bez krytu b) s krytem

Pro tuto krabičku byl na přední krycí plech vyříznut otvor, pro odvod kabelů od LCD displeje a byly vyřezány díry pro šrouby, které krabičku přidělají ke krytu. Na stejný plech bylo také vyříznuté logo školy. Na protilehlý plech, kde je pohon pro osu Z, byly vyříznuty drážky, pro přívod vzduchu a lepší odvětrávání. Dále byla na tento plech přidělána zásuvka pro napájení (Obr. 46).

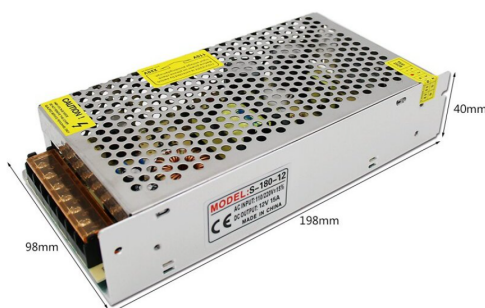


Obr. 46 Zakrytování a) zadní pohled, b) boční pohled, c) přední pohled

6.5 Elektronika

V této kapitole je popsána jednotlivá elektronika využitá na navržené tiskárně. Jak již bylo psáno v předchozích podkapitolách, tiskárna je vybavena několika krokovými motory, topnými tělesy, termistory, servopohonem, chlazením a LCD displejem. Všechny tyto položky je třeba připojit na elektrický zdroj.

Pro tuto tiskárnu byl vybrán 180W zdroj s označením LYONZG S-180-12, který lze napájet vstupním napětím 230 V (Obr. 47). Výstupní napětí tohoto zdroje je 12 V. Tento zdroj má potenciometrický trimr, kterým lze nastavit výstupní napětí. Další specifikace zdroje lze vidět v Tab. 8.

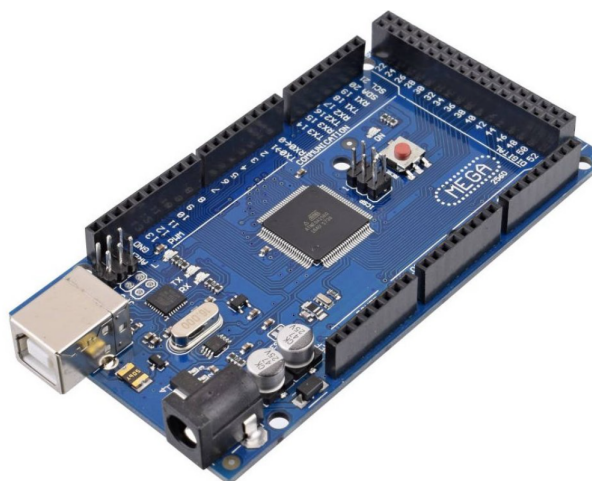


Obr. 47 Použitý zdroj LYONZG S-180-12 [13]

Srdcem tiskárny je řídicí deska Arduino Mega2560 rev3, která disponuje velikou pamětí a vysokým počtem digitálních, PWM a analogových pinů (Obr. 48). Další specifikace této desky lze vidět v Tab. 9.

Tab. 8 Specifikace napájecího zdroje LYONZG S-180-12 [13]

Vstupní napětí:	AC 85-264V 47-63Hz
Výstupní napětí:	12V
Výstupní proud:	15A
Výstupní výkon:	max. 180W
Rozsah provozních teplot:	-20 – 60°C
Rozsah provozní RH relativní vlhosti:	20-90%
Ochrana proti přetížení:	Ano
Ochrana proti zkratu:	Ano
Ochrana proti přehřátí:	Ano
Ochrana proti nadproudu:	Ano
Velikost:	198 x 98 x 40 mm

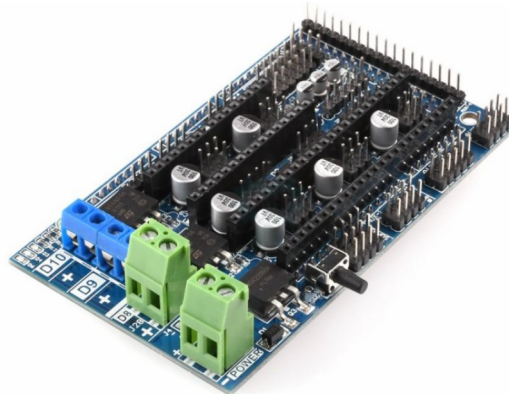
**Obr. 48** Arduino Mega2560 rev3 [12]

Je zvykem, že se k řídicí desce Arduino Mega2560 rev3 připojuje rozšiřující deska RAMPS, která má několik benefitů. Tato deska slouží jako rozhraní mezi Arduinem a motory, senzory, ventilátory a dalšími zařízeními. Je součástí open-source komunity, což znamená, že uživatelé mohou sdílet nápady, vylepšení a problémy. Pořizovací náklady této desky jsou relativně nízké, což umožňuje začínajícím uživatelům vytvářet vlastní 3D tiskárny. K řízení existuje mnoho firmwarů, které jsou speciálně navrženy pro tuto desku. Mezi nejpoužívanější se řadí Marlin, Repetier, SRAMP a mnoho dalších.

V tomto případě byla použita deska Ramps 1.6. Tuto desku není třeba k Arduinu složitě přidělovat. Jednoduše stačí nasadit na piny Arduina. Stejně jako další komponenty stačí připojit do zdírek desky Ramps 1.6. Celou desku je třeba napájet 12 V, čemuž poslouží již zmíněný zdroj.

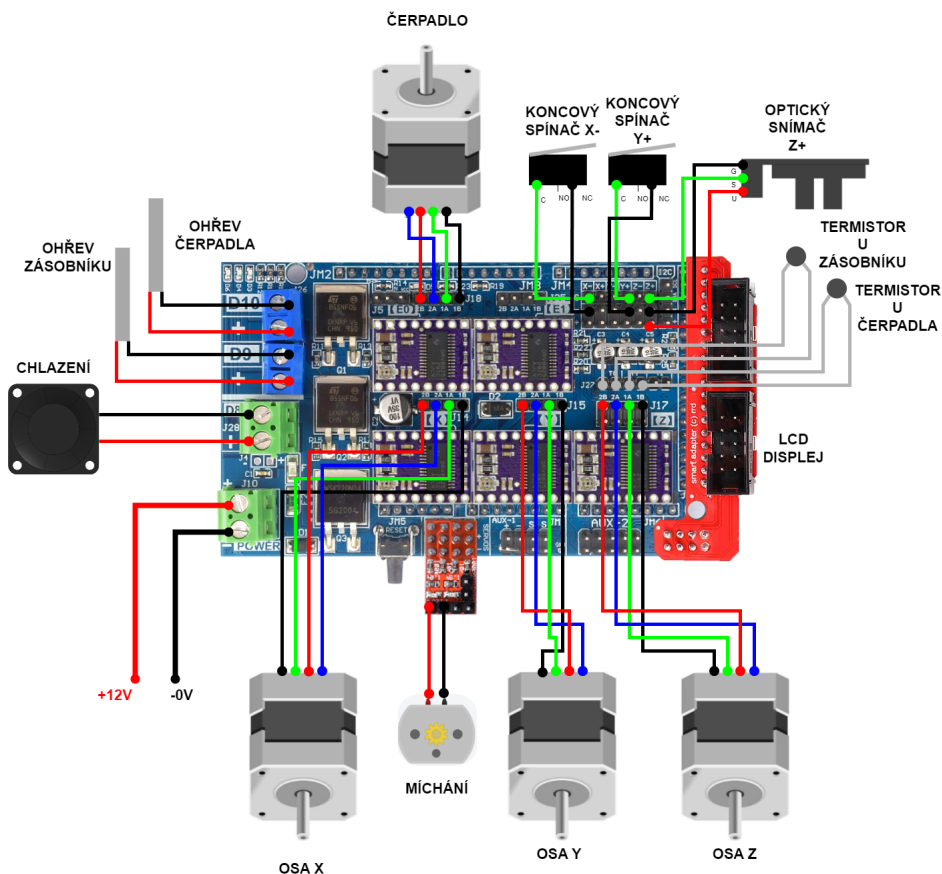
Tab. 9 Specifikace řídicí desky Arduino Mega2560 rev3 [12]

Krystal:	16MHz
Flash:	256kB
SRAM:	8kB
EEPROM:	4kB
USB - Seriál Převodník:	ATmega16U2
Digitální I/O:	54
PWM:	14
Analogové vstupy:	16
DC proud na pin:	40mA
Vstupní napětí:	6-12V doporučeno
5V max. proud:	800mA
3.3V max. proud:	180mA
Váha:	45g



Obr. 49 Reprap Ramps 1.6 [14]

Na desku RAMPS lze připojit až 5 krokových motorů společně s 5 drivery. V tomto případě byly použity drivery s označením DRV8825, které jsou vylepšenou variantou klasických A4988. Pomocí těchto driverů lze nastavit rozlišení kroku až na 1/32.



Obr. 50 Schéma zapojení

6.6 Vedení vodičů

Poslední věc z konstrukce zahrnuje návrh vedení vodičů ke zdroji tiskárny. K tomuto účelu byly použity 2 energetické řetězy, kde jeden je použit pro posuv v ose X a druhý v ose Y. Tyto řetězy lze vidět na Obr. 46 převážně v pohledu b) a c). Pro přidělení řetězů k tiskárně byly navrženy plastové tisknutelné držáky. Jeden držák je přidělaný u hlavy tiskárny, kam se přivedou vodiče od motoru čerpadla, 2 termistorů, 2 topných bloků, ventilátoru a od motoru míchátky.

Druhý držák slouží jako spojka mezi prvním a druhým řetězem a je upevněn ke spodní části držáku řemenic. K tomuto držáku se navíc přivedou vodiče od jednoho koncového spínače pro osu X. Třetí držák je přidělan k rámu tiskárny, ke kterému jsou přivedeny všechny vodiče plus vodič od druhého koncového spínače pro osu Y, který je umístěn přímo na rámu tiskárny. Tyto vodiče jsou dále vedeny podél rámu do spodní části tiskárny, kde je umístěn zdroj.

7 Výroba a stavba 3D tiskárny

V předchozí kapitole byla navržena celá tiskárna podle zadaných parametrů. Z navržených modelů byl vytvořen výkres sestavy tiskárny (viz příloha 3-KSA-S22000240-00-00) a čtyři podsestavy (viz příloha 3-KSA-S22000240-01-00 - posuvná část stolu, 3-KSA-S22000240-02-00 - pevná část stolu, 3-KSA-S22000240-03-00 - řízení, 3-KSA-S22000240-04-00 - hlava tiskárny). Pro díly podsestav byly vytvořeny výkresy, které jsou označeny 4-KSA-S22000240-ČÍSLO.PODSESTAVY-ČÍSLO.DÍLU. Některé díly jsou vyráběny na 3D tiskárně z CAD dat, a proto k nim nejsou vytvořeny výrobní výkresy. Díly převzaté ze zásob katedry opět nemají výkresy vytvořené v rámci této diplomové práce, což se týká například tvaru míchátko.

Tato kapitola je zaměřená na samotnou výrobu a montáž tiskárny. Kapitola je rozdělena do několika podkapitol, kde je uveden stručný popis výroby dílů a následná implementace do celku tiskárny.

7.1 Výroba a stavba rámu

Jako první byl vyroben rám tiskárny, který se skládá z hliníkových profilů. Tyto hliníkové profily byly nařezány na pile a válcovou frézou zarovnaný na rozměry podle Tab. 10. Podrobnější informace lze najít v příloze 3-KSA-S22000240-00-00.

Tab. 10 Délky profilů

ks	popis	délka [mm]
4	svislé profily	375
3	vodorovné - osa x	264
1	podpěrný profil	264
2	vodorovné - osa x	104,5
4	vodorovné - osa y	300
1	držák vedení - osa x	250
Celková délka:		4215

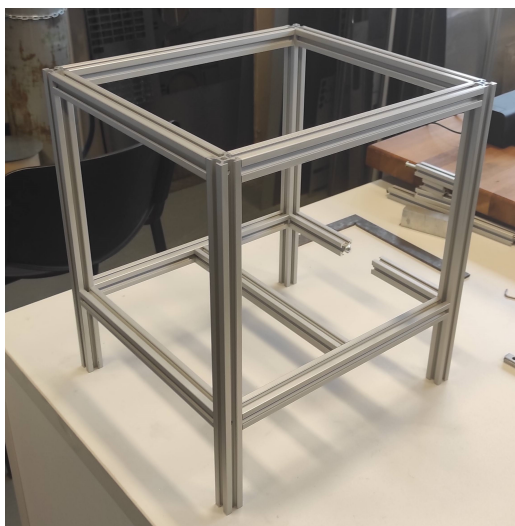
Dále bylo třeba vyvrtat díry na 4 svislých profilech pro možnost utažení šroubů k vodorovným profilům. Díry jsou umístěny 10 mm od jednoho kraje s roztečí 255 mm. Tyto díry byly vyvrtány ve stejné vzdálenosti i na opačné straně.

Ze stejného účelu bylo také potřeba vyvrtat díry na dvou profilech, každý o délce 300 mm. Tyto díry jsou umístěny v polovině profilu, tedy 150 mm od jeho kraje, a slouží k zpřístupnění hlav šroubů, které se následně utahují k podpěrnému profilu.

Dále bylo třeba ve všech profilech, s výjimkou již zmíněných 4 svislých profilů, vyřezat závity do jejich jader. K tomu byly použity závitníky o velikosti M6. K sestavení rámu byly využity šrouby s půlkulatou hlavou (ISO 7380-1) M6x14 ZINEK 10.9. Z tohoto důvodu bylo nezbytné vyřezat závity minimálně do hloubky 14 mm (Obr. 51). Nakonec byly profily složeny podle již zmíněné přílohy (Obr. 52).



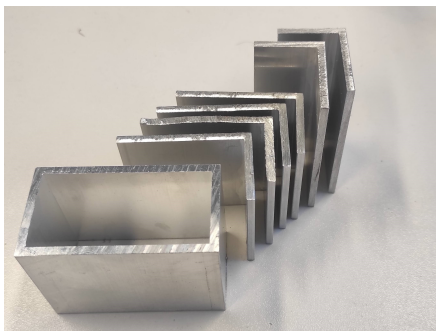
Obr. 51 Řezání závitů v rámu



Obr. 52 Složený rám

7.2 Stavba osy X a Y

V dalším kroku byly nařezány polotovary pro díly skládající osu X a Y. Tyto polotovary se většinou skládaly z L profilů, plochých tyčí nebo obdelníkového profilu. Některé polotovary lze vidět na Obr. 53.

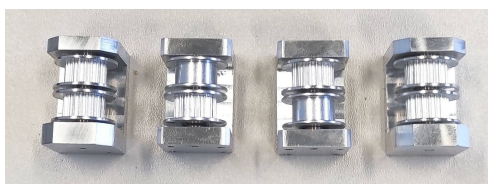


Obr. 53 Polotovary pro osu X a Y

Z důvodu výskytu většího počtu T matic byly vytvořeny nerezové 2 mm vložky, do kterých byly vyříznuty závity. Tyto nerezové vložky byly vytvořeny na laseru, který vyřízl díry s předem určenou roztečí. Laser způsobil, že tyto díry měly tvrdý povrch, takže bylo třeba před vyříznutím závitů díry provrtat vrtákem.

Dále byly vytvořeny programy a díly byly obrobena na CNC strojích (Hermle C 250 U, Mazak Integrex 100-IV, Emco TURN120). Před zakomponováním dílů k rámu tiskárny bylo třeba plochy obroběných dílů začistit brusným kotoučem.

Osa X a Y je také složena z řemenic, které jsou umístěny v držáku (Obr. 54). Bylo třeba mezi tyto řemenice umístit bronzové distanční sloupky, který umožní plynulejší pohyb. Pro tyto distanční sloupky byl vytvořen program a byly obrobena na CNC soustruhu Emco TURN120.

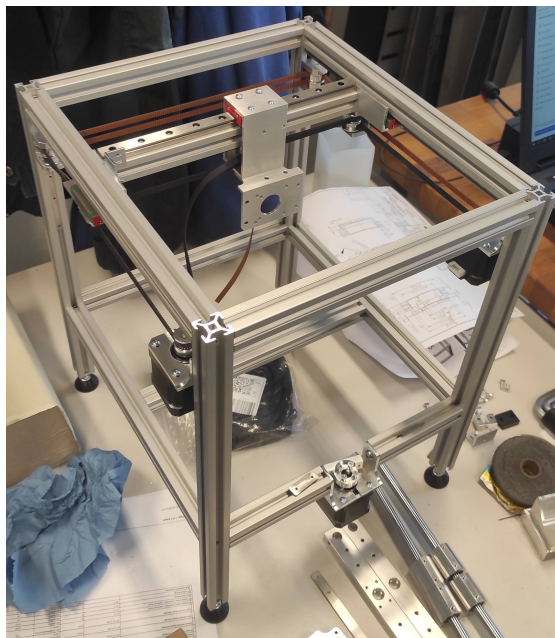


Obr. 54 Řemenice

Po vyrobení všech potřebných komponentů byla provedena montáž. Na hliníkový profil, který slouží jako nosný prvek osy X bylo přiděleno lineární vedení s vozíkem a na něj díl, který nese hlavu tiskárny. Na tento hliníkový profil byly přiděleny L profily, který jsou upevněny k vozíkům lineárního vedení pro osu Y. Tyto vedení bylo třeba vyrovnat tak, aby vozíky jezdily rovnoběžně a nedocházelo tak ke zbytečnému namáhání vozíků.

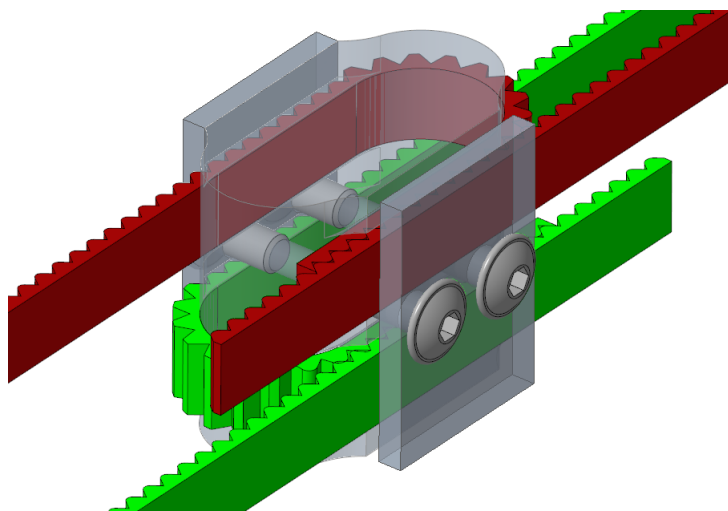
Nakonec byly k rámu tiskárny připevněny držáky řemenic a krokové motory s řemenicemi, které byly vyrovnány tak, aby byly řemenice navzájem v jedné rovině.

Poloha této roviny je určena polohou řemenic, které jsou umístěny na L profilech u vozíků pro osu Y. Na jeden z těchto L profilů byl umístěn držák pro koncový spínač pro osu X. Pro kompletní zhotovení těchto os byly rozvedeny 2 řemeny, které byly připevněny k obdelníkovému hliníkovému profilu pomocí spojky (Obr. 55).



Obr. 55 Tiskárna s přiděláním osy X a Y

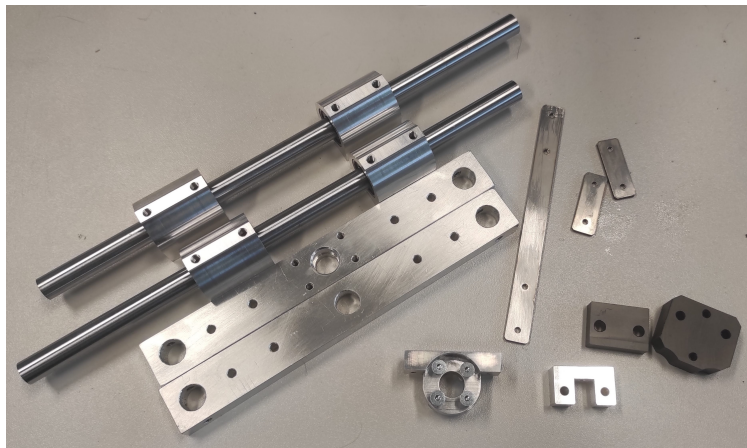
Řemen byl ke spojce připevněn tak, že jeho jeden konec byl veden po obvodu spojky a druhý konec zapadl do zubů prvního konce. Utažení řemene se poté provedlo posunutím o určitý počet zubů vůči koncům a sevřením mezi spojkou a přídržným plechem (Obr. 56).



Obr. 56 Princip utažení řemenů

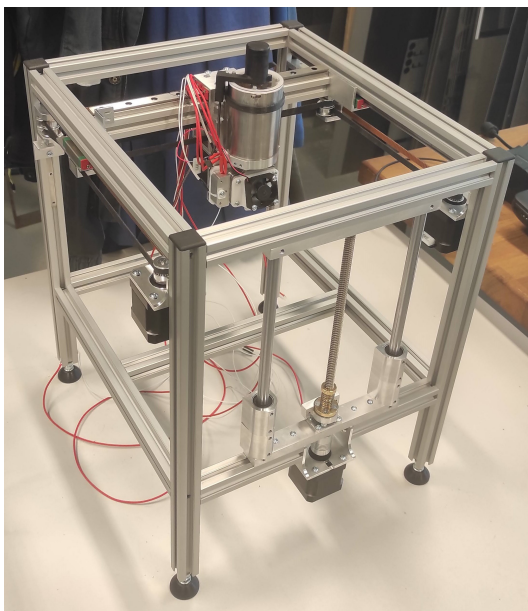
7.3 Stavba osy Z

Osa Z je složena z pevné a posuvné části. Pevná část obsahuje lineární tyče, domky pro lineární ložiska, spodní a dolní domek pro radiální ložiska, závitovou tyč, matici, držák matice, držáky motoru a optický snímač. Některé díly lze vidět na Obr. 57. Domky pro ložiska byly vyrobeny z hliníkových pásů a válcových tyčí.



Obr. 57 Díly pro pevnou část Z osy

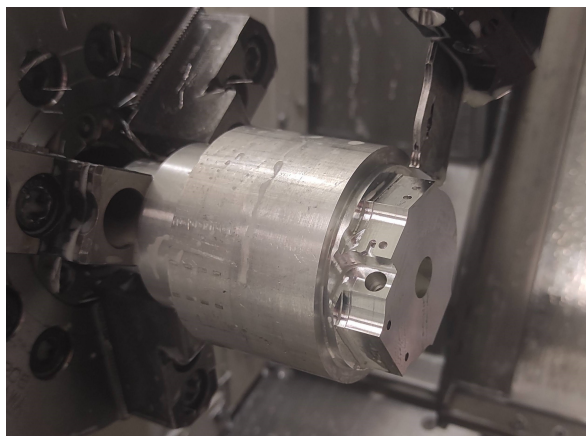
Stavba pevné části osy Z probíhala tak, že se složila samostatně jako podsestavka (viz příloha 3-KSA-S22000240-01-00). Jako celek se následně přidělala k rámu tiskárny. Pro přidělání byly vypáleny nerezové vložky, do kterých se vyřezaly závitové. Tyto domky se vložily do drážek hliníkových profilů a pomocí šroubů se utáhly k rámu tiskárny (viz Obr. 58).



Obr. 58 Tiskárna s připevněnou pevnou částí osy Z

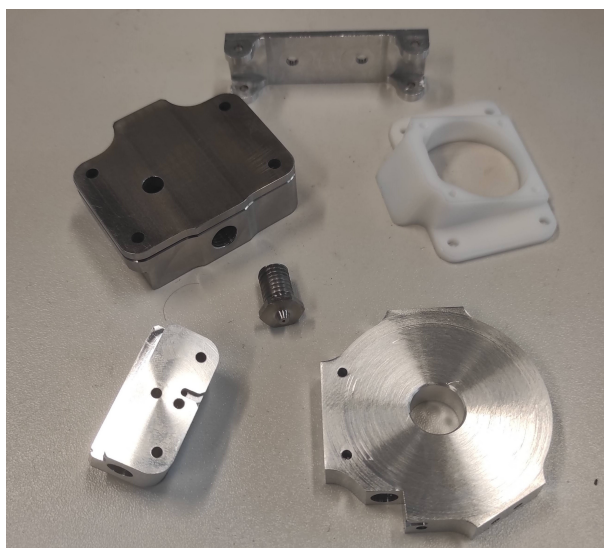
7.4 Výroba a stavba hlavy tiskárny

Hlava tiskárny je složena z mnoha součástí. Nejnáročnější na výrobu byly nerezové součástky, jako je čerpadlo, kryt čerpadla nebo dno zásobníku. Hlava je také složena z hliníkových dílů, které byly snadnější na obrobení. Mezi tyto díly patří např. L profil, obdelníkový profil, topný blok nebo plotýnka (Obr. 59). Některé součástky byly převzaty ze zásob katedry, jako např. míchátko, zásobník na čokoládu, tryska a ozubená kola čerpadla. Ostatní díly byly vypáleny na laseru nebo vytisknuty z plastu na 3D tiskárně.



Obr. 59 Výroba hliníkové plotýnky

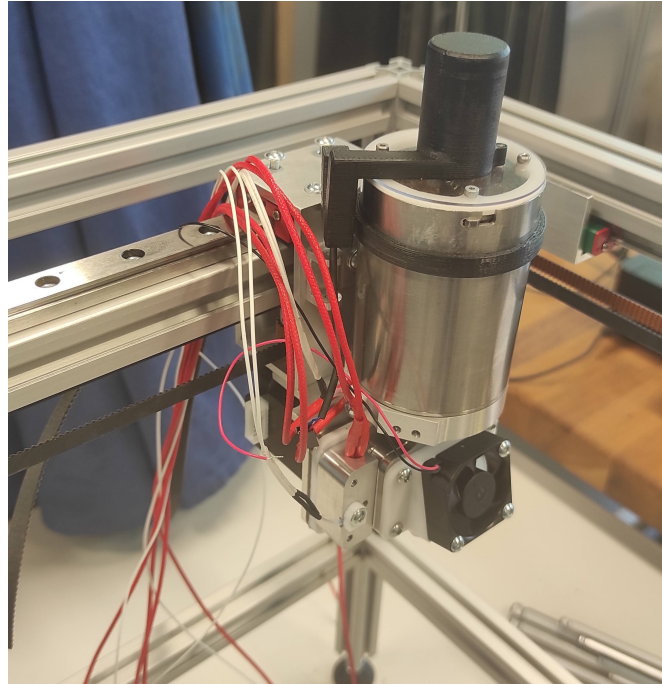
Držák ventilátoru, který je umístěn na přední části krytu čerpadla, byl nejprve navržen tak, aby se mohl vytisknout na 3D tiskárně. Po vyzkoušení na tiskárně v laboratoři se zjistilo, že při čištění hlavy se čokoláda zanesse mezi vytištěné vrstvy a čištění je poté náročnější. Proto byl držák předělán tak, aby se mohl obrobil z POM-C. Tento držák a některé další díly skládající hlavu lze vidět na Obr. 60.



Obr. 60 Výběr dílů skládající hlavu tiskárny

7.5 Závěrečná montáž

Z důvodu velkého množství vyráběných dílů bylo náročné zhotovit všechny díly do odevzdání této diplomové práce. Proto zde byl uveden popis jen těch částí, co se stihly do tohoto termínu vyrobit. Poslední prací na tiskárně před odevzdáním byla montáž tiskové hlavy. Do hlavy se následně umístily termistory a topná tělesa. Složenou hlavu lze vidět na Obr. 61.



Obr. 61 Složená hlava tiskárny

8 Závěr

V diplomové práci byla provedena rešerše existujících tiskáren určených pro 3D tisk čokolády. Tato část práce zahrnuje detailní průzkum trhu v oblasti 3D tisku založené na technologii FFF s použitím čokolády jako tiskového materiálu. Dále byla provedena rešerše na konstrukční uspořádání tiskové hlavy specificky navržené pro tisk čokolády. Další částí práce byl podrobný popis a analýza tiskárny, která je umístěna na Technické univerzitě v Liberci, na Katedře výrobních systémů a automatizace. Tato analýza obsahuje popis jednotlivých komponent tiskárny a poukazuje na její nedostatky zjištěné při delším používání.

Hlavní částí diplomové práce je návrh a popis konstrukce kompaktní 3D tiskárny pro tisk čokolády, která umožňuje vytisknout díly o maximální velikosti 150x150x100 mm. Tato část obsahuje návrh rámu, osy Z, osy X a Y, zakrytování a elektroniky. Tato část obsahuje i návrh hlavy tiskárny, která umožňuje ohřát a extrudovat jakoukoliv čokoládu, která neobsahuje pevné části, jako jsou oříšky, rozinky atd. Při návrhu bylo třeba brát zřetel na výrobní možnosti katedry a snadnou dostupnost jednotlivých dílů. Vzhledem k velkému množství dílů a následně dlouhé výrobě bylo třeba zachovat některé díly ze staré tiskárny, což usnadnilo rychlejší tvorbu programů pro CNC. Model tiskárny má celkovou hmotnost 12,5 kg. Tato hmotnost se však v realitě může lišit z důvodu zjednodušených modelů, jako je třeba krokový motor. Maximální rozměry tiskárny činí 337x388x462 mm.

Z tohoto návrhu byly následně vytvořeny výkresy sestav a výkresy jednotlivých dílů, které bylo potřeba vyrobit. Podle CAD dat, DXF dat a těchto výkresů byla provedena výroba a montáž na půdě Technické univerzity v Liberci. Nejprve byl vyroben rám tiskárny, poté osa X a Y, pevná část osy Z a nakonec hlava tiskárny. Následně byla hlava osazena elektronickými komponenty, jako je krokový motor, termistory, topná tělesa, ventilátor a stejnosměrný motor pro míchání čokolády v zásobníku. Tyto komponenty byly nakonec zapojeny k desce RAMPS 1.6, kterou řídí deska Arduino Mega2560 rev3. Desky jsou napájeny zdrojem o výkonu 180 W o výstupním napětí 12 V.

Z důvodu vytíženosti laboratoře nebyl čas na vytvoření dalších částí tiskárny a nemohl se tak uskutečnit testovací výtisk do termínu odevzdání této práce. Na tiskárně se bude dále pracovat a v nejbližší době i proběhne testování tiskárny.

Seznam obrázků

1	Proces aditivní technologie [3]	13
2	Trysky: a) kalená ocel b) mosaz [25], [24]	14
3	Extruder: a) bowden b) přímý [4]	15
4	a) před konšováním b) po konšováním [9]	16
5	Foodbot S2 a Foodbot D2 [7], [6]	17
6	Wiiibox [29]	19
7	Mycusini 2.0 [2]	19
8	Hlava založená na vytlačování pomocí pístu [11]	22
9	Model hlavy [21]	23
10	Hlava založená na elektrostatického inkoustového tisku [28]	24
11	3D model tiskárny s hlavou pro polymer	25
12	Konfigurace CoreXY [5]	26
13	Tiskárna v laboratoři s hlavou pro čokoládu	27
14	Skeleton model	29
15	Základní rozměry profilu	29
16	Roh před a po použití funkce Basic Joints	30
17	Základní rám tiskárny	30
18	Spoje: a) automatický b) univerzální c) standardní d) úhelník [20]	31
19	Způsob spojení profilu	32
20	Rám s krytkami, stojany a plechy	32
21	Konfigurace tiskáren: a) Kartézská, b) Delta, c) H-Bot	33
22	Osa Z	34
23	Boční pohled s detailem	35
24	Boční pohled na stůl	36
25	Nadefinované okrajové podmínky	36
26	Průhyb stolu pomocí MKP bez mřížky (5x zvětšeno)	37
27	Průhyb stolu pomocí MKP s mřížkou (5x zvětšeno)	37
28	První optimalizace držáku (5x zvětšeno)	38
29	Druhá optimalizace držáku (5x zvětšeno)	38
30	Model druhé varianty stolu	39
31	Nastavení simulace	39
32	Simulace druhé varianty stolu (5x zvětšeno)	40
33	Lineární vedení pro osu X a Y	41
34	Rozvod řemenů	41
35	Pohony X a Y	42
36	Přidělení hlavy ke spojce a k vozíku	43

37	Návrh čerpadla	44
38	Návrh zásobníku	45
39	Kompletní hlava tiskárny	46
40	Teplotní analýza hlavy	47
41	Teplotní analýza v řezu hlavy	47
42	Hmotnost a těžiště hlavy	48
43	Přidělení krytu - 1. varianta	49
44	Přidělení krytu - 2. varianta	50
45	Krabička pro řízení a) bez krytu b) s krytem	50
46	Zakrytování a) zadní pohled, b) boční pohled, c) přední pohled . . .	51
47	Použitý zdroj LYONZG S-180-12 [13]	51
48	Arduino Mega2560 rev3 [12]	52
49	Reprap Ramps 1.6 [14]	53
50	Schéma zapojení	54
51	Řezání závitů v rámu	56
52	Složený rám	56
53	Polotovary pro osu X a Y	57
54	Řemenice	57
55	Tiskárna s přiděláním osy X a Y	58
56	Princip utahení řemenů	58
57	Díly pro pevnou část Z osy	59
58	Tiskárna s připevněnou pevnou částí osy Z	59
59	Výroba hliníkové plotýnky	60
60	Výběr dílů skládající hlavu tiskárny	60
61	Složená hlava tiskárny	61

Seznam tabulek

2	Formy čokolády a jejich body tání [10]	17
3	Specifikace tiskárny FoodBot S2 [7]	18
4	Specifikace tiskárny WiiBoox Sweetin	18
5	Specifikace tiskárny Mycusini 2.0 [2]	20
6	Porovnání vah a deformací držáku stolu	38
7	Porovnání 1. a 2. varianty	40
8	Specifikace napájecího zdroje LYONZG S-180-12 [13]	52
9	Specifikace řídicí desky Arduino Mega2560 rev3 [12]	53
10	Délky profilů	55

Bibliografie

- [1] Norma ČSN EN ISO/ASTM 52900 (011822). *Aditivní výroba - Obecné zásady - Základy a slovník*. In: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [2] 3DPotřeby. *3D tiskárna mycusini® 2.0 - tisk čokolády*. 3dpotreby.cz. URL: <https://www.3dpotreby.cz/3d-tisk-cokolady/3d-tiskarna-mycusini-2-0-tisk-cokolady/> (cit. 07. 03. 2024).
- [3] Harsshit Agrawaal a J.E. Thompson. “Additive Manufacturing (3D Printing) for Analytical Chemistry”. In: *Talanta Open* 3 (2021). ISSN: 2666-8319. DOI: 10.1016/j.talo.2021.100036. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666831921000060>.
- [4] Vivianne Bruère et al. “Under-Extrusion Challenges for Elastic Filaments: The Influence of Moisture on Additive Manufacturing”. In: *Progress in Additive Manufacturing* 7 (čvn. 2022), s. 1–8. DOI: 10.1007/s40964-022-00300-y.
- [5] CoreXY | Cartesian Motion Platform. URL: <https://corexy.com/theory.html> (cit. 22. 01. 2024).
- [6] Foodbot D2 Multi Ingredient Dual Head Food 3D Printer. 3D Printers Online Store. URL: <https://www.3dprintersonlinestore.com/foodbot-d2-food-3d-printer> (cit. 08. 03. 2024).
- [7] Foodbot S2 Multi Ingredient Food 3D Printer. 3D Printers Online Store. URL: <https://www.3dprintersonlinestore.com/foodbot-s2-food-3d-printer> (cit. 25. 11. 2023).
- [8] Andreas GEBHARDT. *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing*. Sv. 2011. Munich: Hanser. ISBN: 978-3-446-42552-1.
- [9] Konšování. In: *Wikipedie*. 11. pros. 2022. URL: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kon%C5%A1ov%C3%A1n%C3%AD&oldid=22205219> (cit. 26. 01. 2024).
- [10] Matthew Lanaro, Mathilde Desselle a Maria Woodruff. “3D Printing Chocolate”. In: led. 2019, s. 151–173. ISBN: 978-0-12-814564-7. DOI: 10.1016/B978-0-12-814564-7.00006-7.
- [11] Matthew Lanaro et al. “3D Printing Complex Chocolate Objects: Platform Design, Optimization and Evaluation”. In: *Journal of Food Engineering* 215 (čvn. 2017). DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029.

- [12] LaskaKit. *LaskaKit Mega2560 rev3 / LaskaKit*. laskakit.cz. 7. zář. 2021. URL: <https://www.laskakit.cz/arduino-mega2560/> (cit. 08. 03. 2024).
- [13] LaskaKit. *LYONZG S-180-12 modulový napájecí 230V AC-DC zdroj 12V/15A 180W / LaskaKit*. laskakit.cz. 7. zář. 2021. URL: <https://www.laskakit.cz/lyonzg-s-180-12-modulovy-napajeci-230v-ac-dc-zdroj-12v-15a-180w/> (cit. 08. 03. 2024).
- [14] LaskaKit. *Reprap 1.6 pro 3D Tiskárny, CNC / LaskaKit*. laskakit.cz. 7. zář. 2021. URL: <https://www.laskakit.cz/reprap-1-6-pro-3d-tiskarny--cnc/> (cit. 08. 03. 2024).
- [15] Atreon-Hutní materiál. *Nerezová ocel jakosti 1.4301/7 (ČSN 17 240) – přehled vlastností*. atreon.cz. URL: <https://www.atreon.cz/jakost-1-4301/> (cit. 16. 03. 2024).
- [16] MGN - Miniaturní Vedení, Úzké - Matis s.r.o. URL: <https://www.matis.cz/cs/produkt/mgn-miniaturni-vedeni-uzke-provedeni> (cit. 13. 03. 2024).
- [17] *O nanovlákních*. NAFIGATE Park. URL: <https://www.nafigatepark.cz/o-nanovlaknech/> (cit. 07. 03. 2024).
- [18] Gufero Rubber Production s. r. o. *Používané materiály - Těsnění*. URL: <https://www.gufero.com/pouzivane-materialy.html> (cit. 04. 04. 2024).
- [19] *Průvodce tryskami 3D tiskárny - Vše o tryskách pro 3D tisk*. 3DJake Česká republika. URL: <https://www.3djake.cz/info/poradce-recenze-a-dalsi/pruvodce-tryskami-3d-tiskarny> (cit. 09. 01. 2024).
- [20] *Příslušenství A | Drážka 8 | Alvaris Profile Systems*. URL: <https://www.alvaris.eu/cz/hlinikovy-konstrukcni-system/prislusenstvi-8/prislusenstvi-drazka-8> (cit. 08. 01. 2024).
- [21] Jan Rychtářech. “Návrh vyměnitelné tiskové hlavy pro 3D tisk z čokolády”. Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2023.
- [22] Avery S. *How to Choose Between a Bowden and Direct Extruder for 3D Printing*. 3Dnatives. 24. srp. 2023. URL: <https://www.3dnatives.com/en/bowden-direct-extruder-3d-printing-250820234/> (cit. 09. 01. 2024).
- [23] Haberkorn s.r.o. *Stavebnicový Systém MB 9 - CZ*. URL: https://www.haberkorn.cz/data/uploads/Download/Katalog/ss-item-mb_9/book_cz_interaktivni/index.html#75 (cit. 04. 12. 2023).
- [24] Sharplayers s.r.o. *MK8 trysky pro tiskárny Creality - Ender/CR a další*. eshop.sharplayers.cz. 1. pros. 2023. URL: <https://eshop.sharplayers.cz/p/mk8-tryska-mosazna-175mm-klon> (cit. 09. 01. 2024).
- [25] Sharplayers s.r.o. *Tvrzená ocelová tryska MK8 pro Creality Ender a další kompatibilní 3D tiskárny*. eshop.sharplayers.cz. 7. lis. 2023. URL: <https://eshop.sharplayers.cz/p/mk8-tryska-nerezova-tvrzena> (cit. 09. 01. 2024).
- [26] TITAN – MULTIPLAST s.r.o. *Polyoxymetylenové materiály, POM-C | Multiplast*. URL: <http://www.multiplast.cz/eshop/pom-materialy-89> (cit. 16. 03. 2024).

- [27] Vyhláška 38/2001 Sb. *Vyhláška o hygienických požadavcích na výrobky určené pro styk s potravinami a pokrmy*. In: *Zákony pro lidi*[online]. AION CS. URL: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-38/zneni-20110501> (cit. 16. 03. 2024).
- [28] Kensuke Takagishi, Yuya Suzuki a Shinjiro Umezu. “The High Precision Drawing Method of Chocolate Utilizing Electrostatic Ink-Jet Printer”. In: *Journal of Food Engineering* 216 (srp. 2017). DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2017.08.017.
- [29] *Wiiboox Sweetin 3D Food Printer/3D Chocolate Printer For Sale - Wiiboox*. URL: <https://www.wiiboox.com/3d-printer-wiiboox-sweetin.php> (cit. 28. 11. 2023).

Přílohy

Výkresová dokumentace

- 3-KSA-S22000240-00-00 - SESTAVA - TISKÁRNA
 - 4-KSA-S22000240-00-01 - DÍL - VALECEK_PRO_MAGNET
 - 4-KSA-S22000240-00-02 - DÍL - DRZAK_MAGNETU
 - 4-KSA-S22000240-00-03 - DÍL - DRZAK_SPINACE_1
 - 4-KSA-S22000240-00-04 - DÍL - DRZAK_SPINACE_2
 - 4-KSA-S22000240-00-05 - DÍL - DRZAK_REMENICE_1
 - 4-KSA-S22000240-00-06 - DÍL - DRZAK_REMENICE_2
 - 4-KSA-S22000240-00-07 - DÍL - R_LISTA
 - 4-KSA-S22000240-00-08 - DÍL - DRZAK_MOTORU_XY
 - 4-KSA-S22000240-00-09 - DÍL - DISTANCNI_SLOUPEK
- 3-KSA-S22000240-01-00 - PODSESTAVA - POSUVNA_CAST_STOLU
 - 4-KSA-S22000240-01-01 - DÍL - DRZAK_NA_MATICI
 - 4-KSA-S22000240-01-02 - DÍL - L_PROFIL_HLAVNI
 - 4-KSA-S22000240-01-03 - DÍL - L_PROFIL_VEDLEJSI
 - 4-KSA-S22000240-01-05 - DÍL - KONCOVY_SPINAC_Z_BLOK
 - 4-KSA-S22000240-01-06 - DÍL - KONCOVY_SPINAC_Z_DRZAK
 - 4-KSA-S22000240-01-07 - DÍL - DRZAK_LIN_VEDENI
 - 4-KSA-S22000240-01-08 - DÍL - STUL
 - 4-KSA-S22000240-01-09 - DÍL - CLONA
- 3-KSA-S22000240-02-00 - PODSESTAVA - PEVNA_CAST_STOLU
 - 4-KSA-S22000240-02-01 - DÍL - TRAPEZOVY_SROUB
 - 4-KSA-S22000240-02-02 - DÍL - DRZAK_OPTICKEHO_SNIMACE
 - 4-KSA-S22000240-02-03 - DÍL - DOLNI_DOMEK
 - 4-KSA-S22000240-02-04 - DÍL - HORNÍ_DOMEK
 - 4-KSA-S22000240-02-05 - DÍL - DRZAK_MOTORU
 - 4-KSA-S22000240-02-06 - DÍL - PRIDRZOVAC_LOZISKA
 - 4-KSA-S22000240-02-07 - DÍL - VYMEZUJICI_KROUZEK
- 3-KSA-S22000240-03-00 - PODSESTAVA - RIZENI
 - 4-KSA-S22000240-03-01 - DÍL - KRYT_KRABICKY
 - 4-KSA-S22000240-03-02 - DÍL - BLOK-TLACITKO
- 3-KSA-S22000240-04-00 - PODSESTAVA - HLAVA TISKÁRNĚ
 - 4-KSA-S22000240-04-01 - DÍL - DRZAK_DRZAKU
 - 4-KSA-S22000240-04-02 - DÍL - DRZAK_MOTORU_EXTRUDER

4-KSA-S22000240-04-03 - DÍL - HLINIKOVA_PLOTYNKA
4-KSA-S22000240-04-04 - DÍL - KRYTKA_CERPADLA
4-KSA-S22000240-04-05 - DÍL - TOPNY_BLOK
4-KSA-S22000240-04-06 - DÍL - CERPADLO
4-KSA-S22000240-04-07 - DÍL - OBDELNIK_PROFIL
4-KSA-S22000240-04-08 - DÍL - PAKOVY_UZAVER_1
4-KSA-S22000240-04-09 - DÍL - PAKOVY_UZAVER_2
4-KSA-S22000240-04-10 - DÍL - PAKOVY_UZAVER_3
4-KSA-S22000240-04-12 - DÍL - PRIDRZNY_PLECH
4-KSA-S22000240-04-13 - DÍL - SPOJKA_REMENU
4-KSA-S22000240-04-14 - DÍL - TVAROVY_VYPALEK
4-KSA-S22000240-04-15 - DÍL - DNO_PRO_ZASOBNIK
4-KSA-S22000240-04-16 - DÍL - SPODNI_OBJIMKA
4-KSA-S22000240-04-17 - DÍL - TEFLONOVA_PODLOZKA

CAD data, DXF a STL soubory

KOMPAKTNI_TISKARNA_ASM.STEP
HLAVA_TISKARNY_ASM.STEP
PEVNA_CAST_STOLU_ASM.STEP
POSUVNA_CAST_STOLU_ASM.STEP
RIZENI_ASM.STEP
NEREZOVA_VLOZKA_1.DXF
NEREZOVA_VLOZKA_2.DXF
NEREZOVA_VLOZKA_3.DXF
NEREZOVA_VLOZKA_4.DXF
NEREZOVA_VLOZKA_5.DXF
NEREZOVA_VLOZKA_6.DXF
NEREZOVA_VLOZKA_7.DXF
PAKOVY_UZAVER_1.DXF
PAKOVY_UZAVER_2.DXF
SPODNI_OBJIMKA.DXF
STUL.DXF
TVAROVY_VYPALEK.DXF
ZAKLADNI_DESKA.DXF
KRYT_KRABICKY.DXF
KRYCI_PLECH.DXF
BOCNI_KRYCI_PLECH_1.DXF
BOCNI_KRYCI_PLECH_2.DXF
BOCNI_KRYCI_PLECH_3.DXF
BOK_KRABICKA.STL
BOK_KRABICKA_2.STL
DRZAK_1.STL
DRZAK_2.STL

DRZAK_3.STL
DRZAK_RETEZU_1.STL
DRZAK_RETEZU_2.STL
DRZAK_RETEZU_3.STL
MADLO.STL
KOLECKO_PODLOZKY.STL