

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroniky a informačních technologií

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
Návrh extruderu pro 3D tisk keramických materiálů

Autor práce: Bc. Radek Spurný  
Vedoucí práce: Ing. Karel Slobodník Ph.D.

---

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Radek SPURNÝ</b>
Osobní číslo:	<b>E21N0043P</b>
Studijní program:	<b>N0714A060013 Elektronika a informační technologie</b>
Specializace:	<b>Elektronika</b>
Téma práce:	<b>Návrh extruderu pro 3D tisk keramických materiálů</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra elektroniky a informačních technologií</b>

## Zásady pro vypracování

1. Zpracujte rešerši zaměřenou na problematiku 3D tisku keramických materiálů.
2. Vytvořte kompletní konstrukční návrh extruderu pro 3D tisk keramických materiálů.
3. Vytvořte počítačový model navrženého extruderu a proveďte jeho optimalizaci.
4. Navržený extruder zkonstruujte a proveďte základní ověření jeho funkce.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. KIM Namsoo Peter, CHO Diana, ZIELEWSKI Mathew. Optimization of 3D printing parameters of Screw Type Extrusion (STE) for ceramics using the Taguchi method, Ceramics International 45 (2019) 2351–2360.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Karel Slobodník, Ph.D.**  
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



L.S.

---

**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



---

**Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací vývoje extruderu pro tisk keramických materiálů. Práce popisuje způsob zpracování keramický materiálů, dále zkoumá již dostupné provedení extruderů a zhodnocuje jejich vlastnosti. Poté charakterizuje experimentální vývoj samotného extruderu, rozděleného na část mechanicky vytlačovaného zásobníku a způsob podávání materiálu do tiskové hlavy osazené šnekovým dopravníkem. Cílem práce je předvést navržený extrudér a ověřit jeho funkci.

## **Klíčová slova**

3D tisk, keramika, extruze, extruder, konstrukce, analýza sil, simulace zatížení, optimalizace hmotnosti, reologie, Autodesk Fusion 360

## **Abstract**

This master thesis pursue design and development of extruder for printing ceramic materials. Thesis describes the way how ceramic materials are processed, furthermore examines already developed extruders and evaluates their properties. As next thesis portrays experimental development of extruder, divided into mechanically extruded stack and way of delivering material into print head fitted with screw conveyor. Target of this thesis is to demonstrate designed extruder and verify it's functionality.

## **Key Words**

3D printing, ceramics, extrusion, extruder, construction, force analysis, stress simulation, weight optimization, rheology, Autodesk Fusion 360

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této diplomové práce je legální.



## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Slobodníkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a jeho metodické vedení této práce, ochotu to se mnou nevzdat a silnou podporu při studiu.

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Technologie 3D tisku .....	- 2 -
1.1 Aditivní výroba .....	- 2 -
1.1.1 FDM / FFF - Fused Deposition Modeling/Fused filament fabrication .....	- 3 -
1.1.2 SLA - Stereolitografie .....	- 4 -
1.1.3 SLS – Selective Laser Sintering .....	- 4 -
1.1.4 BJ - Binder Jetting .....	- 4 -
1.1.5 IJ - InkJet .....	- 4 -
1.1.6 LMF - Laser Metal Fusion .....	- 5 -
1.1.7 LDM – Liquid Deposition Modeling .....	- 5 -
1.1.8 RFP - Rapid Freeze Prototyping.....	- 5 -
2 Keramické materiály.....	- 6 -
2.1 Tradiční výroba keramických výrobků.....	- 6 -
2.2 Vypalování keramiky.....	- 6 -
2.3 Keramika v elektrotechnice .....	- 8 -
3 3D tisk keramických materiálů.....	- 11 -
3.1 Provedení extruderů.....	- 13 -
3.1.1 Provedení zásobníku uvnitř konstrukce.....	- 13 -
3.1.2 Provedení zásobníku mimo konstrukci .....	- 14 -
3.1.3 Systém vytlačení zásobníku .....	- 15 -
3.2 Materiál pro tisk.....	- 16 -
3.2.1 Hmotnost .....	- 16 -
3.2.2 Spike Test .....	- 17 -
3.2.3 Test s použitím stříkačky.....	- 17 -
3.2.4 Tlakový test .....	- 17 -
4 Extruder .....	- 18 -
4.1 Výběr typu .....	- 18 -
4.2 Stanovení vlastností zásobníku .....	- 18 -
4.3 Konstrukce a návrh modelů zásobníku.....	- 20 -



5	Tisková hlava.....	- 32 -
5.1	Stanovení vlastností tiskové hlavy.....	- 32 -
5.2	Konstrukce a návrh modelů tiskové hlavy.....	- 32 -
6	Experimentální ověření.....	- 39 -
6.1	Tiskárna pro ověření .....	- 39 -
6.2	Použitý materiál .....	- 39 -
6.3	Popis chování materiálu v soustavě .....	- 41 -
6.4	Stanovení poměru rychlostí motorů.....	- 41 -
6.5	Tisk .....	- 42 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 44 -
7	Literatura .....	- 45 -
	Přílohy .....	- 48 -

## Seznam symbolů a zkratk

### Obecné

$V_{VÁLEC}$	$m^3$	objem zásobníku
$V_{ŠNEK}$	$m^3$	objem vedení šnekovnice
$V_{MATERIÁL}$	$m^3$	objem materiálu
$r$	$m$	poloměr
$d$	$m$	průměr zásobníku
$d_{\dot{s}}$	$m$	průměr šnekovnice
$d_{MAX}$	$m$	maximální velikost zrna dopravovaného materiálu
$h$	$m$	stoupání šnekovnice
$\omega$	$rad/s$	úhlová rychlost motoru
$n$	$ot/s$	otáčky motoru tiskové hlavy
$n_{KRIT}$	$ot/s$	kritické otáčky motoru tiskové hlavy
$g$	$m/s^2$	gravitační zrychlení
$m$	$kg$	hmotnost materiálu
$m_1$	$kg$	hmotnost suchého samo tvrdnoucího materiálu
$m_2$	$kg$	hmotnost suchého keramického materiálu
$m_C$	$kg$	celková hmotnost po promíchání
$M$	$N \cdot m$	moment síly
$M_1$	$N \cdot m$	moment síly hnacího kola
$M_2$	$N \cdot m$	moment síly hnaného kola
$F$	$N$	síla
$F_L$	$N$	síla působící zátěží na závit
$F_T$	$N$	síla třecí mezi závitem šroubu a matice
$F_R$	$N$	síla potřebná pro otočení šroubu
$F_{\dot{s}M}$	$N$	síla skutečná působící n trapézový šroub
$F_{AX}$	$N$	síla axiální působící motorem
$P$	$Pa$	tlak
$S_{PIST}$	$m^2$	výtlačná plocha pístu
$S_{VÁLEC}$	$m^2$	plocha podstavy válcového zásobníku
$\alpha$	$^\circ$	polovina úhlu stoupání trapézového šroubu
$f$		koeficient tření
$d_2$	$m$	střední průměr trapézového šroubu

<i>N</i>	N	normálová síla
<i>p</i>	m	stoupání trapézového šroubu
<i>i</i>		převodový poměr
<i>z</i>		počet zubů ozubeného kola
<i>FDM</i>		Fused Deposition Modeling
<i>FFF</i>		Fused filament fabrication
<i>SLA</i>		Stereolitografie
<i>SLS</i>		Selective Laser Sintering
<i>BJ</i>		Binder Jetting
<i>IJ</i>		InkJet
<i>CIJ</i>		Continuos ink jetting
<i>DOD</i>		Drop On Demand
<i>LMF</i>		Laser Metal Fusion
<i>LDM</i>		Liquid Deposition Modeling
<i>RFP</i>		Rapid Freeze Prototyping
<i>PET</i>		polyethylen tereftalát
<i>PET-G</i>		polyethylen tereftalát glycol
<i>SW</i>		software

## Úvod

Předkládaná práce se zaměřuje na problematiku 3D tisku keramických materiálů. Dané téma je řešeno z důvodu urychlujícího se vývoje 3D tisku a dostupných materiálů, které se dají tisknout. Úkolem této práce je návrh extruderu 3D tiskárny pro vytvoření keramických objektů naskenovaných nebo navrhnutých v počítačových programech pro modelování. Doposud byly zkoumány metody šroubového výtlačného systému a pístového výtlačného systému ať už za pomoci pneumaticky hnaného pístu a nebo mechanické varianty s použitím motoru. V práci se čerpá jak ze zahraničních, tak z tuzemských zdrojů jak pro průzkum provedení dostupných extruderů na trhu, tak pro stanovení teoretických předpokladů chování materiálu. Diplomová práce zejména odpovídá na otázky, zdali je mechanické provedení extruderu schopné kontinuálního tisku materiálu, jakých rozměrů by měl extruder dosahovat, optimální zasunutí šnekovnice v tiskové hlavě, vliv velikosti hloubky závitů a v neposlední řadě prověřit funkci tisku s vytištěnou šnekovnicí. Při návrhu extruderu byl využit program Autodesk Fusion 360 spolu s jeho simulačními možnostmi. Pro ověření funkčnosti extruderu je důležité stanovit si sekundární cíle, které se týkají tisknutelného materiálu. Těmi jsou: zjistit, jaký je optimální poměr hlíny a vody a pokusit se normalizovat zjištěnou hodnotu. Metodika práce spočívala ve variačním řešení širokého spektra modelů z důvodu obsáhlosti daného tématu a jeho komplikovanosti z materiálového pohledu. Závěrem práce je zkonstruování a praktické ověření funkčnosti extruderu při použití požadovaného materiálu pro extruzi.

# 1 Technologie 3D tisku

Odvětví 3D tisku se posouvá kupředu každý den. Spolu se stále rychlejším tempem růstu civilizace se tedy nelze divit přicházejícím požadavkům na zjednodušení, zrychlení, zlevnění a uděláním více a více základních věcí dostupnějšími. V poslední době se 3D tisk hojně vyvíjí v oblasti lékařství pro výrobu protéz, dlah a přesně namodelovaných orgánů pro trénování operací. Dalším rychle se rozvíjejícím odvětvím 3D tisku je výroba domů a jiných betonových staveb, například vojenských bunkrů a opevnění [1].

## 1.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba je proces zaměřený na postupném přidávání materiálu za účelem vytvoření dané struktury, objektu. Druh této výroby využívá nanášení materiálu ve vrstvách, různě vysokých, kdy při jejich vhodném nastavení lze ovlivnit pevnost výrobku, jeho celkovou hmotnost i rychlost výroby [2].

Opakem aditivní metody je metoda subtraktivní. Tato metoda spočívá v postupném opracovávání materiálů většího vstupu. Obráběním získáváme požadovaný výstup, často je ale nutné kvůli náročnosti designu požadavek složit z více opracovaných částí, jelikož se výrobek nedá možnými subtraktivními metodami vyrobit jako jeden celek [2].

V současné době je jednou z nejvíce rozšířených metod aditivní výroby 3D tisk ve svých nejrůznějších podobách od tisku plastů, přes kovy až po tisk jídla.

Mezi největší výhody aditivní výroby se tedy řadí úspora materiálu a možnost vytvářet struktury celků, které nelze jednoduše vyrobit konvenčními obráběcími metodami. Mezi geometrické útvary poté například patří vytváření kanálů uvnitř těles, vytváření dutých těles jako jednolitých celků nebo tisk složitých útvarů bez nutnosti využití podpor.



Obr. 1: Vytisknuté korálové útesy [3].

Že 3D tisk pomáhá světu se můžeme přesvědčit pohledem na vytisknuté korálové útesy. Ty slouží pro udržování rovnováhy ekosystému jako náhrady za poškozené korálové útesy tím, že poskytují mořským organismům jako jsou ryby nebo korálové polypy, možnost úkrytu a dalšího růstu.



Obr. 2: Ukázka vytisknuté struktury kovového výrobku [4].

Mezi nevýhody se v některých případech řadí rychlost výroby, kdy tisková hlava musí nanášet tenké vrstvy a tím se prodlužuje doba zhotovení produktu. Dále je to anizotropie výsledného obrobku, kdy materiál vykazuje různé mechanické vlastnosti v souvislosti na volbě orientace směru výtisku a jeho následném namáhání.

### 1.1.1 FDM / FFF - Fused Deposition Modeling/Fused filament fabrication

Technologie FDM je synonymem pro FFF, obě znamenají extruzi roztaveného materiálu z tiskové hlavy. Materiál je přiváděn ve formě filamentu, který se ohřeje na teplotu tání a je následně vytlačen na tiskovou podložku kde postupně chladne a vrací se zpět do pevného skupenství. Extrudovaný materiál je polymer s různými přísadami, které buďto upravují jeho mechanické či fyzikální vlastnosti, anebo jsou speciálně vytvořené pro dodání unikátního vzhledu. Příklad jednoho z nejpoužívanějších materiálů je PLA – polylactic acid.

Tento materiál je vytvořen z kukuřičného škrobu a využívá se pro jednoduchost tisku a své mechanické vlastnosti. Jeho nevýhodou je pohlcování vlhkosti. Jako příklad upraveného materiálu je možno uvést materiál WOOD, což je defacto klasické PLA s částicemi dřeva. Výtisk se poté jeví jako dřevo, tudíž je ho možné i obrábět stejnými způsoby. Jeho postupným vrstvením je tvořen požadovaný výrobek [5].

### **1.1.2 SLA - Stereolitografie**

SLA je výrobní metoda, kdy jsou postupně světlem vytvrzovány jednotlivé vrstvy světlocitlivé pryskyřice, většinou za pomoci UV. Daný materiál se označuje jako resin. Tato technologie je v porovnání s FDM přesnější a rychlejší, jelikož dokáže při tisku osvítit celou tiskovou plochu najednou, ovšem značnou nevýhodou je toxicita pryskyřice a nutnost následný výtisk očistit a vytvrdit [5].

### **1.1.3 SLS – Selective Laser Sintering**

Technologie SLS se nejčastěji využívá pro spékání kovu, respektive jemného kovového prášku, který je rozprostřen po tiskové ploše [5].

### **1.1.4 BJ - Binder Jetting**

Binder Jetting je obdobou SLS, kdy se k vytvrzení jednotlivých vrstev nepoužívá laser ale kapalina, která slouží jako pojivo mezi vrstvami. Jednou z předností tisku za pomoci práškových struktur je možnost vynechání podpor. Oproti SLS probíhá tisk bez ohřevu, není tudíž nutné nijak vyčkat na ochlazení a zároveň nedochází ke kroucení vytisknutých modelů [6].

### **1.1.5 IJ - InkJet**

Tisk pomocí InkJettingu spočívá v nanášení kapek materiálu na substrát za pomoci přesného podávacího systému, tento materiál může být i resin. Následně dochází k vytvrzení kapek za pomoci UV světla. V současné době se využívají dva hlavní druhy. CIJ, neboli nepřetržité dávkování, se odvíjí z tryskání toku resinu. Jakmile resin opustí trysku, dojde k jeho rozpadu na kapky a dle požadované matice dojde k přenesení vzoru na materiál. Druhou variantou je DOD, neboli Drop-On-Demand. U tohoto způsobu tisku se nepoužívá žádná matice ale dochází k nanášení materiálu do místa pouze tehdy, pokud je tisková hlava přesně na stanoveném místě tisku. [7].

### **1.1.6 LMF - Laser Metal Fusion**

Tato metoda je obdobou metody SLS. Ovšem při využití metody SLS máme prášek zahřátý pod bod tání v celém objemu a laserový paprsek tudíž nemusí být tak výkonný, jelikož musí dodat pouze malé procento energie pro dosažení teploty tání. Naproti tomu LMF nevyužívá celobjemového ohřevu pro dosažení teploty tání, ale využívá laserový paprsek a ohřívá nanesený prášek pouze v místech modelovaných.

### **1.1.7 LDM – Liquid Deposition Modeling**

Technologie vytlačení tekuté směsi používaná firmou WASP pro tisk keramických materiálů a jim podobných. Konkrétně u této firmy je extruze založena na pneumatickém výtlačném systému, který posílá materiál ze zásobníku do výtlačné trysky [8].

### **1.1.8 RFP - Rapid Freeze Prototyping**

Princip této metody spočívá v ekologicky přívětivém vytváření prototypů. Selektivním nanášením a mražením vody a nebo jiné kapaliny vrstvu po vrstvě dochází k přechodu mezi kapalným a pevným skupenstvím. Vytisknutý prototyp se po využití nechá jednoduše rozpustit a kapalinu lze opět využít [9].



## 2 Keramické materiály

Materiálem, pro který je navržen extruder této práce je keramická hlína. Ta se řadí mezi lidstvem první zpracovávané materiály. Hlavním důvodem tvorby bylo uchovávání potravin. Mezi první metody výroby keramiky patří smíchání vody s hlinou a následným vypálením zhotoveného výrobku na slunci. Teprve postupem doby docházelo k vypalování předmětů v pecích a dalším postprocessingovým úpravám.

### 2.1 Tradiční výroba keramických výrobků

Výroba keramiky se skládá z určitých fází, kterými si výrobek musí projít, než je připraven ke svému účelu. Pro výrobu keramiky se dá využít většina dostupné hlíny od jílovitých po zrnité. Po přípravě materiálu dojde k odstranění vzduchových bublin, ty zhoršují vlastnosti dané hlíny. Následuje vymodelování chtěného tvaru. Ve fázi sušení dochází k vysychání vody z materiálu, která byla přidána za účelem lepšího opracování. Vysušením je přípravek připraven k vytvrzování v peci. Pokud se zanedbá odstranění vzduchových bublin, může dojít k praskání těchto vzduchových bublin ve vytvarované struktuře a tím k celkovému zničení výrobku. Výrobek se vypaluje v pecích a teplota závisí na použitém materiálu, pohybuje se od 600 až do 1350 °C. Následně existuje možnost přidání glazury jako povrchové ochrany.



Obr. 3: Příklad vypalování keramiky [10].

### 2.2 Vypalování keramiky

Vypalování keramiky je závislé jak na složení a obsahu jednotlivých materiálů daného výrobku, tak na jeho rychlosti. Jelikož se každá látka vypaluje při jiné teplotě a mezi

jednotlivými složkami dochází k vzájemným reakcím, tak jsme zároveň schopni vypalováním ovlivnit konečné fyzikální, chemické i vizuální vlastnosti daného výrobku [11].

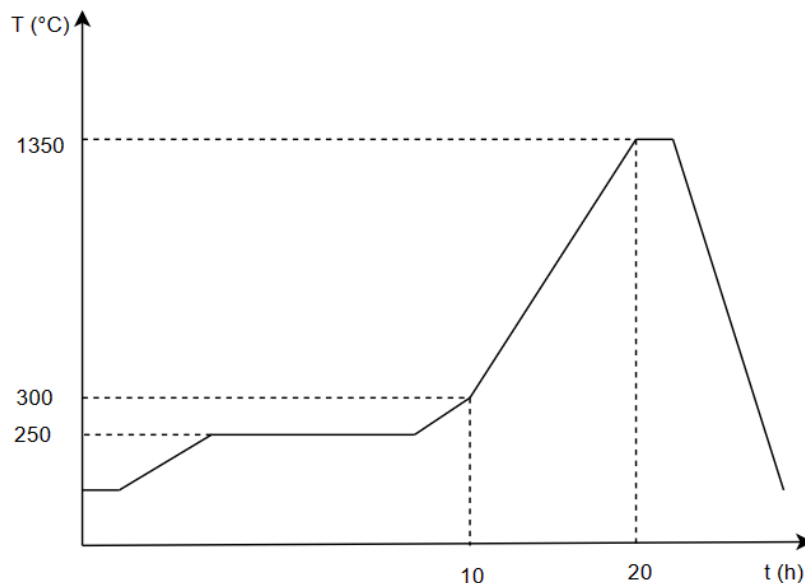


Obr. 4 Keramické výrobky v peci před výpalem [11].

Celkový výpal keramiky probíhá, jak bylo zmíněno v kapitole 2.1, po vysušení vytvarovaného objektu. Ve výrobku zůstává nízký obsah vlhkosti, tzv. kapilární vody. Prvním krokem vypařování je zahřátí výrobku přibližně na teplotu 300 °C a důkladné vypaření zbytkové vody. Při výpalu vzniká pára a pokud kapilární voda dosahuje dostatečného objemu, tak vzniklá pára vyvine dostatečný tlak, aby došlo k jejímu úniku explozí a tím k destrukci výrobku. Důležitým aspektem je i rychlost stoupaní teploty. Ta se odvíjí od velikosti, pórovitosti (rozložené dutiny, otvory, kapsy) výrobku a zároveň jeho schopnosti zadržovat vodní páru. Menší a více pórovité produkty jsou schopny odolat rychlejším změnám teplot než větší kusy [11].

Následuje druhý stupeň výpalu a to při teplotě mezi 400 až 700 °C. V tomto kroku dochází k úniku chemicky vázané vody, čímž se zlepší pórovitost. Po odstranění této vody ze struktury výrobku už není možné ji jakkoliv zpětně navrátit, dochází tedy k nevratnému ději.

V rozmezí od 400 do 1000 °C dále dochází k vyhořívání uhlíku a organických příměsí, rozkladu síranu, uhličitanů a dalších oxidů [11].



Obr. 5 Teoretický předpoklad průběhu teploty vypalování keramiky [12].

U teplot nad 1000 °C dochází k zásadnímu snížení pórovitosti, to má za následek uzavírání pórů a snižování izolační schopnosti, zároveň ale dochází ke zvýšení pevnosti výrobku. Konečná teplota vypalování se ale odvíjí od druhu hmoty a požadavků na pevnost a pórovitost. Dosavadní výpal bývá nazýván přežah, po něm přijde na řadu ostrý výpal, neboli dožah. Ten dosahuje teplot okolo 1350 °C a dochází při něm k rozkladu oxidů. Jedním z těchto oxidů je oxid manganu, ten při svém rozkladu prudce uvolňuje kyslík, ten může být důvodem vad na povrchu výrobku. Finální teplotu výpalu je nutno zachovat po dobu prohřátí celého výrobku. Po dokončení výpalu dochází k pozvolnému chladnutí za doprovodu přirozeně proudícího vzduchu [11].

### 2.3 Keramika v elektrotechnice

V elektrotechnice jsou na keramické materiály kladeny určité chemické a fyzikální požadavky, které jsou nezbytné pro funkci daných součástek. Aby bylo možné splnit tyto požadavky a dosáhnout určitých vlastností, je nutné znát co nejpřesněji složení materiálu a zároveň nečistot, které mohou mít negativní vliv na parametry výsledného výrobku.

V první řadě tedy dojde k homogenizaci vstupních surovin, při které jsou důkladně promíchány vstupní materiály. Dále následuje kalcinace, při které dochází k odloučení plynu od tuhé látky. Kalcinační teplota musí být dostatečně vysoká, aby došlo k reakci v pevné

fázi, ale zároveň ne ke spečení materiálu. Kalcinační reakce jsou relativně pomalé a tudíž je nutno držet tuto teplotu delší dobu. Následným mletím jsou vytvořeny částice materiálu o velikosti jednotek mikronů, které se zpracovávají v souvislosti s využitím daného výrobku. Pro většinu se ale nejčastěji používá metoda suchého lisování, kdy dochází k sušení rozstříknutých kapének lisovacího granulátu smíchaných s vodou v horkém vzduchu. Dále se používá extruze, izostatické lisování, lití fólií nebo vstřikované lití. Finálních vlastností se dosáhne výpalem, při kterém je požadováno získat hutnou slinutou keramiku [13].

Keramika se v elektrotechnice hojně využívá k výrobě izolátorů. Mezi požadavky na izolátory v tomto odvětví se řadí mechanická a elektrická pevnost, odolnost proti povětrnostním vlivům a jejich chemická odolnost. Předními materiály pro výrobu izolátorů je kaolín, oxid křemičitý a hlinitý, ze kterých vzniká tvrdý a korundový porcelán. Nepostradatelným procesem je při výrobě izolátorů glazování [13].



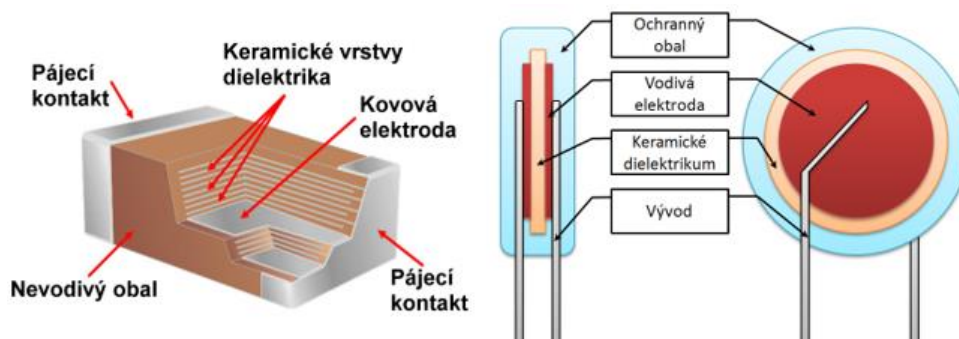
Obr. 6: Ukázka keramického izolátoru [14].

Oxidová keramika se využívá pro své žáruvzdorné, mechanické pevnostní, teplotní a vysokofrekvenční vlastnosti.

Elektricky vodivou keramiku využíváme pro výrobu keramických pouzder, topných článků, teplotně závislých rezistorů, napětově závislých rezistorů, senzorů a supravodičů. Z předních keramických směsí se vyjímá karbid křemíku. Jedná se o polovodič, který je využíván zejména pro jeho tepelnou vodivost, velikost průrazného elektrického pole a velkou šířku zakázaného pásma. Jeho široké zakázané energetické pásmo a nízká koncentrace vlastních nosičů náboje přináší možnost pracovat ve vyšší pracovní teplotě, než je tomu u čistého křemíku. Ovšem při dosažení určité teploty dojde k nekontrolovatelnému převýšení vlastních nosičů dotované směsi. Vlastní nosiče totiž rostou exponenciálně se zvyšující se teplotou [15].

Další významnou aplikací keramiky v elektrotechnice je využití piezoelektrického jevu. Keramika jako taková nemá žádné piezoelektrické vlastnosti. Je zapotřebí využít ferroelektrického materiálu. V základě je dělíme na měkkou skupinu, dotovanou pětimocnými prvky, která se používá pro snímače chvění a zrychlení, a na skupinu tvrdou, která je vhodná pro výkonové aplikace [13].

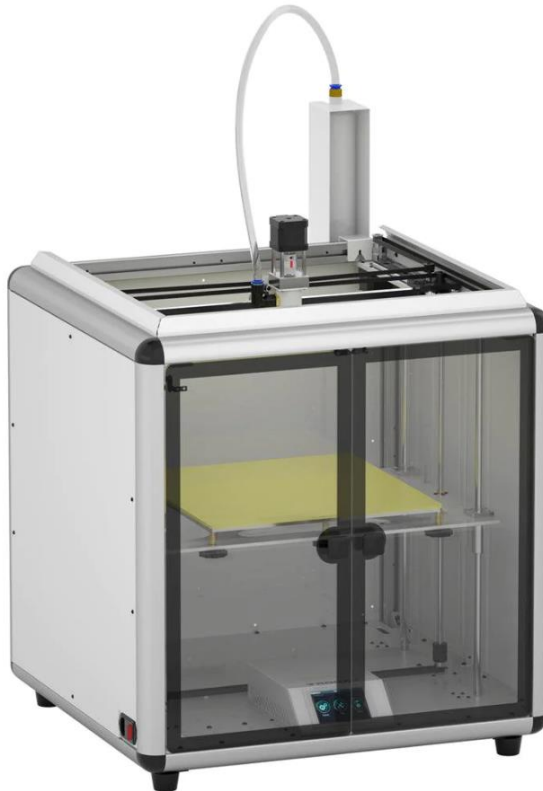
Keramická dielektrika se využívají hlavně při výrobě keramických kondenzátorů pro vysokofrekvenční oblast. U dielektrik nás převážně zajímá permitivita, ztrátový činitel, teplotní, frekvenční a napěťové závislosti. Výrobní technologií, která se nejčastěji používá, je sintrování keramického prášku za teploty až 1900 °C. Keramické kondenzátory rozdělujeme na 3 skupiny a to podle použitého dielektrika. První skupinou jsou kondenzátory s malou relativní permitivitou. Jsou stabilní, mají lineární teplotní závislost kapacity a hodí se i pro teplotní kompenzace. Druhou skupinou jsou vazební a blokové kondenzátory. Mají vyšší permitivitu, ovšem i dielektrické ztráty. Třetí skupinou jsou kondenzátory s velmi vysokou hodnotou relativní permitivity, avšak za cenu velmi špatné stability a přesnosti. Trpí nelineární změnou kapacity při změnách teploty, která je navíc závislá i na změně přiloženého napětí, dále vysokými dielektrickými ztrátami a rychlejším opotřebením [13].



Obr. 7: Ukázka keramických kondenzátorů [16].

### 3 3D tisk keramických materiálů

Tisk keramických materiálů je relativně nový směr 3D tisku. Od dob vyvinutí prvních 3D tiskáren na polymery se jednotlivci, ale i specializované skupiny snaží experimentálně vyvíjet nové druhy tiskových platform pro tisk nejrůznějších materiálů. V současné době na trhu existuje několik firem zabývajících se tiskem keramiky. Mezi nejznámější se řadí 3D Potter, ClayXYZ, 3D Wasp, Formlabs, Cerambot Eazao a Tronxy.



Obr. 8 Tronxy Moore 3 [17].

Většina těchto firem využívá tisk obdobný technologii FFF, tedy tisk extruzí skrze tiskovou hlavu s tryskou. Výjimkou je firma Formlabs. Od výše zmíněných se liší tiskárnou schopnou tisknout metodou SLA z keramického resinu. Velikou výhodou tisku tímto způsobem je schopnost dosáhnout velmi komplexního tvaru s minimálním množstvím použitých podpěr. Tento materiál obsahuje oxid křemičitý, u kterého po vypálení dojde k přerušení polymerní mřížky a stane se keramikou. Vytisknutý a vypálený výrobek je poté schopen odolat teplotám přes 1000 °C, deformace není závislá na stárnutí a zároveň je hygienicky čistý pro použití v kuchyni [12].



Obr. 9: Vypalování výtisku z keramického resinu Formlabs [12].



Obr. 10: Delta WASP 2040 Clay [18].

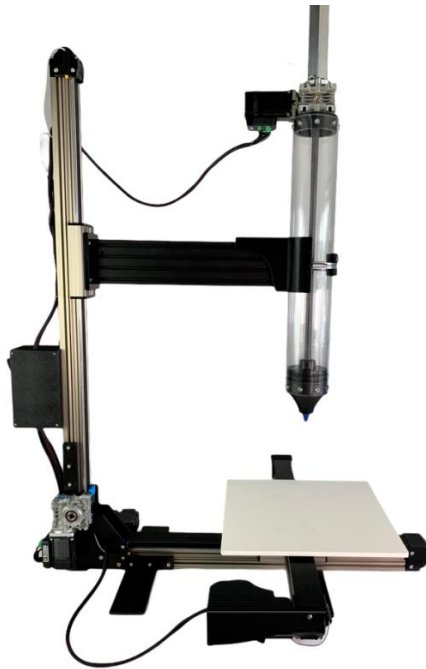
Firma 3D Wasp se specializuje na vývoj tiskáren typu Delta. U tohoto typu tiskáren je obecně známo, že dosahuje vyšších rychlostí, tj. nižšího času tisku, než klasické tiskárny s kartézským typem souřadnic, ovšem za cenu nižší přesnosti.

### 3.1 Provedení extruderů

Typickým provedením extruderů pro většinu případů zůstává klasický způsob extruze materiálu do tiskové hlavy a z ní následuje extruze na tiskovou plochu. Důvod pro volbu klasického typu tiskového formátu je pochopitelný. Jedná se o jeho jednoduchost, při které se tiskárna na keramiku nijak výrazně neodlišuje od tiskárny na polymerní filamenty, tudíž si může extrudér na hlínu nainstalovat doma teoreticky každý, kdo je vlastníkem jakékoliv 3D tiskárny.

#### 3.1.1 Provedení zásobníku uvnitř konstrukce

Výrobci tiskáren se rozdělují na dva hlavní tábory podle způsobu provedení extruze na tiskovou podložku. První metodou je přímá instalace zásobníku, nejčastěji ve tvaru válce, do tiskového prostoru a figurujícího jako tisková hlava.



Obr. 11: 3D PotterBot 10 XL [19].

Příkladem této varianty je firma 3D Potter, která má většinu svých tiskáren založenou na tomto principu. Výhodou tohoto systému spatřuji v minimalizaci, kdy není třeba vymýšlet dopravní systém pro tlačení materiálu k tiskové hlavě, zároveň není nutnost čištění trubic rozděleného extrudéru. Nevýhoda se jeví v nutnosti dimenzování osy Z a celé konstrukce, kdy je potřeba unést celou váhu zásobníku. Dále také v nutnosti mít dostatečně vysoký prostor nad tiskárnou kvůli vysouvání tyče pístu [19].



### 3.1.2 Provedení zásobníku mimo konstrukci

Druhou metodou je rozdělení extrudéru na dvě části, zásobník a tiskovou hlavu. Tato metoda se jeví šetrnější ke konstrukci tiskové hlavy a nutnosti dimenzování celkové konstrukce, neboť váha zásobníku s materiálem není umístěna na pohyblivé části uvnitř tiskového prostoru.

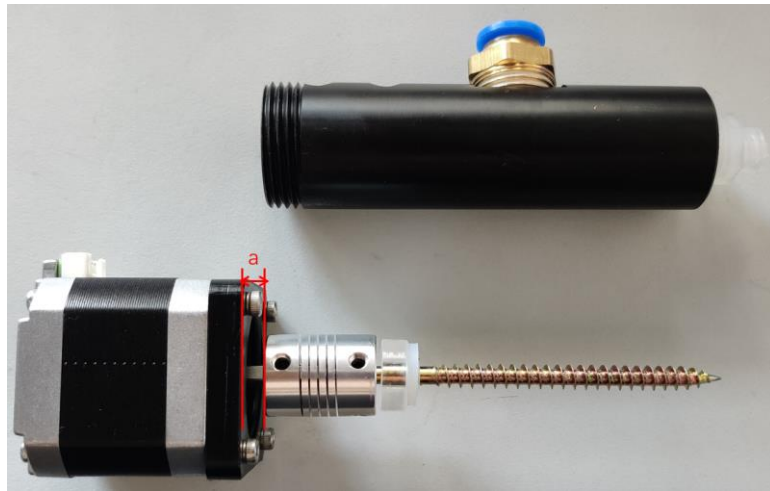
Zásobník může tvořit prakticky jakákoliv dobře utěsnitelná nádoba. Z jedné strany do nádoby vstupuje píst, který vytlačuje na straně druhé hmotu do hadice spojené s tiskovou hlavou.



Obr. 12 Tiskárna Cerambot Eazao [20].

Nevýhodou může být nutnost dopravit hlínu do tiskové hlavy skrze hadici. Připravíme se tak o část dostupného materiálu. Další situace, která může nastat, je například skřípnutí přívodní hadice, která by zapříčinila přetlakování systému zásobníku u kterého by mohlo dojít k destrukci tištěných dělů.

Tisková hlava extrudéru pohybující se uvnitř konstrukce je poté ve většině případů řešena osazením krokového motoru, ke kterému je připevněna výtlačná šroubovice. Tento extrudér následně tlačí materiál dodaný ze zásobníku skrze trysku na tiskovou podložku. V domácích podmínkách se neodborně používají seříznuté kovové vruty.

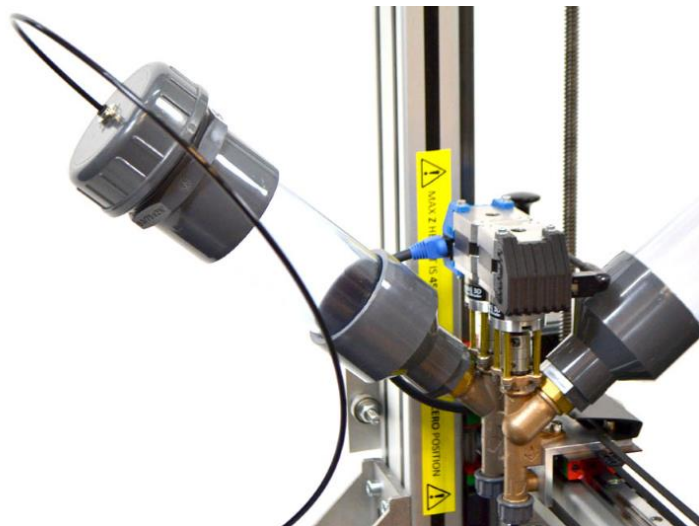


Obr. 13: Extruder tiskárny Cerambot [21].

### 3.1.3 Systém vytlačení zásobníku

Hlína obsažená v zásobníku je vytlačována dvěma hlavními metodami. Dle pohybu pístu tyto metody dělíme na pneumatické a mechanické.

Pneumatická metoda využívá stlačený vzduch, který dodává kompresor do vstupního bodu zásobníkové nádoby. Stlačený vzduch pak působí na píst, který vytlačuje materiál v druhé části tuby. U této metody patří nevýhoda v nezbytnosti kompresoru, jeho hlučnosti, potřebě neprašného prostředí, navíc i za použití tlakového ventilu vzniká podmínka dostatečně dimenzovat nádobu, která musí ustát dodaný tlak vhodný pro vytlačení materiálu. Výhodou při zavedeném pneumatickém rozvodu je kompaktnost sestavy, kdy není potřeba místo navíc pro konstrukci pístu ani vodící tyče.



Obr. 14: Ukázka jednoduchosti pneumatické části extruderu [22].

Mechanických řešení je poté několik. Hřídel motoru může otáčet s nosným šroubem ve stejné ose, ke kterému je připevněna hlava s pístem. Vlivem otáčení dochází k axiálnímu

pohybu pístu po ose šroubu v zásobníku materiálu a tím i k jeho vytlačování. Dalším možným provedením je pootočením motoru kolmo vůči ose zásobníku se závitovou tyčí zakončenou pístem. Otáčením motoru dochází opět k axiálnímu posuvu, ovšem nyní celé tyče s pístem, který extruduje materiál.



Obr. 15: Příklad mechanického řešení extruderu [23].

### 3.2 Materiál pro tisk

Základem tisku je vytlačení respektive přetvoření vstupního materiálu do určitého požadovaného tvaru. Jelikož hlína samotná není správně viskózní pro jednoduchou a přímou extruzi, je nutné přijít k jejímu zředění. Je ovšem nutné nalézt správný poměr hlíny a vody. Pro nalezení tohoto poměru uvádějí zahraniční zdroje několik níže uvedených metod.

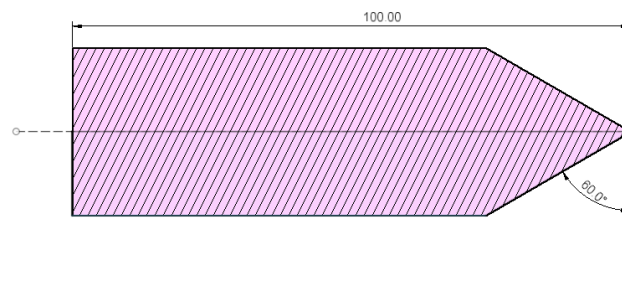
#### 3.2.1 Hmotnost

První metodou, která přichází v úvahu, je měření konzistence poměrem hmotnosti suchého materiálu a hmotnosti přidané vody. Metoda je nejjednodušší možnou, avšak spočívá ve znalosti viskozity založené na zkušenostech, jelikož v ní není zakomponovaná praktická možnost ověření konzistence jinak než ostrou zkouškou extruderu. Ovšem po zjištění konzistence poměr zůstává stejný. Zapotřebí je pouze váha, materiál a voda. V prvním kroku se změří hmotnost suchého materiálu, postupně se přidává voda. Tyto dvě substance se promíchávají dokud nedojde k materiálovému pohlcení vody. V tomto okamžiku by měla být hmota připravená pro extruzi [24].

Experimentálně zjištěný poměr touto metodou při zkoumání optimální konzistence hmoty a vody, převzatý ze zdroje [25], byl stanoven tak, aby celková hmotnost smíchané směsi byla v poměru 70 % hmotnosti suchého materiálu ku 30 % hmotnosti přidané vody [24].

### 3.2.2 Spike Test

Tato metoda spočívá v měření hloubky průniku ocelové tyče o určité hmotnosti, spuštěné z určité výšky. Není důležité, z jakého je tyč materiálu, ale aby dosahovala minimální délky 100 mm. Avšak hlavním parametrem u tohoto hrotu je, aby dosahoval hmotnosti 200 g. Pro kolmý pád tyče přesně pod úhlem  $90^\circ$  je možné přidat vodící trubici větších rozměrů, která je předem umístěna kolmo vůči dopadové ploše materiálu. Materiál je v případě tohoto testu umístěn na stabilním pevném podkladu. Jeho rozměry nejsou nijak definovány. Po spuštění hrotu dojde k jeho vmáčknutí do materiálu kde způsobí otisk. Jeho hloubka se dá změřit posuvným měřítkem. Daný test neurčuje správný poměr vody a hlíny pro jednotlivou směs, ale slouží pro porovnání konzistence mezi různými směsmi. Jinými slovy, pokud existují dvě směsi, ověřená a neznámá, lze u ověřené provést Spike test pro zjištění hloubky vniku. Následně neznámou směs míchat a průběžně u ní provádět ten samý test, dokud se nebudou hloubky vniků jednotlivých směsí rovnat. Poté je možné soudit, zda je neznámá směs připravená k tisku [24].



Obr. 16 Rozměry a tvar testovací tyče, rozměry v mm [24].

### 3.2.3 Test s použitím stříkačky

Tento test spočívá v použití 60 ml upravené injekční stříkačky. Na konci této stříkačky je přidělena tryska s průměrem 8 mm. Stříkačka je naplněna materiálem určeným pro extruzi. Po vyvinutí dostatečné síly začne extruze materiálu z trysky. Změřením síly působící na píst stříkačky lze stanovit, zdali je daná hmota vhodná pro tisk [24].

### 3.2.4 Tlakový test

V tomto testu se zjišťuje extrudovaná délka materiálu při použití pneumatického pohonu za konstantního tlaku působícího na píst. Ten extruduje materiál skrze 40 cm dlouhou a 6 mm širokou trubici. Dle extrudovaného materiálu se určuje, zdali má materiál optimální konzistenci pro tisk. Avšak hodnoty délek se pro každou směs liší, tudíž test nelze považovat za obecně platný pro všechny materiály. Tento test se dá provést v období kdy se zjišťuje hodnota potřebného tlaku pro spuštění extruze materiálu. [24].

## 4 Extruder

V této kapitole se práce věnuje od vybrání vhodného typu konstrukce extruderu, přes definování jeho vlastností, až po samotný konstrukční návrh a simulování jednotlivých komponentů v případě potřeby.

### 4.1 Výběr typu

Z dostupných možností byl výběr navrhovaného modelu extruderu zúžen na variantu mechanickou, jelikož pneumatický rozvod nebyl k dispozici.

Varianta se zásobníkem na tiskové hlavě se v současné konstrukční variantě tiskárny nejeví jako vhodnou volbou z důvodu potřeby vysokého dimenzování pro nosnou konstrukci hlavy. Zároveň, pokud by došlo k tomuto osazení, byla by vhodná varianta s extruzí materiálu za pomoci kompresoru, ten ale není dostupný. Navíc by dodaná nádoba materiálu nesměla být příliš vysoká. Aby došlo k vykompenzování ztráty na hmotnosti materiálu a nevznikala potřeba měnit zásobník každou chvíli, musela by svůj objem dohnat poloměrem. Pak by zase vznikla potřeba příliš širokého výtlačného pístu, který by se obtížně vyráběl.

Volba proto padla na kombinaci oddělené tiskové hlavy od zásobníku, který je umístěn pro experimentální účely mimo konstrukci samotné tiskárny, ale vyvíjen tak, aby se dal přimontovat na její tělo.

### 4.2 Stanovení vlastností zásobníku

Po vybrání typu extruderu bylo na čase stanovit si požadavky a potřeby pro daný typ. První požadavkem byla nádoba na materiál, která bude dostatečně objemná, přímá s hladkým povrchem, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám třením, ale zároveň pevnostně odolná, aby ustála vzniklé tlaky. Zároveň s těmito požadavky se hledělo na možnosti uchycení nádoby, její upevnění a případné jednoduchosti doplnění materiálu. Pro omezení tření mezi nádobou a pístem bylo nutné zvolit nádobu z jiného materiálu než vytisknutý píst. Dále se přihlédlo na chemickou netečnost materiálu nádoby pro zamezení koroze vlivem vlhké až mokré hlíny. Pro experimentální účely nebylo voleno nic rozměrného, avšak dostatečně objemného, lehce dostupného. Základní tvar zásobníku byl založen na podobě s lisem na těsto, kde podobně jako u tiskárny je z jedné strany aplikována síla vytlačující materiál na druhém konci nádoby. Pro dostupnost, cenovou příznivost a dostačující objem byl zvolen lis na zdobení od značky *Orion*, viz obr. 17. Vnitřní průměr nádoby je 47,6 mm, výška poté činní 150 mm. Dle výpočtu objemu, viz rovnice 1, si lze povšimnout, že nádoba

dosahuje objemu  $0,27 \text{ dm}^3$ . Po dosazení do rovnice 2 lze vypočítat potencionální hmotnost materiálu obsaženého v zásobníku. Za hustotu materiálu byl dodán teoretický předpoklad vlhké hlíny, převzatý ze zahraničních zdrojů [26].



Obr. 17: Lis na těsto Orion [27] .

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot v = \pi \cdot 23,8^2 \cdot 150 = 266928 \text{ mm}^3 \cong 0,27 \text{ dm}^3 \quad 1$$

$$m = V \cdot \rho = 0,00027 \cdot 1660 = 0,45 \text{ kg} \quad 2$$

Kde  $V$  je objem válce,  $r$  je jeho poloměr,  $v$  je výška,  $m$  je hmotnost a  $\rho$  je hustota hlíny.

Hmotnost materiálu se tedy teoreticky předpokládá na zhruba na  $0,5 \text{ kg}$ , samozřejmě reálná hustota hmoty může být nepatrně odlišná, dle výsledného poměru směsi hlíny a vody.

V momentě, kdy byla vybraná nádoba bylo dalším krokem v návrhu rozhodnutí o rozvržení celé konstrukce. Zda-li se bude pohybovat nádoba s obsahem, přičemž píst zůstane ve stacionární pozici, nebo se zafixuje nádoba a píst bude pohyblivou částí. Bylo rozhodnuto pro fixaci nádoby a volby pohyblivého pístu z důvodu jednoduchosti konstrukce s ohledem na výměnu zásobníku.

Nyní bylo na čase vybrat osu po které se bude pohybovat výtlačný píst. Tuto volbu jsem učinil čistě z ekonomických důvodů a použil jsem trapézovou tyč o průměru  $12 \text{ mm}$  a se stoupáním  $3 \text{ mm}$ , která shodnou okolností byla použita i při výrobě pohybu os tiskárny. Pro uchycení výtlačného pístu a zajištění translačního pohybu byla vybrána odpovídající matice pro trapézový šroub.

Další potřebou bylo zvolení motoru, který bude otáčet s trapézovou tyčí s osazeným pístem. Jelikož nebylo v daný moment rozhodnuto, jaký bude průměr hadice, respektive velikost zakončení zásobníku, tak se přistoupilo ke zjednodušenému modelu. Tento model se skládal pouze z potřeby tlačení hmotnosti materiálu.

Cílem bylo vytlačit materiál o hmotnosti 0,5 kg na trapézové tyči s průměrem 12 mm a stoupáním 3 mm. Výpočet potřebného momentu pro převod rotačního pohybu na přímočarý je proveden v rovnici 3 [28].

$$M = \frac{F \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot \eta} = \frac{5 \cdot 0,003}{2 \cdot \pi \cdot 0,88} = 0,002 \text{ N} \cdot \text{m} \quad 3$$

Kde  $M$  je moment motoru hnací hřídele v  $\text{N} \cdot \text{m}$ ,  $F$  je síla potřebná k posuvu zátěže v  $\text{N}$ ,  $p$  je stoupání závitu v  $\text{mm}$ ,  $\eta$  je standardní hodnota účinnosti.

Lze si tedy povšimnout, že pro posunutí materiálu o této hmotnosti postačí prakticky jakýkoliv motor dostupný na trhu. Je ovšem nutné vzít v potaz zanedbané parametry jako normálovou sílu působící proti extruzi, tření materiálu apod. Z těchto důvodů a z důvodu případného zvětšení nádoby pro materiál, respektive zvětšení zatížení, byl zvolen dvoufázový krokový motor 86CM35 od firmy *Leadshine*.

Tabulka 1: Parametry vybraného motoru 86CM35 [29].

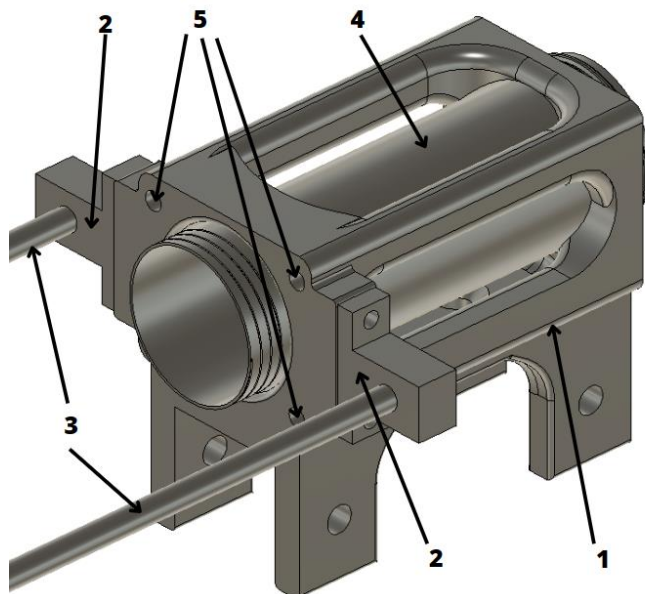
Základní úhel	1,8°
Jmenovitý moment	3,5 $\text{N} \cdot \text{m}$
Jmenovitý proud	4 A
Axiální zatížení	Max 0,08 mm (900 g)

Posledním požadavkem, který spojuje potřeby zásobníkové části s částí tiskové hlavy, je prostředník, kterým se bude daný materiál dopravovat. Zprvu bylo rozhodnuto o průmyslové hadici s průměrem 6 mm, která byla nejdostupnější a prakticky nejlevnější možností. Tato hadice se používá k vedení tekutin a technických plynů, je flexibilní a odolná proti stárnutí, tudíž se jevila jako správná volba. Po praktické zkoušce se ale ukázalo, že flexibilita použité hadice je až příliš vysoká a materiál v ní hadici rozpínal. Z toho důvodu byla zvolena varianta s opletením a vnitřním průměrem 9 mm. Po stanovení průměru hadice zbývalo vymyslet konstrukční řešení uchycení součástí, přenos momentu z hřídele motoru na výtlačný píst a přechodu materiálu ze zásobníku do hadice.

### 4.3 Konstrukce a návrh modelů zásobníku

Konstrukce zásobníkové části začala držákem zásobníku, jelikož ten byl první stanovenou položkou. Jevilo se vhodné využití jeho matic se kterými byl dodán. Myšlenkou bylo použít matice pro fixaci polohy zásobníku jejich dotažením. Bylo tedy nutné navrhnout fixační

prvek, který se bude moci dostatečně pevně přichytit ke konstrukci tak, aby po začátku působení síly nedošlo k posuvu nádoby s držákem a zároveň hledět na úsporu materiálu.



Obr. 18: Konstrukční provedení držáku zásobníku (1 – tělo držáku; 2 – držáky vodících tyčí; 3 – vodící tyče; 4 – nádoba/zásobník; 5 – konstrukční díry pro napojení).

Proto byl návrh uchycení vytvořen poměrně prostorově otevřený. Důsledkem tohoto se stal návrh nevytisknutelný z jednoho dílu, tudíž se přistoupilo k jeho rozříznutí a vytisknutí po polovinách. Tyto poloviny se ovšem museli spojit co nejpřesněji, proto došlo k variantě prostrčení závitových tyčí o poloměru 6 mm skrze tělo a jejich stažení příslušnými maticemi. Pro zvolenou metodu výtlačku pístem bylo nutné vymyslet způsob pohybu pístu vůči zásobníku s materiálem. Byl zvolen formát translačního pohybu pístu po otáčejícím se trapézovém šroubu z důvodu jednoduchosti konstrukce s uspokojivými výsledky.

Pro pohyb pístu byla zvolena trapézová přírubová matice odpovídající rozměrům trapézového šroubu. V tomto případě šlo o TRM-BRFL 1203.

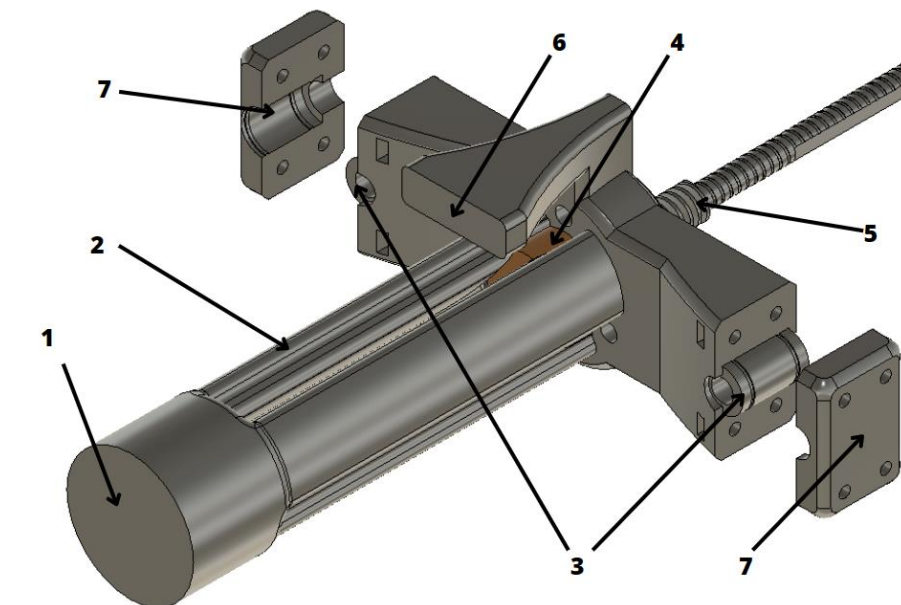


Obr. 19: Ukázka použité trapézové přírubové matice [30].

Po zvolení formátu a zajištění matice byl vymodelován návrh pístu s ohledem na úsporu materiálu a zároveň pevnostním požadavkům. U pístu bylo navíc nutné vymyslet



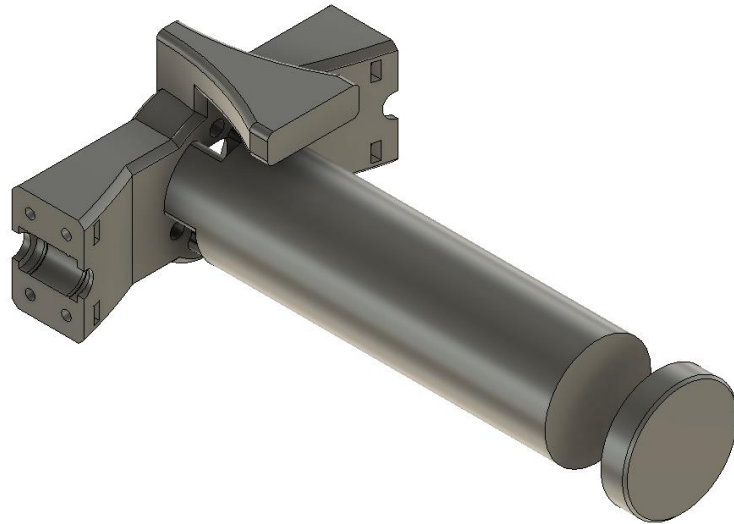
konstrukční vlastnost, která by zamezovala jeho protočení s osou hřídele a tím zamezení extruzi materiálu. Z tohoto důvodu byl model doplněn o dvojici lineárních ložisek po jeho stranách, které se pohybují po vodících tyčích uchycených na zbylých částech sestavy.



Obr. 20: Popsaný návrh pístu (1 – výtlačná plocha; 2 – stojné pilíře; 3 – lineární kuličková ložiska; 4 – Trapézová přírubová matice; 5 – trapézový šroub; 6 – doraz pro koncový snímač; 7 – uchycení lineárních ložisek)

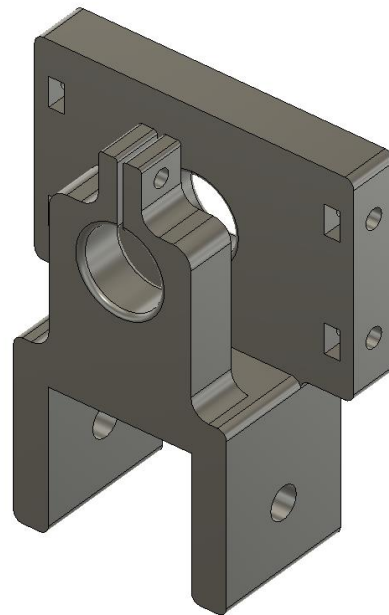
Tento model se po prvních praktických zkouškách ukázal nedostačující, jelikož vlivem vzniklých nepřesností při výrobě došlo k nedokonalému utěsnění prostoru mezi výtlačnou plochou a zásobníkem s materiálem. Tento problém měl za příčinu proniknutí materiálu skrze mezery mezi pilíři, které byly vymodelovány z důvodu úspory materiálu, k trapézovému šroubu, kde došlo k vyschnutí materiálu a celá konstrukce se stala nepoužitelnou.

Z těchto důvodů byla navržena druhá verze výtlačného pístu s ohledem na výše uvedené nedostatky. Pilíře byly nahrazeny a místo nich byla výtlačná plocha spojena s tělem držícím přírubovou maticí dutou schránkou po celém obvodu hlavy pístu. Navíc byl tomuto dutému tělesu zmenšen průměr, jednak z úspory materiálu, ale za druhé proto, aby zmíněné tělo prošlo jednoduše skrze matici zásobníku. Tento průměr ovšem nedosahoval průměru zásobníku, tudíž by opět docházelo k úniku materiálu a ne k jeho extruzi. Z těchto důvodů byla vymodelována násada, která lícuje s okrajem zásobníku a jednoduše se nasadí na tělo pístu.



Obr. 21: Opravená verze modelu pístu.

Pro stabilizaci trapézového šroubu bylo zvoleno využití kuličkového ložiska s vnitřním průměrem 8 mm. Druhým opěrným bodem byla přírubová matice uložená ve výtlačném pístu. Pro fixaci kuličkového ložiska bylo vymodelováno uchycení, viz obr. 22. Větší plocha sloužila k uchycení podpěr pro vodící tyče, kdežto stahovací část zase pro uložení ložiska.



Obr. 22: První verze uchycení kuličkového ložiska.

Držák pro motor byl modelován s využitím převodu přes ozubená kola, jelikož rozměry motoru nedovolily jeho přímé osazení pro současný výškový návrh zbylých fixačních dílů v soustavě. Ta jsou zde využita za účelem vyrovnání vzdáleností a jejich poměr byl zvolen tak, aby dodala do sestavy větší moment v případě chybně vypočítaného modelu potřebných sil. Další výhoda jejich použití, která se později ukázala jako správnou volbou, byla při

poddimenzování návrhu na axiální síly, které působí na samotný trapézový šroub. Tímto poddimenzováním docházelo k rozpojování těchto ozubených kol ve směru osy hřídele. Jinými slovy, ozubená kola se rozepínala jako při řazení v převodovce automobilu. Tím se předešlo působení trapézové tyče na hřídel motoru, což by vedlo k jeho destruktivnímu poškození. Převodový poměr těchto kol byl pak určen z následujícího vztahu:

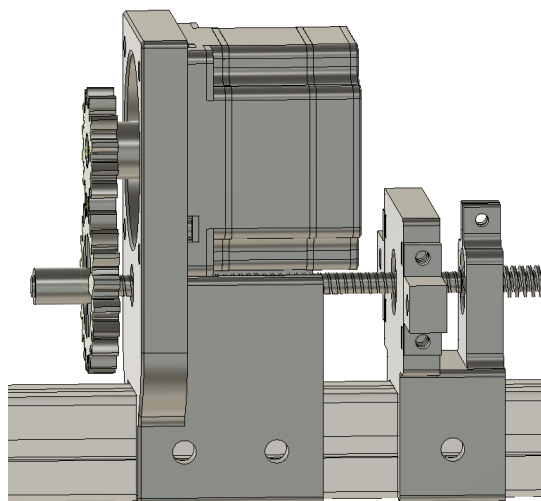
$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{60}{42} \cong 1,43 \quad 4$$

Kde  $i$  je převodový poměr,  $d_2$  je průměr hnaného kola v mm,  $d_1$  je průměr hnacího kola v mm,  $z_2$  je počet zubů hnaného kola,  $z_1$  je počet zubů hnacího kola.

Moment hnaného kola se poté stanovil vztahem:

$$M_2 = i \cdot M_1 = 1,43 \cdot 3,5 = 5,005 \cong 5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad 5$$

Kde  $M_2$  je moment hnaného kola (hřídele) v N·m,  $M_1$  je moment hnacího kola (hřídele) v N·m.



Obr. 23: Sestava ozubených kol, držáku motoru a ložiska.

Jak již bylo zmíněno, vlivem nedostatečného dimenzování axiální síly působící na trapézový šroub docházelo při rotaci k rozpojení hnacího a hnaného kola. V důsledku toho došlo k přerušení vytlačování materiálu. Řešení tohoto problému spočívalo v zapření hřídele o pevný bod. Jelikož docházelo k rozpojení jak při vytlačování materiálu, tak při návratu pístu do základní polohy, bylo nutné zapřít hřídel z obou stran. Pro tento účel byla využita axiální kuličková ložiska. Pro zapření těchto ložisek byly vymodelovány opěrné domky, s hřídelí pevně spojené čepem.



Obr. 24: Opěrný domek axiálního ložiska.

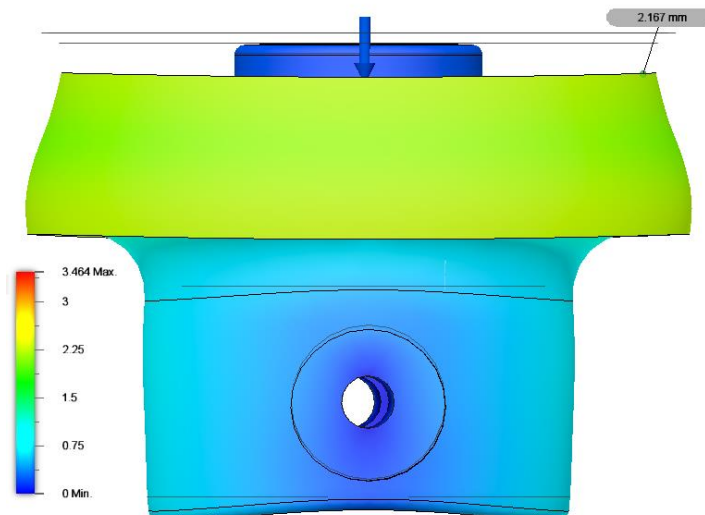
Z druhé strany axiálního ložiska se pro jeho zapření využila již použitá konstrukce pro uchycení radiálního kuličkového ložiska a držáků vodících tyčí.

Sestava v této konfiguraci po vyzkoušení neobstála z několika důvodů. Konstrukce pro radiální ložisko nebyla dostatečně pevně přichycena a docházelo k jejímu posuvu, což mělo za důsledek opětovné rozpojení ozubených kol. Zároveň ale praktický pokus poukázal na nedostatky v návrhu opěrného domku. Ten byl vytištěn z materiálu PET-G s objemovým vyplněním 15 %. Toto se ukázalo jako nedostatečné, jelikož vlivem axiální síly došlo k jeho deformaci. Díky této deformaci vznikla mezi ložiskem a jeho opěrným bodem vůle, která zapříčinila opětovný posuv celého trapézového šroubu.



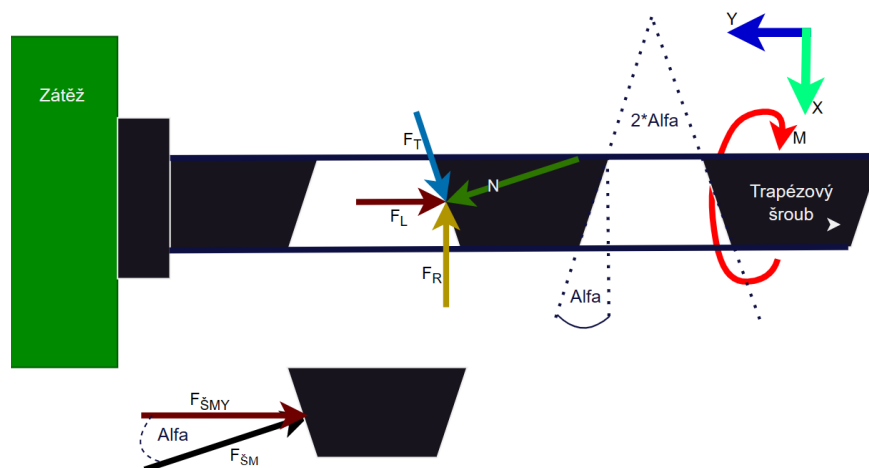
Obr. 25: Deformovaný domek (vlevo) oproti nedeformovanému (vpravo).

Před dalším pokusem byla provedena simulace statického zatížení silou působící na tyto součástky, kdy podle dosažených výsledků byla navržena upravená verze těchto domků. Tato simulace byla provedena v programu Autodesk Fusion 360, využitým materiálem byl PET plastic. Provedením simulace statického zatížení těchto domků by byl problém odhalen před výrobou a mohlo se mu předejít.



Obr. 26: Simulace působení axiální síly.

Simulace je založena na znalosti momentu motoru a rozměrech trapezového šroubu a působení třecích sil v soustavě.



Obr. 27: Silové působení třecích sil na trapezový šroub.

V soustavě se objevuje hned několik působících sil, kdy po jejich zkoumání získáme výslednici, která určuje axiální sílu. Na obr. 27 vidíme 4 působící síly zapříčiňující pohyb matice vůči šroubu.  $F_L$  zde zastupuje sílu působící proti závitě od zátěže po celé délce styku závitů, jinými slovy zátěž samotnou.  $N$  je normálová síla působící kolmo na povrch materiálu zevnitř. Uvažujme šroub otáčející se proti směru hodinových ručiček (vyobrazeno výše), pak bude existovat síla  $F_R$  jakožto síla potřebná k otočení trapezového šroubu pro posunutí zátěže. Dále je nutno vzít v potaz třecí sílu  $F_T$ , která je vyvolaná třením mezi maticí a šroubem. Po identifikaci sil působících mezi maticí a trapezovým šroubem můžeme rozložením do prostoru  $XY$  vyjádřit jejich velikosti následující soustavou rovnic. Budeme

uvažovat stacionární stav, tedy maximální potřebné hodnoty sil pro uvedení soustavy do pohybu.

$$\sum F_{LY} = -F_L - F_{TY} \cdot \sin \alpha + N \cdot \cos \alpha = 0 \quad 6$$

Kde  $\alpha$  je polovina z úhlu stoupání trapézového šroubu, který je definovaný normou ČSN 01 4050, stanovený na hodnotu  $30^\circ$ .

$$\sum F_{LX} = F_R - N \cdot \sin \alpha - F_{TX} \cdot \cos \alpha = 0 \quad 7$$

Vyjádřením normálové síly z rovnice 6 a dosazením do rovnice 7 lze postupným zjednodušováním získat rovnici působící síly  $F_R$ .

$$F_R = \frac{F_L \cdot (p + f \cdot \pi \cdot d_2)}{\pi \cdot d_2 - f \cdot p} \quad 8$$

Kde  $p$  je stoupání závitu trapézové tyče,  $d_2$  je střední průměr trapézové tyče (pro tyč 12 mm je střední průměr  $10,5 \div 10,8$  mm, zvolena hodnota 10,65 mm) a  $f$  je koeficient tření (pro namazané tyče je jeho hodnota přibližně 0.15)

Doposud popsané rozložení sil platí obecně pro čtvercové profily závitů. Pro konvergenci vztahu vzhledem k použitému trapézovému šroubu bylo využito upraveného popisu působení síly  $F_L$ , viz obr. 26 dole. Analýzou sil dojdeme ke zjištění, že síla působící na trapézový závit na něj působí kolmo vůči styčné ploše. Tuto sílu značíme  $F_{\dot{S}M}$ . Síla  $F_L$  pak tedy odpovídá síle  $F_{\dot{S}MY}$ , neboli složce síly  $F_{\dot{S}M}$  ve směru osy Y. Aplikací pouček pro rovnoramenný trojúhelník jsme schopni dopočítat velikost požadované síly  $F_{\dot{S}M}$ . Tato síla působí ve všech stykových bodech mezi trapézovým šroubem a jeho maticí. Pro vytlačení daného materiálu je tedy nutno překonat sílu  $F_{\dot{S}M}$ . Daný vztah se změní následujícím způsobem.

$$\begin{aligned} M &= \frac{d_2 \cdot F_{\dot{S}M}}{2} \cdot \frac{p + \pi \cdot f \cdot d_2 \cdot \sec \alpha}{\pi \cdot d_2 - f \cdot p \cdot \sec \alpha} \\ &= \frac{0,0106 \cdot 0,45 \cdot 9,81}{2} \\ &\cdot \frac{0,003 + \pi \cdot 0,15 \cdot 0,0106 \cdot \sec 15}{\pi \cdot 0,0106 - 0,15 \cdot 0,003 \cdot \sec 15} \cong 0,006 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad 9$$

Síla  $F_{\dot{S}M}$  tedy reprezentuje těleso o celkové váze 0,45 kg. Je nutné zdůraznit, že vztah uvedený výše nebere v potaz třecí síly nádoby a ani normálovou sílu působící na konci této nádoby. Slouží tedy pro přibližnou představu dimenzování motoru za účelem přímočarého

posuvného pohybu zátěže. Po číselném dosazení do výše uvedených vzorců vyjde pro posunutí zátěže působící proti šroubu o síle 4,5 N potřebný moment 0,0065 N·m.

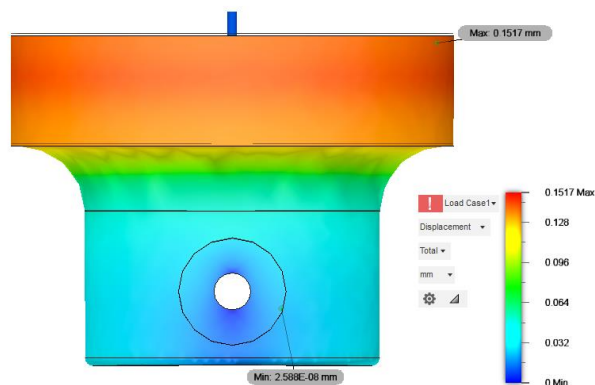
Se znalostí kroutícího momentu motoru lze vyjádřením síly ze vztahu 9 vypočítat axiální sílu působící na matici a tudíž i na jednotlivé domky.

$$\begin{aligned}
 F_{AX} &= \frac{2 \cdot M}{d_2} \cdot \frac{\pi \cdot d_2 - f \cdot p \cdot \sec \alpha}{p + \pi \cdot f \cdot d_2 \cdot \sec \alpha} \\
 &= \frac{2 \cdot 5}{0,0106} \cdot \frac{\pi \cdot 0,0106 - 0,15 \cdot 0,003 \cdot \sec 15}{0,003 + \pi \cdot 0,15 \cdot 0,0106 \cdot \sec 15} \quad 10 \\
 &= 3790,86 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Číselným dosazením do rovnice 10 bylo zjištěno, že působící síla má hodnotu 3,79 kN. Rovnice 11 ukazuje výpočet tlaku působícího pístem na materiál. Ten dosahuje hodnoty přibližně 532 kPa.

$$P = \frac{F_{AX}}{S_{píst}} = \frac{3790,86}{\pi \cdot 0,0476^2} = 532,5 \text{ kPa} \quad 11$$

Na obr. 26 si můžeme všimnout, že simulace poukazuje na mechanickou deformaci stlačením materiálu do hloubky 2,2 mm. Naměřená hodnota v nejhlubším bodě prohloubení vycházela přibližně na 3 mm. Nutno podotknout, viz obr. 25, že došlo k nerovnoměrné deformaci jako v případě simulace. Vzniklá nepřesnost mezi simulací a skutečností je v dalším bodě důsledkem nedostatečné možnosti nastavení výplně simulovaného modelu odpovídající skutečnému modelu. Pro účely simulace byl parametrizován jako dutý z materiálu PET, v realitě měl přímočarou 20% výplň. Tento problém byl vyřešen použitím plné 100% výplně. V tom momentě byl domek již schopen odolat tlaku vzniklému axiální silou. Výsledky simulace odhalily deformaci menší než 1 mm. Tento výsledek byl uspokojivý.



Obr. 28: Simulace opěrného domku s plnou výplní.

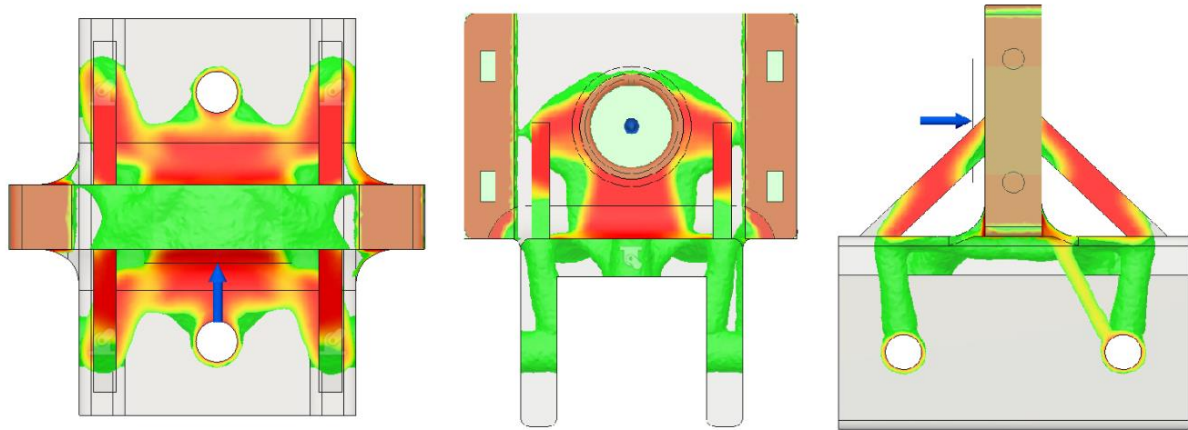
Dalším řešeným problémem byla nedostatečná opora druhého místa styku, tedy držáku radiálního ložiska. Došlo k přidání více spojovacích bodů s konstrukcí a také k přidání šikmých podpěr opěrné stěny. Pro ověření účinnosti úprav byly provedeny simulace statického zatížení vypočítanou axiální silou. Byla provedena počítačová optimalizace tvaru, která po nastavení požadovaných limitů navrhla tvar daného držáku. První požadavek byl stanoven pro požadovanou hmotnost tělesa v procentuálním vyjádření vůči počáteční hmotnosti. Dalším požadavkem bylo stanovení houževnatosti tělesa. V neposlední řadě bylo nutné nastavit tvary, které si u držáku přejeme zachovat, tudíž otvor pro hřídel, konstrukční otvory pro přichycení ke konstrukci a otvory pro uchycení držáku vodících tyčí.

Parameter	Expression	Value	Units
Target Mass	< OR =	30	%
Stiffness	Maximize		

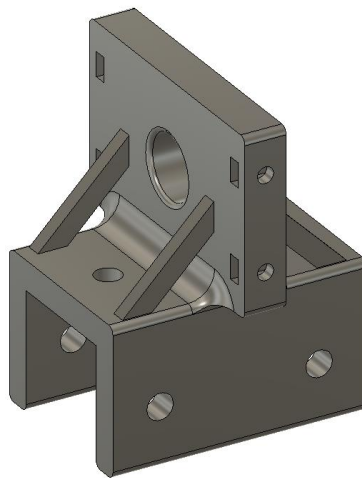
Obr. 29: Parametry optimalizace tvaru.

Optimalizace tvaru, viz obr. 30, navrhla tvar podle zadaných parametrů. Optimalizovaný tvar odpovídá hmotnosti 30 % z celkové predikované hmotnosti původního neoptimalizovaného návrhu. Barevná mapa poté ukazuje doporučení pro ponechání materiálu a fyzické struktury. Od rudé po zelenou je vyobrazena důležitost vrstvy s rudou barvou vyobrazenou jako nejdůležitější.





Obr. 30: Optimalizace tvaru.

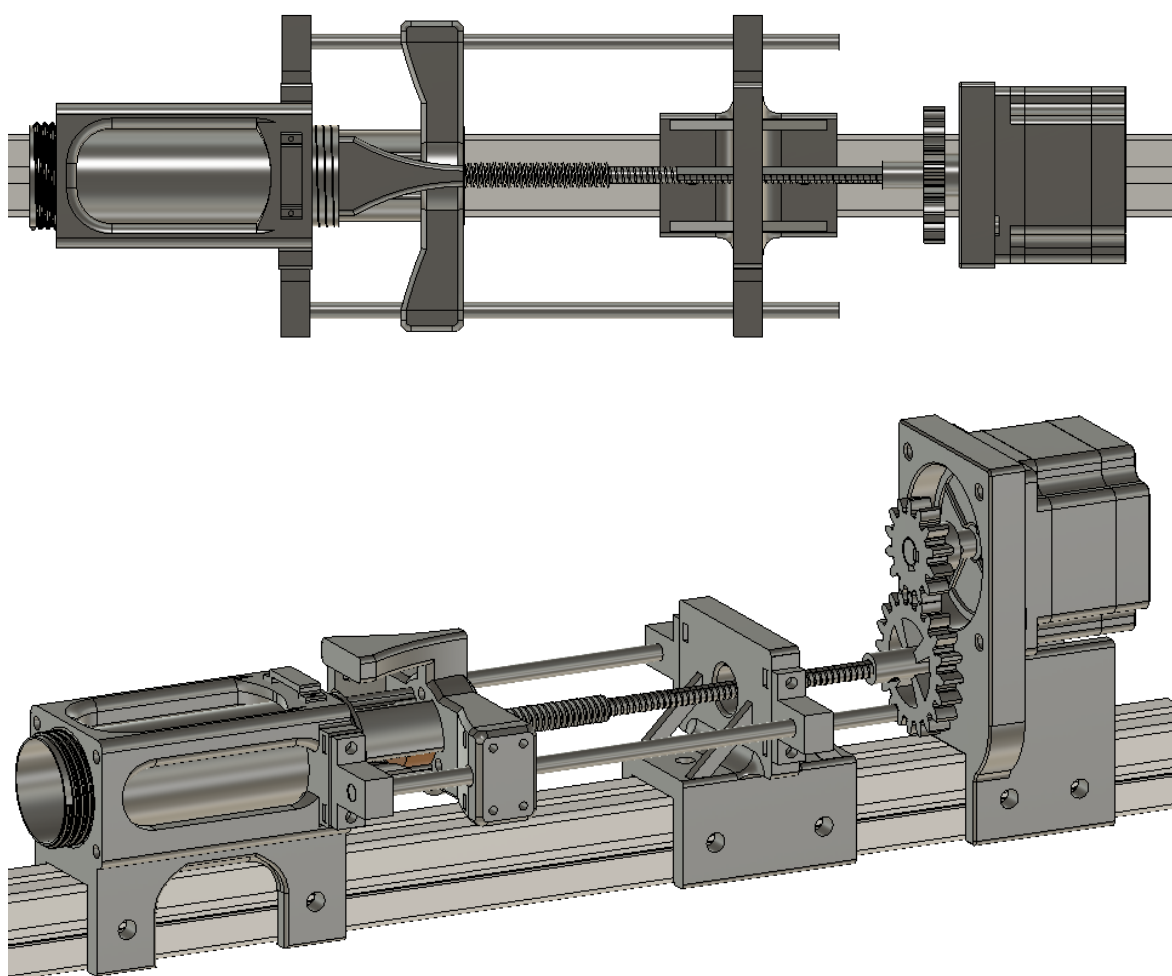


Obr. 31: Držák radiálního ložiska a opěrné místo pro axiální ložisko.

Posledním chybějícím článkem v návrhu byl přechod mezi zásobníkem a hadicí. Koncept tohoto přechodu se odvíjí od požadavku na vhodné uchycení ke konci zásobníku a odolné konstrukci přichycení hadice. První nápad spočíval ve využití matice zásobníku, která by mohla toto zakončení pevně zafixovat se zásobníkem. Zároveň byla zakončena vyústěním pro připojení hadice. To se ukázalo jako nepraktické neboť při rozpojování hadice a samotného zakončení docházelo k destruktivnímu praskání samotného vyústění. Ani zvětšení šířky stěny se neprokázalo jako vhodná varianta. Tudíž se přešlo k osazení hrotu mosaznou hadicovou spojkou o průměru 7 mm, na kterou se připojila dostupná hadice.



Obr. 32: Zakončení zásobníku.



Obr. 33: Celkový model zásobníkové části extruderu.

## 5 Tisková hlava

### 5.1 Stanovení vlastností tiskové hlavy

Prvotní myšlenka tiskové hlavy se opírá o šnekový dopravník materiálu, u kterého figuruje motor, který postupným otáčením šnekovým šroubem vytlačuje materiál z trysky.

Potřeby pro tiskovou hlavu tedy nebyly nijak výrazné. Bylo nutné najít vhodný motor s možností vhodného uchycení šnekového podavače a nádoby vyrobené pomocí 3D tisku.

Na motor pohánějící tiskovou hlavu nejsou kladeny, vzhledem k jeho použití, tak vysoké požadavky, jako tomu je u motoru zásobníku. Možnost přizpůsobení objemu nádoby zde hraje podstatnou roli. Volbou rozměrů jsme schopni ovlivnit, jak velký moment je zapotřebí na extruzi daného objemu materiálu. Pro tyto účely byl zvolen dvoufázový krokový motor 57CM13, který dosahuje přibližně polovičního momentu, než je tomu u motoru zásobníkové části, a tudíž by měl být dostačující.

Tabulka 2: Parametry vybraného motoru 57CM13 [31].

Základní úhel	1,8°
Jmenovitý moment	1,5 N·m
Jmenovitý proud	4 A
Axiální zatížení	Max 0,08 mm (900 g)



Obr. 34 : Krokový motor 57CM13 [31].

### 5.2 Konstrukce a návrh modelů tiskové hlavy

Konstrukce části s tiskovou hlavou se v základních požadavcích nijak výrazně neliší od potřeb zásobníkové části. Stejně jako u zásobníkové části se očekává nádoba a způsob extruze materiálu. Sestava této jednotky musí být pevně uchycena ke konstrukci obstarávající pohyb v ose X. Prvním návrhem konstrukčního řešení obsahovalo držák motoru, samotný motor, kde na jeho hřídeli najdeme spojku osazenou šnekovým

podavačem. Ten by byl zasunut v nádobě přichycené k plošce konstrukce. Do nádoby bude přiváděn materiál a otáčením šneku bude docházet k extruzi samotného materiálu na tiskovou podložku. Bylo tedy nutné přijít s takovým konstrukčním řešením šneku s nádobou, které by dokázalo kontinuálně extrudovat materiál.

Metodika při návrhu šnekovnice spočívala ve zjištění, jaký je nejvhodnější poměr mezi nosnou hřídelí a jejím závitem, zdali je lepší použít úzkou hřídel s velkou hloubkou závitu nebo naopak. Společně s tím se sleduje vliv velikosti průměru závitu.

Šnekový podavač, který byl pro současnou část návrhu předlohou, se především používá pro dopravu sypkých a nelepivých materiálů. Proto bylo důležité, aby byla připravená směs dostatečně dobře promíchána. Pohyb materiálu obstarává šnek. Skládá se z nosné hřídele a šroubovice. Předpoklad pro pohyb tohoto materiálu, který byl v návrhu opomenut, zní: tření materiálu o stěnu nádoby šneku musí být větší, než tření materiálu o povrch šneku. Pro posun sypkých materiálů bylo ale dokázáno, že stačí aby se tyto tření rovnali, jinými slovy šnek i nádoba mohou být vyrobeny ze stejných materiálů. U komerčních šnekových podavačů se předpokládá nezaplnění celého prostoru válce dopravovaným materiálem. V jejich případě by to totiž znamenalo vytvoření „zátky“ a tím by došlo k ucpání [32].

Návrh šneku je nejpodstatnějším krokem pro správné fungování tohoto podavače. Je důležité zvolení správného stoupání šneku a jeho průměru. Při návrhu stoupání šneku se vychází ze zvolení průměru šnekovnice. Ten se volí ze znalosti velikosti zrna dopravovaného materiálu. Požadavek na hřídel je jediný a to ten, aby byla hřídel schopna odolat kroutícímu momentu [33].

$$d_{\xi} \geq 12 \cdot d_{max} \quad 12$$

$$h = d_{\xi} \quad 13$$

Kde  $d_{\xi}$  je průměr šnekovnice,  $d_{MAX}$  je maximální velikost zrna dopravovaného materiálu,  $h$  je stoupání šnekovnice.

Zrnitost keramické hlíny se odvíjí na jejím původu a na složení. Velikost zrna u jemné točírenské hlíny se může pohybovat až v řádech tisícín milimetrů. U hrubé keramické hlíny se udává velikost zrna až na 1 mm [34].

$$m \cdot 0,5 \cdot d_{\xi} \cdot \omega^2 \leq m \cdot g \quad 14$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad 15$$

$$n_{kr} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{g}{0,5 \cdot d_s} \right)^{0,5} \quad 16$$

$$n = n_{kr} \cdot 0,5 \quad 17$$

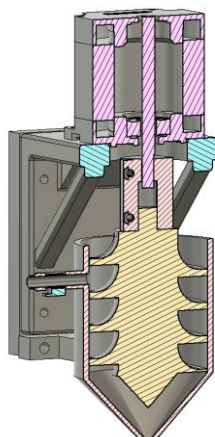
Kde  $m$  je hmotnost dopravovaného materiálu ve válci,  $d_s$  je průměr šneku,  $\omega$  je úhlová rychlost motoru a  $g$  je gravitační zrychlení,  $n$  jsou otáčky šneku za sekundu a  $n_{kr}$  jsou kritické otáčky šneku.

Rovnice č. 14 popisuje základní podmínku dopravy. Ta říká, že materiál se bude pohybovat, pokud bude odstředivá síla menší nebo rovna tíze dopravovaného materiálu. Dosazením úhlové rychlosti do rovnice 14 můžeme vypočítat kritické otáčky šneku, rovnice 16, při kterých se budou výše zmíněné síly rovnat. Největší účinnosti dopravního systému je poté dosaženo při polovině kritických otáček [32].

Výše uvedené vztahy se používají při návrhu konvenčního šnekového dopravníku, který se využívá výhradně k dopravě sypkých materiálů. Dosazením do výše uvedených rovnic 16 a 17 vyjde teoretický předpoklad rychlosti otáčení šneku.

Pro případ tiskové hlavy je ale zaplnění prostoru šnekového válce žádoucí. Tímto způsobem totiž dojde přichozím materiálem k silovému působení na předešlý materiál, takto bude docházet k extruzi z trysky na tiskovou plochu.

Prvních několik verzí bylo vytvořeno pro ověření základních principů funkce šnekového podavače a jeho limitů za pomoci 3D tiskového výrobního procesu. První vyrobený návrh trpěl třením materiálu a šnekovnice, které měly zapříčinění vyklánění nádoby pro materiál z důvodu nedostatečné robustnosti. Toto vyosení nádoby vyústilo v zaseknutí šnekovnice uvnitř nádoby a přeskokování kroků motoru. Obdobně jako u zakončení zásobníkové nádoby i zde bylo vymodelováno připojení hadice a i zde docházelo při jeho rozpojování k destrukci. Mezi dalšími vyzkoušenými návrhy byla široká verze nádoby s poměrně velkým průměrem samotného šneku. Tato objemná verze byla navržena z důvodu ověření vlivu velikosti návrhu na schopnost extruze materiálu. Tento návrh se vyjevil jako silně nedostačující z důvodu přivedení až přílišného množství materiálu a následného zaseknutí šneku.



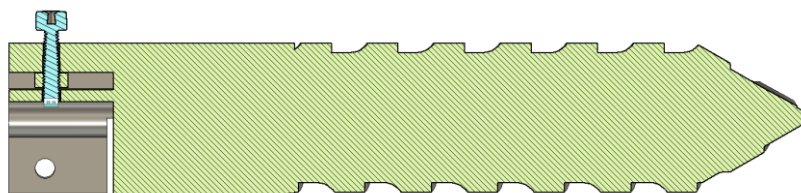
Obr. 35: Návrh s širokým šnekem.

Návrh na obr. 35 odhalil další slabé místo. Tím je přechod v uložení šroubovice ve spojce a celkově spojka samotná. Jelikož se jedná o spojku tisknutou, tak i po vytvoření hran pro zamezení protáčení, postupným ucpáním šneku došlo k opotřebení dané hrany, které vyústilo k protáčení motoru ve spojce. Další nevýhodou v tomto návrhu byla výměna šneku a spojky, kde docházelo k destrukci šneku v části uložené ve spojce. K tomu docházelo kvůli zvolené metodě výroby a její špatné orientaci, kdy se po vytažení šneku ze spojky odtrhly jednotlivé vrstvy tisku z důvodu nedostatečné adheze mezi sebou. I tento důvod vedl na nalezení šnekovnice z jiného materiálu.



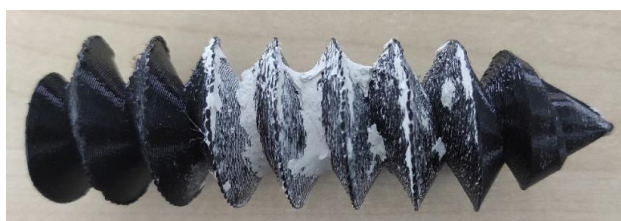
Obr. 36: Ukázka nedostatků spojení spojky a šnekovnice.

Ukázalo se tedy, že není výhodné dělat příliš široký návrh nádoby ani šneku, jelikož třecí síly jsou příliš velké pro extruzi materiálu. Další návrh tedy spočíval v omezení možnosti praskání jednotlivých vrstev šneků a dále hledal správný poměr velikostí hřídele šneku vůči šnekovnici. Z těchto důvodů byl vyvinutý šnek, který spojuje motorovou spojku se samotným šnekem. Pro zamezení pohybu hřídele motoru uvnitř spojky byl použit šroub společně s maticí, která byla umístěna v drážce mezi hřídelí a vstupem šroubu.



Obr. 37: Šnek spojený s motorovou spojkou.

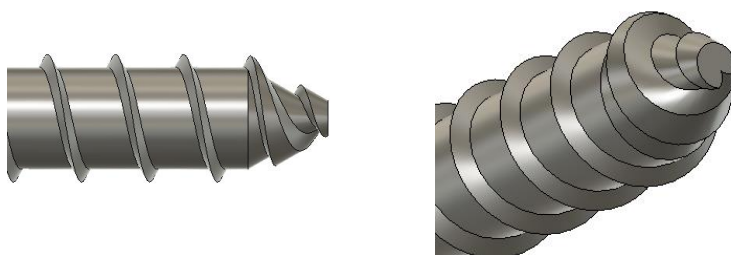
Ani tento návrh neuspěl. Docházelo k ucpání extrudovaného materiálu v přechodu z válce do samotné trysky. Důvod tohoto zatarasení byl nevhodně namodelovaný přechod mezi těmito dvěma oblastmi. Tento problémový úsek nevyřešila ani úprava nosné hřídele šneku pro šnekovnici. Při tomto návrhu docházelo k ucpání již ve válcové části.



Obr. 38: Šnekovnice s malým průměrem nosné hřídele.

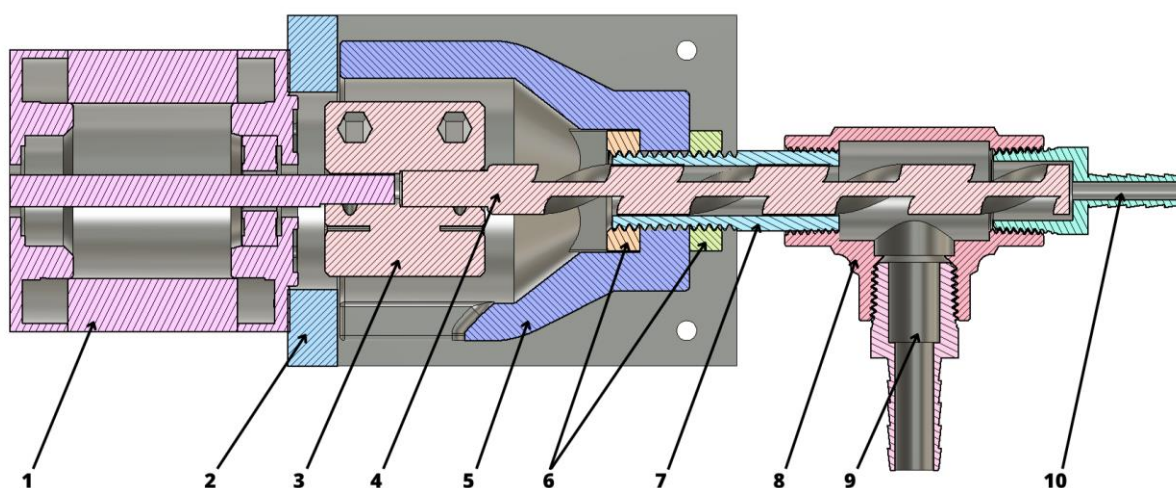
Jedním z dalších návrhů bylo otestování menšího průměru šnekovnice vůči válci. Změnou průměru šnekovnice vznikla vůle mezi nádobou a šnekem. Tento návrh se nepotkal s úspěchem kvůli vyosení šneku působením příchozího materiálu a zaseknutí motoru. Po upravení velikosti hřídele, aby nedocházelo k vyosení nastala situace, kdy místo extruze materiálu skrze trysku z nádoby na podložku docházelo k jeho unikání druhým koncem válce. Tento model tedy potvrdil, že průměr šneku musí být stejný jako vnitřní průměr válcové nádoby.

Překonat zacpání dokázala varianta šneku s průměrem přibližně srovnatelným s průměrem hřídele motoru. Praktické zkoušky ukázali na zajímavý fakt. Čím menší průměr šneku, tím dochází k lepšímu vedení materiálu. I přes vhodné úpravy tento šnek s nádobou nevydrželi. Avšak poukázali na přítomnost axiální síly, která na šnek působila než došlo k jeho přetržení.



Obr. 39: Šnekovnice malého průměru.

Z toho důvodu byl přepracován koncept tiskové hlavy. Opustil se návrh z tisknutých plastových dílů z důvodu nevhodného tření materiálu o stěnu válcové nádoby společně s třením šneku. Přešlo se k robustnějšímu, pevnějšímu návrhu potlačující axiální sílu působící v sestavě a další objevené nedostatky. Tento návrh se orientoval na komerčně dostupné produkty, které se dají jednoduše a levně sehnat.



Obr. 40: Finální verze extruderu (1 – krokový motor; 2 – držák motoru; 3 – motorová spojka; 4 – šnek; 5 – příruba; 6 – matice M16; 7 – spojovací tyč; 8 – T-kus 3/8“; 9 – hadičník 3/8“ přívodní; 10 – hadičník 3/8“ tryskový).

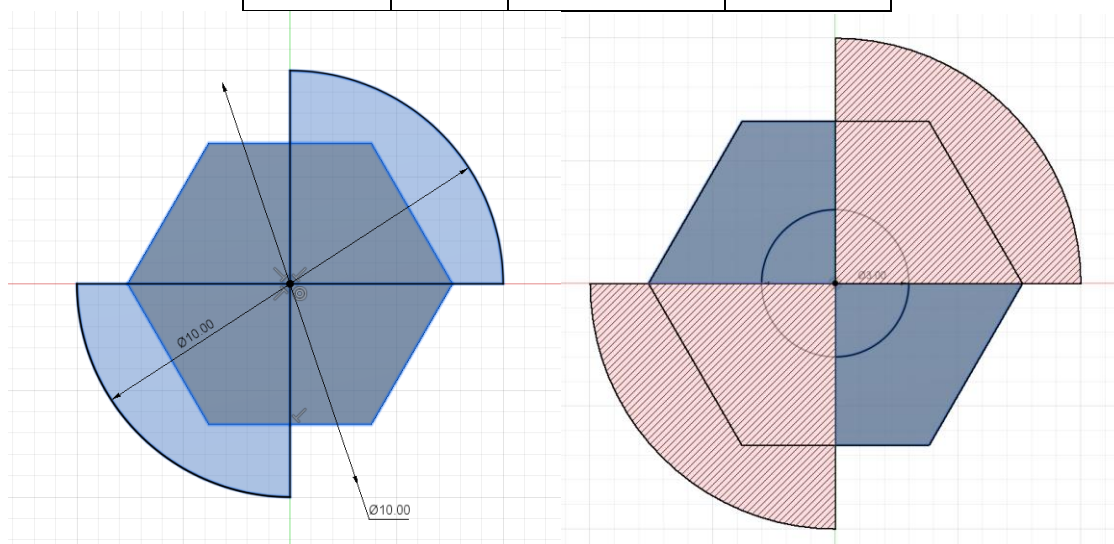
Nejlépe se osvědčil návrh za použití komponentů pro vodovodní instalace. V první verzi tohoto upraveného extruderu byl využit vrták do dřeva o průměru 10 mm, který byl zkrácen na potřebnou délku 135 mm. Tento vrták byl použitý z důvodu mechanické pevnosti jeho ostrých kovových hran. Materiál vrtáku navíc dosahuje nižšího odporu tření a díky tomu se materiál vytlačuje jednodušeji, než při použití vytisknuté šnekovnice. Dalším využitým komponentem je matice M16 (6), která byla rozpůlena z důvodu úspory místa. Druhá polovina působí jako kontra matice pro zajištění proti nežádoucímu pohybu. Pro vhodný způsob přívodu materiálu k trysce byl zvolen *T-kus* na který je napojený hadičník. Tento díl



je výhodný díky své vnitřní struktuře, která je dutá, tudíž po dokončení extruze ze zásobníku dokáže vyrovnat soustavu se zbytkovým setrvačným momentem. Na něj jsou namontovány 2 hadičníky. Hadičník většího průměru slouží pro přívod materiálu, hadice na něm je zajištěna hadicovou sponou. Hadičník menšího průměru slouží jako tryska o průměru 6 mm. Svou délkou ustaluje turbulentní proudění vzniklé otáčením šneku. Nevýhodou kovového vrtáku ovšem je, že není povrchově upraven pro používání v kontaktu s vodou nebo ve vlhkém prostředí. Vlivem kontaktu s vodou dochází ke korozi vrtáku. Řešením bylo využití 3D tisku a vymodelovat šnek podle vrtákové předlohy. Tento model byl dále upraven s využitím vztahů 14 až 17, které stanovují podmínky šnekové dopravy.

Tabulka 3: Navrhnuté parametry šneku.

$d_s$ (mm)	$l$ (mm)	$n_{KRIT}$ (ot/sek)	$n$ (ot/sek)
10	30	7,05	3,525



Obr. 41: Rozměry navrhnutého šneku, v mm.

## 6 Experimentální ověření

### 6.1 Tiskárna pro ověření

Extruder popsaný touto prací se prakticky ověřoval na tiskárně vyvíjené na katedře elektrotechniky a počítačového modelování. Tiskárna dosahuje rozměrů 0,8 x 0,8 x 1 m, přičemž vnitřní tisková plocha je 0,45 x 0,45 x 0,7 m. Pro pohyb v osách XYZ slouží krokové motory osazené trapézovými šrouby. Pro osu Z jsou použity 4 motory pro rozložení zatížení a stabilní posuv v této ose. Řízení použitých motorů v osách obstarává Arduino MEGA2560, osazené RAMPS shieldem, který byl vytvořen za obecným účelem řízení tříosých zařízení. Tento shield posílá signály na drivery jednotlivých motorů pro každou osu zvlášť. Pro stabilizaci vnitřní nosné konstrukce extruderu byly rohové vnější nosné profily osazeny lineárními podepřenými tyčemi. Jejich protikusy jsou připevněny na vnitřním čtverci, který nese pohyb v osách X a Y. Konstrukce nesoucí část s tiskovou hlavou je umístěna na dvou podepřených tyčích jak v ose X tak v ose Y.

### 6.2 Použitý materiál

Zvolený materiál pro první experimenty byla samo tvrdnoucí hmota od italské firmy DAS. Jedno balení obsahuje 500 gramů modelovací hlíny. Tato hmota byla zvolena z důvodu dostupnosti a cenové příznivosti. Od běžné keramické hlíny se liší tím, že není potřeba vypalovat a ztvdne přirozeně po vystavení vzduchu. Přibližná doba schnutí je výrobcem stanovena na 24 hodin, avšak záleží na vytvarovaném modelu, jeho tloušťce stěn a podobně.



Obr. 42: Balení samo tvrdnoucí hmoty DAS.

Pro keramickou hlínu se dle teoretických předpokladů, viz kapitola 3.2.1, uvažuje poměr 70 % materiálu ku 30 % hmotnosti vody z celkové smíchané směsi. Pokud bychom aplikovali výše uvedené teoretické znalosti a vzali v potaz maximální váhu materiálu, kterou je schopen pojmout zásobník, tj. 0,45 kg, tak jednoduchým výpočtem dostaneme potřebnou hmotnost vody a samo tvrdnoucí hmoty.

$$m_1 = 0,3 \cdot m_c = 0,3 \cdot 0,4 = 0,12 \text{ kg} \quad 18$$

Kde  $m_1$  je hmotnost suché nezředěné hmoty,  $m_c$  je hmotnost suché hmoty.

Hmotnost potřebné vody tedy činí 0,12 kg. Jelikož materiál neodpovídá běžně používanému materiálu při výrobě keramiky, bylo nutné přistoupit na určité úpravy. Ty spočívaly ve zředění směsi jiným poměrem vody. Vhodný poměr vody u tohoto materiálu nebyl stanoven přesně neboť s narůstajícím množstvím experimentů se měnil, avšak průměrně se pohyboval okolo 20 % váhy hmoty.



Obr. 43: První dvě vrstvy výtisku.

Druhým materiálem použitým při experimentech byla Aga hrnčířská hlína. Po otevření obalu bylo nutno hlínu nechat vyschnout jelikož byla zakonzervována s neznámým poměrem vody. Po vyschnutí následovalo nadrcení a mixování s vodou pro stanovení správného poměru hlíny a vody. Ani u tohoto materiálu se neprokázal teoreticky stanovený poměr. Oproti samo tvrdnoucí směsi bylo zapotřebí místo ubrání vody ji přidat. Vhodný poměr vody a hlíny po experimentálním vyzkoušení je stanoven následovně.

$$Pom_{H/V} = \frac{m_2}{m_c} = \frac{0,423}{0,673} \cdot 100 = 62,85 \% \quad 19$$

Kde  $Pom_{H/V}$  je poměr hmotnosti hlíny k přidané vodě v celkové hmotnosti materiálu,  $m_2$  je hmotnost suché AGA hlíny,  $m_c$  je hmotnost smíchané směsi.

Jak se tedy experimentálně ukázalo, potřebný poměr dostupné hlíny a vody vychází zhruba na 63 % podílu hlíny vůči 37 % hmotnosti vody z celkové hmotnosti.

### 6.3 Popis chování materiálu v soustavě

Keramickou hlínu nelze řadit mezi pevné ani kapalně skupenství látek. Jedná se o tzv. newtonovskou kapalinu, tudíž se na ni nevztahují Newtonovy zákony viskozity. Jinými slovy neexistuje přímá úměra mezi napětím a rychlostí deformace. Reologické chování takovéto kapaliny je složité určit, jelikož se odvíjí od složení, teploty, tlaku a dalších podmínek. V případě kdy má každý materiál jiné složení je obtížně generalizovat chování keramických směsí. Bohužel v důsledku neznalosti těchto materiálových veličin u použitých keramik a nedostatku času na jejich ověření nelze přesně definovat chování těchto materiálů. To ostatně potvrdila i kapitola 6.2, která vyvrátila teoretický předpoklad o poměrech hmotností vody a hlíny.

### 6.4 Stanovení poměru rychlostí motorů

Pro dosažení optimální extruze materiálu z trysky je nutno správné nastavení rychlostí otáčení jednotlivých motorů. Pro tento účel byla využita znalost objemu nádoby společně s výpočtem objemu modelovaného šneku. Níže uvedené údaje udávají poměr mezi ozubenými koly a stoupáním trapézového šroubu. Pro vytlačení pístu o velikost stoupání trapézového šroubu, tj. pro vykonání jedné otočky trapézového šroubu, je nutné otočit hřídeli motoru 1,429krát.

$$mod = \frac{z_2}{z_1} = \frac{20}{14} = 1,429 \quad 20$$

Kde  $mod$  je poměr ozubených kol.

$$mod = \frac{n_{MOT}}{n_{\text{ŠROUB}}} \Rightarrow n_{\text{ŠROUB}} = \frac{n_{MOT}}{mod} = \frac{1,429}{1,429} = 1 \text{ ot} \quad 21$$

Ze znalosti plochy podstavy válce lze vypočítat, jaký objem materiálu, při zanedbaném tvaru zakončení válce, je vytlačen za jednu otáčku trapézového šroubu.

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,0238^2 = 1,782 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad 22$$

Kde  $S$  je plocha podstavy válce,  $r$  je poloměr zásobníkového válce.

$$V_{\text{válec}} = S_{\text{válec}} \cdot l = 1,782 \cdot 10^{-3} \cdot 0,003 = 5,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad 23$$

Kde  $V_{\text{válec}}$  je objem válce pro výšku 3 mm,  $l$  je stoupání trapézového šroubu.

Aby bylo dosaženo optimální extruze materiálu, tak musí platit rovnice kontinuity. Ta říká, že pokud je někde nestlačitelné proudící médium, tak se objem tohoto média nemění při průchodu oblastí různých velikostí. Jinými slovy, médium přechodem přes oblast menšího nebo většího průřezu upravuje svou rychlost pro zachování konstantního objemu.

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad 24$$

Kde  $S_1$  je plocha průřezu první oblasti,  $v_1$  je rychlost média v první oblasti,  $S_2$  je plocha průřezu druhé oblasti,  $v_2$  je rychlost média v druhé oblasti.

Zbývá návrh rychlosti otáčení šneku, který zajišťuje extruzi materiálu na tiskovou plochu. Ze zvolených parametrů byl vypočítán obsah průřezu. Vynásobením průřezu stoupáním závitu šneku lze dostat

$$S_{\text{ŠNEK}} = \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} + \frac{\pi \cdot r_2^2}{2} = \frac{\pi \cdot 0,0015^2}{2} + \frac{\pi \cdot 0,005^2}{2} = 42,8 \text{ mm}^2 \quad 25$$

Kde  $r_1$  je poloměr hřídele šneku,  $r_2$  je poloměr šnekovnice,  $S_{\text{ŠNEK}}$  je plocha průřezu.

$$V_{\text{ŠNEK}} = S_{\text{ŠNEK}} \cdot l_{\text{ŠNEK}} = 42,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,03 = 1,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad 26$$

Kde  $V_{\text{ŠNEK}}$  je objem hmotné části šneku jedné otáčky,  $l_{\text{ŠNEK}}$  je stoupání šneku.

Pouhým odečtením objemu šneku od objemu jeho válcové části jsme schopni získat výsledný objem, který po vydělení objemem válce určí správný poměr rychlostí jednotlivých extruderů.

$$V_{\text{Nádoba}} = S_{\text{nádoba}} \cdot l_{\text{ŠNEK}} = \pi \cdot 0,005^2 \cdot 0,03 = 2,356 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad 27$$

$$\begin{aligned} V_{\text{Materiál}} &= V_{\text{Nádoba}} - V_{\text{ŠNEK}} = 2,356 \cdot 10^{-6} - 1,28 \cdot 10^{-6} \\ &= 1,076 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad 28$$

Kde  $V_{\text{Materiál}}$  je objem materiálu, který je na šneku v jednom závitu.

$$k = \frac{V_{\text{Válec}}}{V_{\text{Materiál}}} = \frac{5,35 \cdot 10^{-6}}{1,076 \cdot 10^{-6}} = 4,97 \quad 29$$

Kde  $k$  je konstanta znásobující rychlost motoru tiskové hlavy oproti motoru zásobníku.

## 6.5 Tisk

Praktické ověření probíhalo s robustní konstrukcí tiskové hlavy zobrazené na obr. 40. Část zásobníku použitého při experimentech je zobrazena na obr. 33. Prvním materiálem pro zkoušku tisku je samo tvrdnoucí hmota, kterou se po několika nezdárných pokusech podařilo namíchat v optimálním poměru vhodného pro tisk. Po ověření tisku samo tvrdnoucí směsi se přešlo k tisku keramické hlíny. Tiskárna a její ovládání je řešeno skrz program *Pronterface* a řídicího mikrokontroleru Arduino Mega. Program je open source softwarem dostupným pro řízení zařízení tohoto typu. Pro vyhovující tisk byl použit poměr rychlostí motorů 5 ku 1, kdy rychlejším motorem byla poháněna tisková hlava. Jeden z důležitých aspektů, které experimentální ověření ukázalo, je umístění šnekovnice v hlavě

trysky. Je důležité, aby byla vyústění co nejbližší, jinak dojde k ucpání trysky a potenciálně k destrukci tiskové hlavy. Stejně jako to, aby průměr šnekovnice dosahoval stěn trysky.



Obr. 44: Průběhu tisku keramické hlíny.



Obr. 45: První výtisky.

Lze si povšimnout nedostatků prvních výtisků, viz obr. 45: první výtisky., které dosahují nerovnoměrných stěn a nekonstantního dávkování materiálu. Zmíněné problémy je možno odstranit pomocí úpravy v SW.



Obr. 46: Tisk po úpravě nastavení v SW.

## Zhodnocení a závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout, zkonstruovat a ověřit funkčnost prototyp extruderu pro tisk keramických materiálů. Uvedené cíle se podařilo splnit. Návrh probíhal variačně, tedy vytvořením širokého spektra modelů s různými rozměry, u kterých následovalo ověření funkčnosti. Prototypová finální verze extruderu je rozdělena na dvě části, zásobníkovou a část s tiskovou hlavou. Zásobníková část je navržena a zkonstruována s ohledem na úsporu materiálu spolu s dostatečnou schopností odolat mechanickému namáhání. Tisková hlava je navržena dle principu šnekového podavače, který dodává materiál skrze trysku na tiskovou podložku. Experimentálně bylo ověřeno použití mechanického provedení extruderu schopného kontinuálního tisku, byla prokázána potřeba robustnějších dílů tiskové hlavy, byl odhalen negativní vliv širokého návrhu šnekovnice na extruzi materiálu. Poloha šnekovnice by měla být co nejbližší trysky a měla by dosahovat rozměrů průměru vodící trubice. Byly provedeny počítačové simulace dílů, u kterých experimentálně došlo ke zjištění chybného návrhu. Tyto nedostatky byly simulacemi potvrzeny a z dosažených výsledků byly navrženy úpravy pro jejich odstranění. Vlastnosti použitých materiálů byly základně prozkoumány. Byl zjištěn optimální poměr hlíny a vody pro jednotlivé materiály. Nedošlo k normalizaci optimální hodnoty poměru vody a suché hlíny, z důvodu přílišných rozdílů ve složení. Pro stanovení poměru byla využita hmotnostní metoda měření konzistence směsi.

Po funkční stránce navržený extruder splňuje svůj základní účel, avšak existují určitá zlepšení, kterých by se mohlo dosáhnout. Například odstranění převodových kol pro eliminaci nepřesností tisku v rozměrech. Při prvotních testech se kola otáčela nerovnoměrně u trapézového šroubu a docházelo k jeho vyosení. Tím došlo k prokázání nevhodnosti 3D tištěných dílů při požadavku na velkou přesnost. Vytisknuté díly nejsou vhodné ani z pevnostního hlediska, které dokazuje mnoho popraskaných variant šnekovnic. Dále by bylo vhodné použít pro konstrukci extruderu materiály výhradně nerezové.

Dalším možným pokračováním této práce je taktéž věnování více času výzkumu materiálu. Nedošlo k dostatečnému prozkoumání materiálových vlastností, které by pomohly lépe stanovit požadavky na jednotlivé části extruderu nebo pro sestavení počítačového modelu této hmoty, pomocí kterého by mohli být provedeny další simulace. Dalším potenciálním směrem práce by mohlo být stanovení tlakových vztahů, které působí v sestavě a mohly by pomoci v popisu chování materiálu.

## 7 Literatura

- [1] ŠVÁRA, Ondřej. *3D technologie jde do války: tištěné bunkry z Vysočiny poslouží v armádě* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: [https://trebicky.denik.cz/zpravy\\_region/3d-technologie-jde-do-valky-tistene-bunkry-ze-zdaru-poslouzi-v-armade-20230426.html](https://trebicky.denik.cz/zpravy_region/3d-technologie-jde-do-valky-tistene-bunkry-ze-zdaru-poslouzi-v-armade-20230426.html)
- [2] KREJZEK, Ladislav. *ADITIVNÍ VÝROBA ODLEHČENÝCH STRUKTUR* [online]. Praha, 2019 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/90018>. Diplomová práce. ČVUT, FS, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. Vedoucí práce Ing. Jan Šimota.
- [3] AUGUR, Hannah. 3D Printed Coral Reef Could Save the Oceans. In: *All3DP.com* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/3d-printed-coral-reef-thing-future/>
- [4] Bezpečný pracovní postup do každého typu výroby. In: *3D wiser* [online]. Praha: 3D wiser, 2021 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/kovy/markforged-metal-x/?msclkid=52024ad862631768dbb52e80b721a517>
- [5] SPURNÝ, Radek. *Metodika testování tištěných 3D struktur* [online]. Plzeň, 2021 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/44792>. BP. ZČU FEL. Vedoucí práce Pavel Karban.
- [6] Binder Jetting 3D Printing: Everything You Need To Know. *3d source* [online]. 2020 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/guides/binder-jetting/>
- [7] VAN BOCHOVE, Bas, Sedigheh BORANDEH a Jukka SEPPÄLÄ. 3D inkjet-printing of photo-crosslinkable resins for microlens fabrication. *Additive Manufacturing* [online]. 2022, **50**(102534) [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102534](https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102534)
- [8] *What is Liquid Deposition Modeling?* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.voxelmatters.com/additive-manufacturing/am-technologies/what-is-liquid-deposition-modeling/>
- [9] WEI, Zhang, C Leu MING, Ji ZHIMING a Yan YONGNIAN. Rapid freezing prototyping with water. *Materials & Design* [online]. 1999, **1999**(20), 139-145 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00020-5](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00020-5)



- [10] Výpal keramiky. In: *Www.malujkeramiku.cz* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.malujkeramiku.cz/jak-to-funguje/>
- [11] TOMS, Petr. Pálení keramiky pro středně pokročilé. *Keramikum* [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://keramikum.cz/clanek/paleni-keramiky-pro-stredne-pokrocile>
- [12] *Ceramic Resin: Usage and design guide* [online]. In: . s. 1-11 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://archive-media.formlabs.com/upload/ceramic-user-guide.pdf>
- [13] SKÁCEL, Vladimír, Jana FIEDLEROVÁ a Karel NEJEZCHLEB. *Keramické materiály a jejich použití v elektrotechnice* [online]. 5 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <http://www.t-ceram.com/CSVTS-2006.pdf>
- [14] Keramický izolátor. In: *Kamat.cz* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fobchod.kamat.cz%2Fcategories%2Fizolatory-nn-a-vn-plastove-a-keramicke&psig=AOvVaw2PkCqfoTIdDYCxsZFDRNg&ust=1684273932977000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCLCG8byn-P4CFQAAAAAdAAAAABAH>
- [15] KŘEČEK, Tomáš. *Součástky na bázi SiC* [online]. In: . s. 8 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <http://old.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2007/03/Krecek.pdf>
- [16] *Kondenzátory* [online]. In: . [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zel/kondenzatory.htm>
- [17] *Tronxy Moore 3* [online]. In: . [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.tronxy3d.com/products/tronxy-moore-3-pro-ceramic-clay-3d-printer>
- [18] 3D WASP 2040 clay printer. In: *3D wasp* [online]. [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.3dwasp.shop/en/prodotto/clay-3d-printer-delta-wasp-2040-clay/>
- [19] *3D PotterBot 10 XL* [online]. In: . [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://3dpotter.com/printers/potterbot-10-xl>
- [20] *Eazao Zero Cerambot* [online]. In: . [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.eazao.com/product/eazao-zero/>
- [21] *Cerambot Extruder* [online]. In: . 2021 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.cerambot.com/how-to-solve-the-problem-of-clay-leakage-on-the-top-of-the-cerambot-extruder/#>

- [22] HEERIK, Yao van den. *Dual extrusion setup* [online]. In: . [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://3dclayprinting.com/?p=903>
- [23] GUNN, Jeff. *Stepper-driven paste extruder for Delta-type printers* [online]. In: . [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:969045>
- [24] KEEP, Jonathan. *A Guide to Clay 3D printing* [online]. In: . s. 1-80 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <http://www.keep-art.co.uk/Journal/JKeep-Guide%20to%20Clay%203D%20Printing%20-%202020.pdf>
- [25] KEEP, Jonathan. *Formulating and Testing a Clay Body for Extrusion Clay 3D Printing* [online]. In: . 2020, s. 64-71 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <http://www.keep-art.co.uk/Journal/JKeep-Guide%20to%20Clay%203D%20Printing%20-%202020.pdf>
- [26] Material Density Tables To Help Estimate Earthwork volumes. In: *Www.cat.com* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: [https://www.cat.com/en\\_US/articles/ci-articles/earthwork-volumes-reference-tables.html](https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/earthwork-volumes-reference-tables.html)
- [27] *Lis na těsto* [online]. In: . [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.oriondomacipotreby.cz/lis-na-testo-se-zdobickou-141743>
- [28] *Katalog kuličkových šroubů* [online]. In: . s. 13-14 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.hiwin.cz/download/cd5d1a50e11cb4e2503bd18e3571c20d>
- [29] 86CM35 - 2fázový krokový motor. In: *CNC shop* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/86cm35-krokovy-2-fazovy-motor-3-5nm>
- [30] Trapézová přírubová matice. In: *CNC shop* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/trm-brfl-trapezova-matice-bronz>
- [31] 57CM13 - 2fázový krokový motor. In: *CNC shop* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/57cm13-krokovy-2-fazovy-motor-1-3nm>
- [32] SKÁCEL, Kamil. *Návrh šnekového podavače pro dopravu uhelného prášku* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/71533>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [33] POLÁK, Jaromír. *Dopravní a manipulační zařízení II*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0493-x.
- [34] BÜCHLER, Martin. *Průvodce nabídkou 2017 - 2018* [online]. In: . s. 1-44 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68317253-Komorova-pec-rohde-ke-250-n-str-8.html>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Vytištěný korálový útes [3]. .....	- 3 -
Obr. 2: Ukázka vytištěné struktury kovového výrobku [4]. .....	- 3 -
Obr. 3: Příklad vypalování keramiky [10]. .....	- 6 -
Obr. 4 Keramické výrobky v peci před výpalem [11]. .....	- 7 -
Obr. 5 Teoretický předpoklad průběhu teploty vypalování keramiky [12]. .....	- 8 -
Obr. 6: Ukázka keramického izolátoru [14]. .....	- 9 -
Obr. 7: Ukázka keramických kondenzátorů [16]. .....	- 10 -
Obr. 8 Tronxy Moore 3 [17]. .....	- 11 -
Obr. 9: Vypalování výtisku z keramického resinu Formlabs [12]. .....	- 12 -
Obr. 10: Delta WASP 2040 Clay [18]. .....	- 12 -
Obr. 11: 3D PotterBot 10 XL [19]. .....	- 13 -
Obr. 12 Tiskárna Cerambot Eazao [20]. .....	- 14 -
Obr. 13: Extruder tiskárny Cerambot [21]. .....	- 15 -
Obr. 14: Ukázka jednoduchosti pneumatické části extruderu [22]. .....	- 15 -
Obr. 15: Příklad mechanického řešení extruderu [23]. .....	- 16 -
Obr. 16 Rozměry a tvar testovací tyče, rozměry v mm [24]. .....	- 17 -
Obr. 17: Lis na těsto Orion [27] .....	- 19 -
Obr. 18: Konstrukční provedení držáku zásobníku (1 – tělo držáku; 2 – držáky vodících tyčí; 3 – vodící tyče; 4 – nádoba/zásobník; 5 – konstrukční díry pro napojení). .....	- 21 -
Obr. 19: Ukázka použité trapézové přírubové matice [30]. .....	- 21 -
Obr. 20: Popsaný návrh pístu (1 – výtlačná plocha; 2 – stojné pilíře; 3 – lineární kuličková ložiska; 4 – Trapézová přírubová matice; 5 – trapézový šroub; 6 – doraz pro koncový snímač; 7 – uchycení lineárních ložisek) .....	- 22 -
Obr. 21: Opravená verze modelu pístu. ....	- 23 -
Obr. 22: První verze uchycení kuličkového ložiska. ....	- 23 -
Obr. 23: Sestava ozubených kol, držáku motoru a ložiska. ....	- 24 -
Obr. 24: Opěrný domek axiálního ložiska. ....	- 25 -
Obr. 25: Deformovaný domek (vlevo) oproti nedeformovanému (vpravo). ....	- 25 -
Obr. 26: Simulace působení axiální síly. ....	- 26 -
Obr. 27: Silové působení třecích sil na trapézový šroub. ....	- 26 -
Obr. 28: Simulace opěrného domku s plnou výplní. ....	- 29 -
Obr. 29: Parametry optimalizace tvaru. ....	- 29 -

Obr. 30: Optimalizace tvaru.....	- 30 -
Obr. 31: Držák radiálního ložiska a opěrné místo pro axiální ložisko.....	- 30 -
Obr. 32: Zakončení zásobníku. ....	- 31 -
Obr. 33: Celkový model zásobníkové části extruderu. ....	- 31 -
Obr. 34 : Krokový motor 57CM13 [31].....	- 32 -
Obr. 35: Návrh s širokým šnekem. ....	- 35 -
Obr. 36: Ukázka nedostatků spojení spojky a šnekovnice.....	- 35 -
Obr. 37: Šnek spojený s motorovou spojkou. ....	- 36 -
Obr. 38: Šnekovnice s malým průměrem nosné hřídele. ....	- 36 -
Obr. 39: Šnekovnice malého průměru. ....	- 37 -
Obr. 40: Finální verze extruderu (1 – krokový motor; 2 – držák motoru; 3 – motorová spojka; 4 – šnek; 5 – příruba; 6 – matice M16; 7 – spojovací tyč; 8 – T-kus 3/8“; 9 – hadičník 3/8“ přívodní; 10 – hadičník 3/8“ tryskový).....	- 37 -
Obr. 41: Rozměry navrhnutého šneku, v mm. ....	- 38 -
Obr. 42: Balení samo tvrdnoucí hmoty DAS.....	- 39 -
Obr. 43: První dvě vrstvy výtisku. ....	- 40 -
Obr. 44: Průběhu tisku keramické hlíny. ....	- 43 -
Obr. 45: První výtisky.....	- 43 -
Obr. 46: Tisk po úpravě nastavení v SW. ....	- 43 -

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry vybraného motoru 86CM35 [29].....	- 20 -
Tabulka 2: Parametry vybraného motoru 57CM13 [31].....	- 32 -
Tabulka 3: Navrhnuté parametry šneku. ....	- 38 -