



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE ŠNEKOVÉHO EXTRUDÉRU PRO ROBOTICKÝ 3D TISK Z PELET

DESIGN OF SCREW EXTRUDER FOR ROBOTIC 3D PRINTING FROM PELLETS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Machač

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr
Křivohlavý

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Radim Machač**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Křivohlavý**
Akademický rok: 2022/23

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

Konstrukce šnekového extrudéru pro robotický 3D tisk z pelet

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Robotický 3D tisk se používá pro tisk velkorozměrových dílů, proto je vhodné využít extrudér s větší tryskou a vyšším průtokem materiálu. K těmto účelům se používají například šnekové extrudéry, které jako vstupní surovinu využívají plastové pelety. Díky tomu lze zpracovávat i materiály nevhodné pro výrobu filamentu (plněné materiály), nebo dřev z nepovedených tisků na běžných tiskárnách. Zároveň je tato vstupní surovina levnější než zpracovaný filament.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je návrh šnekového extrudéru, vhodného jako koncový efektor robotického šestiosého ramene.

Díličí cíle bakalářské práce:

- rešerše, identifikace klíčových konstrukčních uzlů,
- návrh variant řešení,
- výběr a zpracování nejvhodnější varianty.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

KOČAŘ, Jiří. Konstrukce extrudéru pro aditivní výrobu vysoce plněných termoplastů. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117707>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Škaroupka.

GILES JR, Harold F, Eldridge M MOUNT III a Jr. WAGNER. Extrusion. Norwich: Elsevier Science & Technology Books, 2004. ISBN 0815514735.

BOYD, Robert Platt, Christopher WELLER, Anthony DISANTO, Melody REES a Bruce HILBERT. Cellular Fabrication and Apparatus for Additive Manufacturing. 2017, roč. US2017, č. 19.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout šnekový extruder vhodný na 3D tisk, který bude schopen zpracovávat levné plastové pelety namísto filamentu. První část práce se věnuje součástem extruderu, procesem extruze a využitím této technologie zpracování polymerů při návrhu šnekového extruderu pro 3D tisk.

Je vytvořen model extruderu s ohledem na minimální rozměry a hmotnost. Při návrhu byly kladeny požadavky na jednoduchost údržby.

Výsledkem je extruder umožňující velkoobjemový i maloobjemový tisk, který se dle provedených výpočtů vyrovná rychlostem tisku běžných 3D tiskáren.

Tato práce poslouží v oblasti využitelnosti levných plastových pelet jako vstupního materiálu pro 3D tisk. Svým obsahem navíc přispívá k rozvíjení návrhů šnekových extruderů vhodných pro použití v laboratořích či průmyslu.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, šnekový extruder, FDM technologie, extruze

ABSTRACT

The goal of this bachelor thesis was to design a screw extruder suitable for 3D printing, which will be able to process cheap plastic pellets instead of filament. The first part of the work is devoted to the extruder components, the extrusion process and the use of this polymer processing technology in the design of a screw extruder for 3D printing.

An extruder model is created with regard to minimum dimensions and weight. During the design, requirements were set for ease of maintenance.

The result is an extruder that enables both large-volume and small-volume printing, which, according to the calculations, is equal to the printing speed of ordinary 3D printers.

This work will serve in the area of the usability of cheap plastic pellets as an input material for 3D printing. With its content, it also contributes to the development of screw extruder designs suitable for use in laboratories or industry.

KEYWORDS

3D printing, screw extruder, FDM technology, extrusion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHAČ, Radim. Konstrukce šnekového extruderu pro robotický 3D tisk z pelet. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149609>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Petr Křivohlavý.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval mému vedoucímu práce, panu Ing. Křivohlavému, za věcné připomínky a cenné rady při psaní bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině nejen při psaní této práce, ale také za podporu v průběhu celého studia na vysoké škole.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Petra Křivohlavého. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 13 |
| 2 | PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ | 14 |
| 2.1 | Extruder | 14 |
| 2.1.1 | Extrudery využívané pro aditivní technologie | 14 |
| 2.2 | Součásti šnekového extruderu | 17 |
| 2.2.1 | Pohonná jednotka | 17 |
| 2.2.2 | Převodovka | 18 |
| 2.2.3 | Spojka | 19 |
| 2.2.4 | Násypka | 19 |
| 2.2.5 | Šroub a extruze | 22 |
| 2.2.6 | Tavící komora | 27 |
| 2.2.7 | Topná tělesa | 28 |
| 2.2.8 | Tryska | 30 |
| 2.2.9 | Komerční dostupná řešení | 32 |
| 2.3 | Materiály | 37 |
| 2.3.1 | ABS (Akrylonitril-butadien-styren) | 37 |
| 2.3.2 | PLA (Polylactic acid – kyselina polymléčná) | 37 |
| 2.3.3 | PET/PET-G (Polyetylén tereftalát-glykol) | 38 |
| 2.4 | Robot KUKA | 39 |
| 3 | ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE | 41 |
| 3.1 | Analýza problému | 41 |
| 3.2 | Cíl práce | 42 |
| 4 | KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ | 43 |
| 4.1 | Obecný popis uspořádání | 43 |
| 4.1.1 | Paralelní uspořádání | 43 |
| 4.1.2 | Sériové uspořádání | 43 |
| 4.2 | Pohon | 44 |
| 4.3 | Typ šneku | 44 |
| 4.3.1 | Kompresní šnekový šroub | 45 |
| 4.3.2 | Nekonvenční šnekový šroub | 46 |
| 4.3.3 | Teoretický průtok extruderem | 46 |
| 4.3.4 | Teoretický výpočet průtoku pro kompresní šnek a hadovitý vrták | 52 |
| 4.4 | Volba topného tělesa | 55 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.4.1 | Výpočet výkonu topného tělesa | 55 |
| 4.4.2 | Typ topného tělesa | 57 |
| 4.5 | Systém upevnění hotendu | 58 |
| 4.6 | Typ trysky | 60 |
| 4.7 | Typ chlazení | 61 |
| 4.8 | Shrnutí výběru | 62 |
| 5 | KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ | 65 |
| 5.1 | Coldend | 65 |
| 5.1.1 | Pohon | 65 |
| 5.1.2 | Násypka | 66 |
| 5.1.3 | Uložení komponent | 67 |
| 5.1.4 | Příruba | 68 |
| 5.2 | Hotend | 70 |
| 5.2.1 | Chladič | 70 |
| 5.2.2 | Komora | 72 |
| 5.2.3 | Šnek | 72 |
| 5.2.4 | Topný blok | 73 |
| 5.2.5 | Tryska | 73 |
| 5.3 | Analýza tlaků a sil | 74 |
| 5.4 | Řídící elektronika | 79 |
| 6 | DISKUZE | 81 |
| 7 | ZÁVĚR | 82 |
| 8 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 83 |
| 9 | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN | 88 |
| 9.1 | Seznam zkratk | 88 |
| 9.2 | Seznam symbolů | 88 |
| 10 | SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ | 92 |
| 11 | SEZNAM TABULEK | 96 |
| 12 | SEZNAM PŘÍLOH | 97 |

1 ÚVOD

3D tisk je rapidně rostoucí technologie umožňující tisk téměř čehokoliv, od jednoduchých tvarů až po komplexní modely z různých druhů filamentů. Za poslední desetiletí se tato technologie neskutečně rychle rozvinula. Nejrozšířenější formou tisku se stala technologie FDM (Fused Deposition Modeling) díky své jednoduchosti a cenové dostupnosti.

Běžné 3D tiskárny na způsobu FDM fungují tak, že se filament přivádí do extruderu. Uvnitř extruderu je posouván mechanismem, čítající ozubené a přítlačné kolo, do ohřívací části označované jako hotend. Tam je materiál topným tělesem ohřát na příslušnou hodnotu tavení a vytlačen tryskou.

V návaznosti na tento rozvoj se začaly vyvíjet větší a výkonnější extrudery. Pro tisk objektů o velkých rozměrech je však filament nevýhodný kvůli jeho vysoké ceně. Z tohoto důvodu se začaly rozvíjet extrudery, které byly schopny tisknout velkoobjemové tvary a objekty z méně nákladného materiálu – plastových pelet.

Šnekové extrudery umožňují rychlejší tisk s vyšším průtokem za využití levného materiálu. V kombinaci s robotickým ramenem se naskytuje možnost tisku geometricky větších, objemnějších a komplikovanějších tvarů.

Motivací této práce je navrhnout menší verzi šroubového extruderu, který by dosahoval lepších vlastností tisku oproti běžným extruderům tisknoucích z filamentu. Měl by být schopen zpracování různých materiálů, rychlejšího tisku a vysokého průtoku při zachování malých rozměrů konstrukce.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Extruder

Extruder neboli tisková hlava, se řadí mezi nejdůležitější součásti 3D tiskárny. Hlavní funkce extruderu spočívá v natavení, vytlačení a následném nanesení materiálu v tekuté či polotekuté formě ve velké míře na tiskovou podložku. Může se však nanášet i na jiné platformy nebo modely. Postupným nanášením vrstev na sebe posléze vznikne požadovaný 3D tvar.

Ve většině případů jsou komerční extrudery malé. Obecně se extruder skládá ze dvou částí; coldend a hotend. Coldend má motor, který zajišťuje přísun materiálu dovnitř a protlačuje ho. Hotend je místo, kde se materiál roztaví a vytlačí [1].

2.1.1 Extrudery využívané pro aditivní technologie

Filament-fed extrudery

Filament-fed extrudery využívají cívky s polymerovými strunami (obecně filament), typický průměr 1,75 nebo 2,85 mm (běžně dostupný filament pro konvenční 3D tiskárny). Tato vlákna se přivádí dávkovacím mechanismem do vyhřívané tavicí komory, ke které je připojena tryska. Elektromotor, nejčastěji krokový, pohání ozubené kolo (hobbed gear) spolu s přítlačným kolem (idler gear), které dohromady posouvají filament do tavné komory. Vše je ovládáno softwarem 3D tiskárny. Toto je nejběžnější a nejrozšířenější technologie 3D tisku. Filament-fed extrudery se zpravidla dělí na dva typy – direct a bowden extruder.

- Hobbed gear (ozubené kolo) – posuv filamentu zaručen ozubením na kole



Obr. 2-1 Hobbed gear (ozubené kolo) [1].

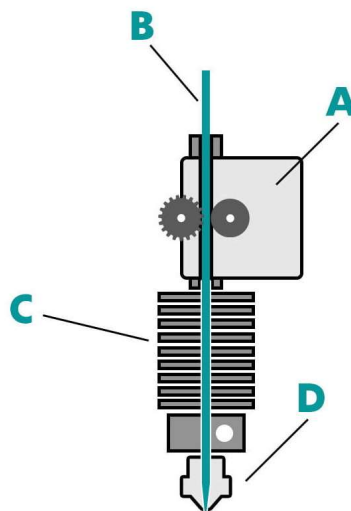
- Idler gear (přítlačné kolo) – vyvíjí přítlak na strunu k ozubenému kolu pomocí přítlačné pružiny



Obr. 2-2 Idler gear (přítlačné kolo) [1]

Direct Extruder

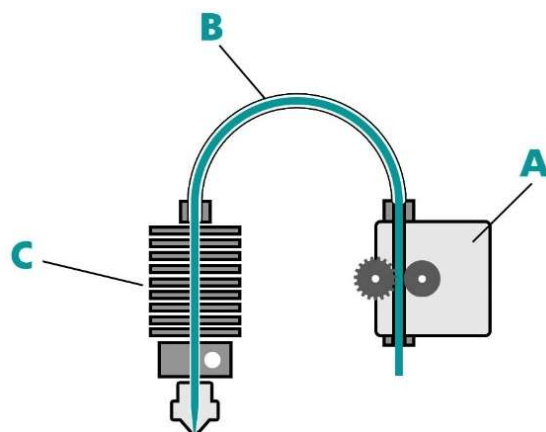
Extruder s přímým pohonem je instalován dohromady s hotendem a tlačí filament přímo do trysky. Všechny komponenty jsou umístěny na jednom místě v tiskové hlavě. Uspořádání umožňuje lepší extruzi filamentu, rychlejší retrakci materiálu, možnost tisku z flexibilních materiálů, užití menšího a slabšího motoru díky malé vzdálenosti mezi samotným extruderem a tryskou, která snižuje potřebu kroutícího momentu. Nevýhodou uspořádání je složitější údržba, čištění a také hmotnost tiskové hlavy. Vyšší hmotnost zapříčiňuje potřebu vyššího výkonu na posuv, zvýšení opotřebení ozubených řemenů a ložisek a také snížení rychlosti tisku [2,3].



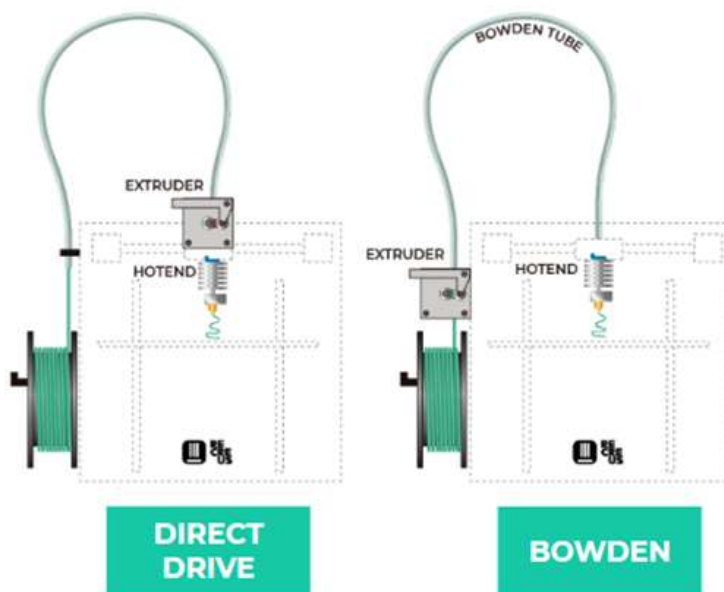
Obr. 2-3 A) dávkovací mechanismus s ozubeným kolem vlevo a přítlačným kolem vpravo; B) filament; C) chladič extruderu s topným blokem ve spodní části; D) tryska [2]

Bowden Extruder

Narozdíl od direct drive extruderu, Bowden extruder je připevněn ke stacionárnímu rámu tiskárny a tlačí filament skrz PTFE trubičku do hotendu. Tohle uspořádání umožňuje zvýšení rychlosti tisku, klidnější pohyby hlavy bez vibrací, zaručující kvalitnější tisk vrstev. Nevýhody spočívají v omezení tisku některých materiálů. Flexibilní či abrazivní filameny se mohou v PTFE trubici snadno vázat nebo ji opotřebovávat. Další nevýhodou je použití silnějšího motoru, u kterého je potřeba vyššího krouticího momentu pro překonání tření mezi filamentem a PTFE trubicí [2,3].



Obr. 2-4 A) dávkovací mechanismus; B) PTFE trubice pro vedení filamentu; C) Hotend – chladič, topný blok, tryska [2]

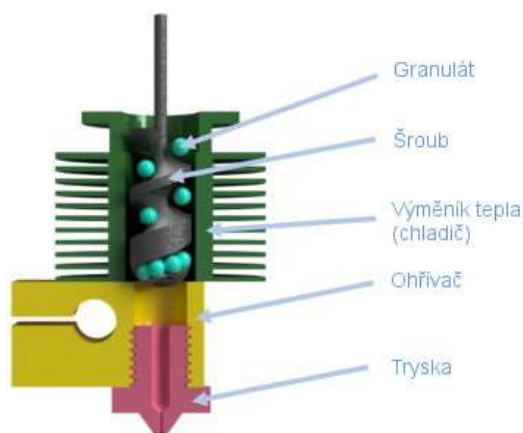


Obr. 2-5 Vlevo – konstrukční provedení direct drive extruderu; Vpravo - konstrukční provedení bowden extruderu, kde je hotend od dávkovacího mechanismu oddělen PTFE trubicí [4]

Šnekový Extruder

Šnekové extrudery nejsou v oblasti 3D tisku velmi rozšířené. Nejrozšířenější jsou v oblasti vstřikovacích lisů, avšak princip technologie extruze u 3D tisku zůstává stejný. Materiál v podobě plastových granulí, pelet nebo drtě, je přiváděn do šneku. Šnek je uložen ve válci, okolo kterého jsou umístěna topná tělesa. Motor otáčí šroubem, který posunuje polymery ve válci směrem k trysce a ven z ní. Samotná konstrukce se také dělí na hotend a coldend, avšak mechanismus na zpracování plastu (polymerů) se liší od konvenčních extruderů používaných při 3D tisku [5].

Výhodou je využívání výrazně levnějších granulí oproti filamentu, přičemž se zároveň zvyšuje průtok oproti jiným konvenčním extruderům. Hlavní nevýhodou je jeho rozměr a hmotnost, kvůli všem komponentám a jejich uspořádání.



Obr. 2-6 Řez modelem šnekového extruderu [6]

2.2 Součásti šnekového extruderu

Konstrukce a princip šnekového extruderu využívaného při 3D tisku z velké části vychází ze vstřikolisů. Problematika a poznatky týkající se technologie zpracování plastů vstřikovacími lisami jsou velmi obsáhlé. Tato práce se proto bude zabývat pouze těmi, které jsou využitelné právě v oblasti 3D tisku šnekovým extruderem.

2.2.1 Pohonná jednotka

Nejčastěji používané motory u 3D tiskáren, ať už se to týká extruderu nebo pohonu os, jsou krokové motory typu NEMA, konkrétně typ NEMA 17. Mohou se využít také u menších šnekových extruderů. Extrudery větších rozměrů a vstřikovacích jednotek jsou poháněny buď většími typy krokových motorů nebo synchronními, či asynchronními motory.

U synchronních motorů se rotor otáčí stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru generované vinutím. Otáčení je tudíž synchronní. U asynchronních motorů se rotor otáčí jinou, menší rychlostí než magnetické pole. Oba typy motorů jsou buď jednofázové nebo trojfázové.

Krokový motor je bezkomutátorový stejnosměrný elektromotor, který rozděluje plnou rotaci na stejný počet kroků. Polohu motoru lze nařídit tak, aby se pohybovala a držela v určitých krocích a používala se při požadovaném točivém momentu a rychlosti [7].

Důvodem používání krokových motorů jsou přesné nastavení rotace a otáček, relativně vysoký točivý moment, jednoduchost, nenáročnost na údržbu a zároveň jsou vysoce spolehlivé a fungují téměř v jakémkoli prostředí. Nevýhodou jejich použití je absence encoderu, který se musí pořídit. Encoder je zařízení převádějící mechanický druh pohybu na elektrický signál. Tento signál lze použít k určení polohy, rychlosti nebo směru [8,9].

2.2.2 Převodovka

Extrudery vstřikovacích lisů používají průmyslové převodovky poháněné stejnosměrným nebo střídavým elektromotorem. Ty jsou napřímo spojené se šroubem a celým strojem. Slouží ke zvýšení kroučícího momentu šroubu extruderu.



Obr. 2-7 Šroubové převodovky extruderu Duty od firmy JS Gears [10]

Převodovka využívaná u některých typů krokových motorů typu NEMA bývá také jejich součástí (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Typicky je využíváno planetových převodovek. Planetová převodovka vyniká malými rozměry při zachování vysokého převodového poměru, dosahuje menší hmotnosti oproti klasickému uspořádání, charakterizuje se vysokou účinností a tichým chodem [11].



Obr. 2-8 Krokový motor NEMA 17 se zabudovanou převodovkou s převodovým poměrem 5.18:1 [12]

2.2.3 Spojka

Spojka přenáší otáčky a kroutící moment z hnacího členu na hnaný, od motoru na šroub extruderu. Nejčastěji jsou voleny mechanicky neovládané pružné spojky. Pružná spojka omezuje rezonance a tlumí přenos vibrací. Výhodou je také kompenzace nesouososti a radiální vůle, například šroubu a komory. Nejběžnějšími provedeními jsou pružné spojky spirálové ze slitiny hliníku či pružné spojky svěrné ve třech segmentech (2 svěrné hlavice a plastový střed) [13].



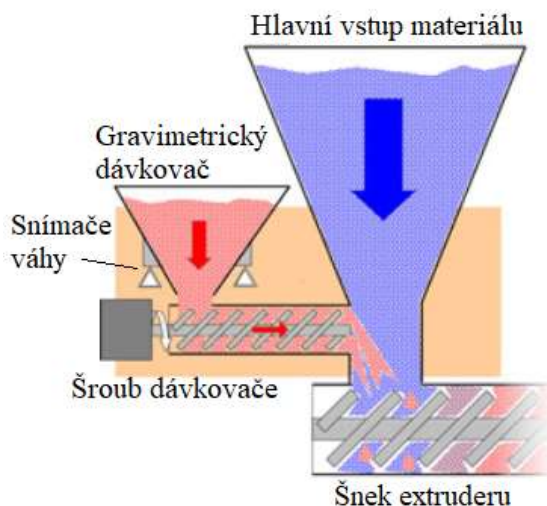
Obr. 2-9 Typy pružných spojek od výrobce COUP-LINK; vlevo – pružná spojka 6Nm svěrná LK20-C25; vpravo – pružná spojka spirálová LK2 [13]

2.2.4 Násypka

V zásadě existuje 5 způsobů, jak lze přivádět polymery do jedno šnekového extruderu. Jsou to: gravimetrické dávkování, zaplavovací zásobník (flood feed), plnění hladověním (starve feed), plnění šroubem (crammer), tavící plnění (melt feed).

Gravimetrické dávkování

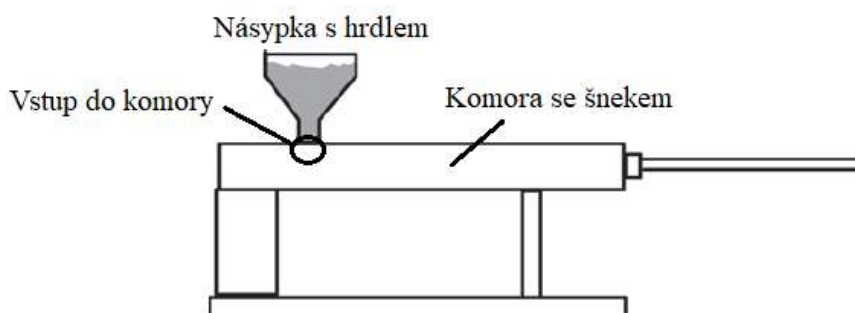
Jde o nejpřesnější způsob podávání surovin do extruderu. Zařízení je vybaveno tenzometry pro měření váhových ztrát. Pomocí těchto ztrát dokáže přesně a rovnoměrně nadávkovat určitou příměs s tolerancí několika zrn. Na trhu existují různé typy těchto podavačů: podavač se šroubem (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), vibrační pás, vážící pás atd. Nevýhodou takového násypníku je velký zástavbový prostor a pořizovací cena [14,15].



Obr. 2-10 Gravimetrický dávkovač jako přimíchávač barviva [16]

Zaplavovací zásobník (flood feed)

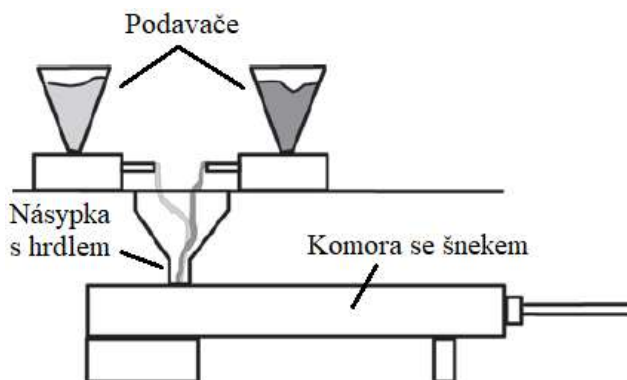
Zaplavovací zásobník je nejběžnějším typem zásobníku. Materiál o požadovaném složení je smíchán a nasypan přímo do násypky, jejíž hrdlo je přímo spojeno se šnekovou komorou (Obr. 2-11). Hnací sílu, která pohání materiál do komory, zaručuje gravitace, proto je nutné zajistit dostatečný sypný úhel. Pro PE granulát se uvádí úhel 10° , pro drť okolo $20\text{--}45^\circ$ [17].



Obr. 2-11 Extruder se zaplavovacím zásobníkem [17]

Plnění hladověním (starve feed)

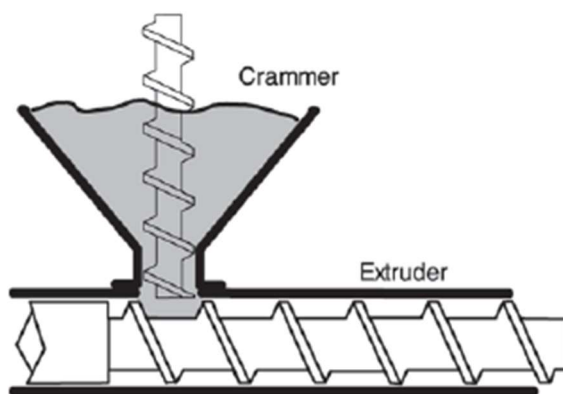
Plnění hladověním se obvykle využívá u dvoušnekového extruderu, ale může být implementováno také u jednošnekového. Z podavačů je v přesném poměru namíchaná směs dávkována do hrdla násypky, kdy je však přísun směsi regulován tak, aby se materiál nehromadil v násypce (Obr. 2-12). Podavače jsou obvykle umístěny přímo nad plnicím hrdlem [17].



Obr. 2-12 Plnění hladověním [17]

Plnění šroubem (crammer)

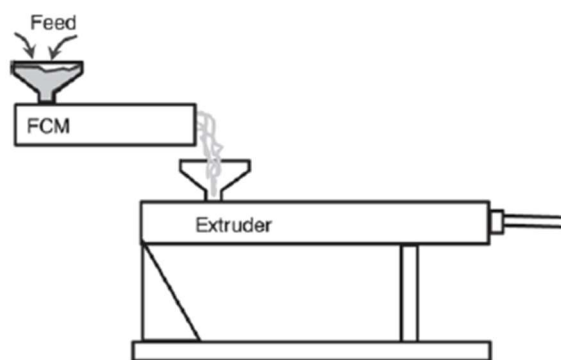
Tento dávkovací systém (Obr. 2-13) je vhodný pro materiály s velmi nízkou sypkostí, které mají tendenci v hrdle tvořit můstky nebo trychtýř (funneling). Při dávkování je nutné dávat pozor na to, aby dávkovací šnek nepřiváděl více materiálu do komory, než je samotný šnek extruderu schopný zpracovávat a vytlačovat, jinak může dojít k poškození stroje [17].



Obr. 2-13 Extruder s plnicím šroubem [17]

Tavicí plnění (melt feed)

Některé extrudery používají už roztavený materiál z jiného extruderu, který již materiál zpracoval do tekutého stavu a hlavní extruder díky tomu může mít menší rozměry (Obr. 2-14) [17].



Obr. 2-14 Extruder s tavicím plněním [17]

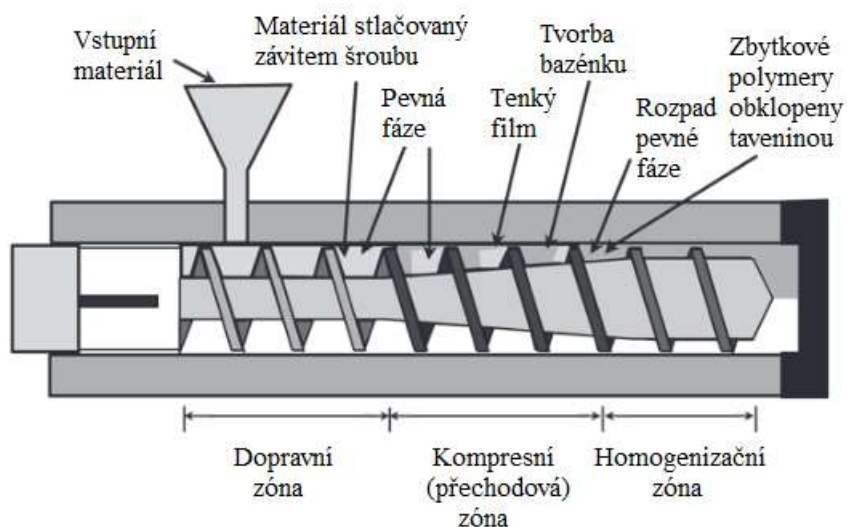
2.2.5 Šroub a extruze

Funkce šroubu v sestavě spočívá v posouvání materiálu dopředu společně se zahříváním, tavením spolu s homogenizací a mícháním. Tavenina je šroubem přemístěna do trysky.

Konvenční jednošnekový extruder

Extruzní procesy záleží odhadem z 80–90 % na teple generovaném smykovým třením polymeru mezi šroubem a stěnou tavicí komory, přičemž zbylých 10–20 % je přenášeno stěnou od topného tělesa [17].

Komoru a šroub, kde dochází k tavení polymeru, lze rozdělit do tří částí, a to na dopravní, kompresní, v některých literaturách označovanou jako přechodovou, a mísící neboli homogenizační zónu (Obr. 2-15).



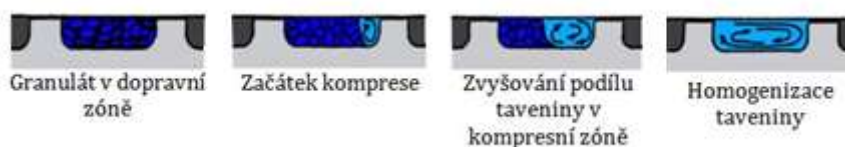
Obr. 2-15 Rozdělení extruderu do sekcí a popis jednotlivých dějů v jednotlivých fázích [17]

První zóna je označována jako dopravní nebo vstupní. Zde je hloubka závitů šroubovice šneku největší. Funkcí tohoto úseku je odebírání granulátu z násypky a jeho přesun do oblasti tavicí komory zahříváné odporovými pásy [18].

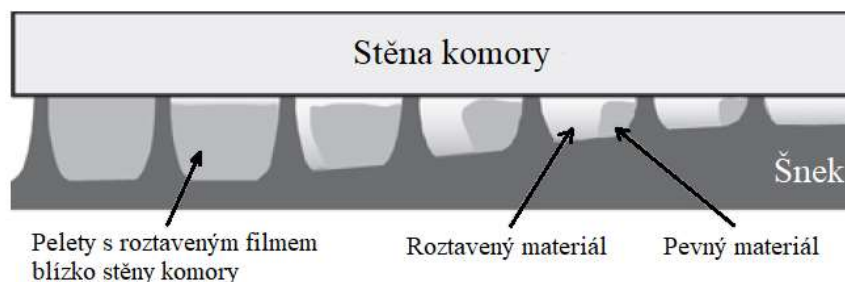
V kompresní zóně se stoupání i hloubka šroubovice šneku postupně zmenšují. Materiál je v této části intenzivně stlačován a zároveň zde dochází i ke změně skupenství polymeru. Proto se tato zóna označuje jako kompresní či přechodová.

Poslední pásmo šneku, zvané homogenizační, zajišťuje intenzivní promíchání a prohnětení taveniny plastu. Tímto je zajištěno rovnoměrné rozložení teploty taveniny před jejím vstupem do prostoru, ve kterém dochází k hromadění připravené dávky taveniny [18].

Průběh natavování plastu je potom znázorněn na obrázku (Obr. 2-16, Obr. 2-17). V dopravní zóně je materiál ve formě granulátu, postupnou kompresí dochází k vytlačování vzduchu uzavřeného mezi granulemi a zvyšuje se intenzita tření, čímž vzniká „bazének“ s rotující taveninou. Oblast taveniny se postupně rozšiřuje, až je v homogenizační zóně zastoupena pouze tavenina bez přítomnosti pevné fáze. Zde dochází k jejímu intenzivnímu hnětení v důsledku nuceného pohybu vyvolaného rotací šneku.

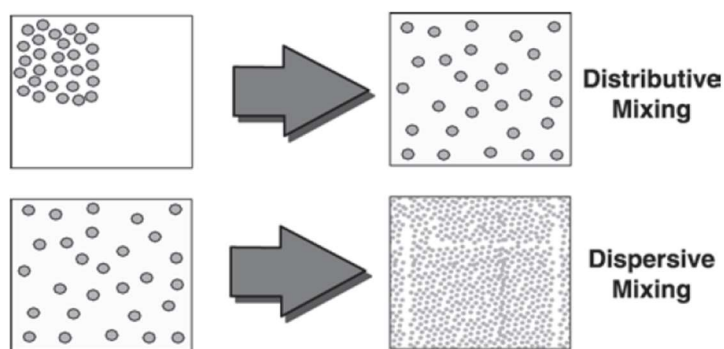


Obr. 2-16 Teoretický popis mechanismu tavení [18]



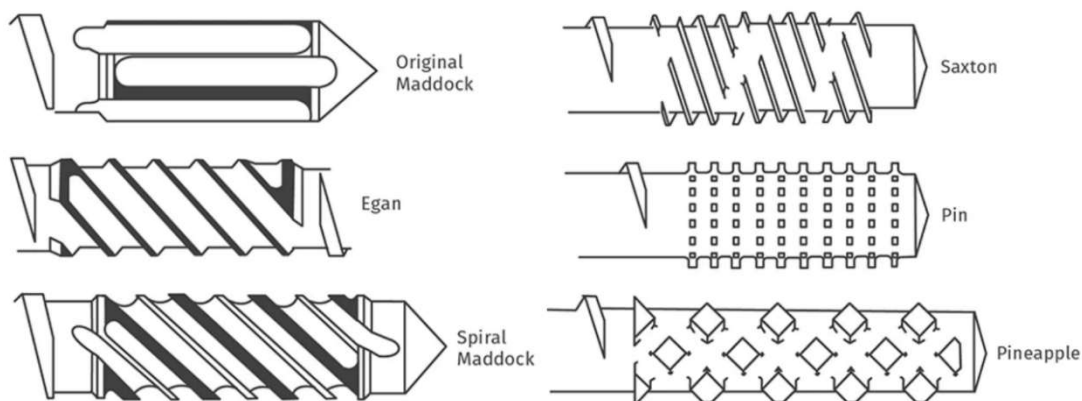
Obr. 2-17 Mechanismus tavení materiálu uvnitř komory [17]

Lze rozlišit dva způsoby směšování v závislosti na použitém šroubu – distributivní a disperzní míchání (Obr. 2-18). Distributivní míchání rovnoměrně rozděluje částice v tavenině. Disperzní míchání rozbíjí větší kusy polymerů a poté je rovnoměrně rozprostře do taveniny. Je třeba podotknout, že šroub bez míchací sekce nedosahuje tak kvalitního promíchání.



Obr. 2-18 Distributivní (horní) a disperzní (dolní) míchání [17]

Příklad použití šroubů s disperzními (vlevo) a distributivními (vpravo) míchači (Obr. 2-19).

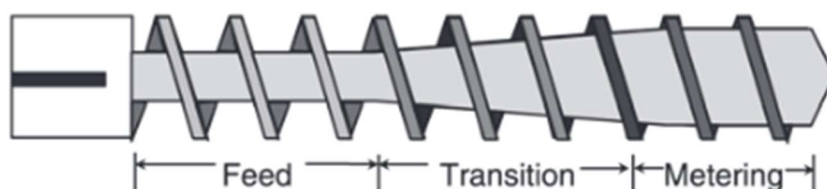


Obr. 2-19 Druhy míchačů [19]

Snahou je navrhovat šroub tak, aby jeho design a geometrie byly v souladu s tavicím procesem. Vstupní materiál, plasty, mají každý jiné vlastnosti a není tak možné vymyslet univerzální šroub, který by dokázal všechny dokonale zpracovávat. V praxi se proto navrhuje šrouby s různými parametry pro každý polymer zvlášť. Mezi nejdůležitější parametry, které zásadně ovlivňují procesy tavení, se řadí geometrie šroubu, kompresní poměr, poměr délky a průměru šroubu.

Geometrie šroubu

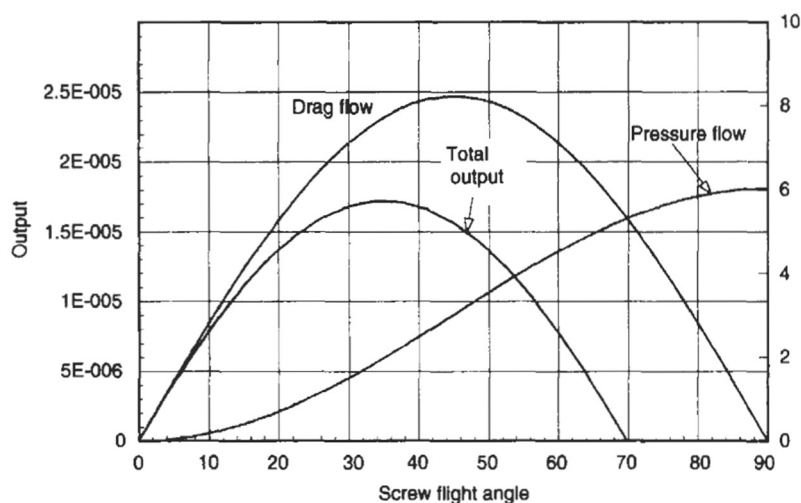
Obrázek (Obr. 2-20) znázorňuje jednoduchý dávkovací šroub. Délka jednotlivých zón bývá standardně 60 %, 20 % a 20 % celkové délky šneku. Hloubka drážky je v dopravní části největší a v celé její délce konstantní. V kompresní zóně se hloubka drážky postupně zmenšuje a stlačuje polymer. Toto stlačování má dvojí význam, jednak slouží k vytlačování bublinek vzduchu zpět do přechodí zóny, a jednak zlepšuje přenos tepla. V homogenizační zóně je hloubka drážky zase konstantní, nicméně je zde nejmenší. Polymery jsou zde homogenizovány, aby se do trysky přiváděly konstantní rychlostí o jednotné teplotě a tlaku [18,20].



Obr. 2-20 Šroub s rozdělením na 3 zóny: dopravní, kompresní (přechodovou), mísící či homogenizační [17]

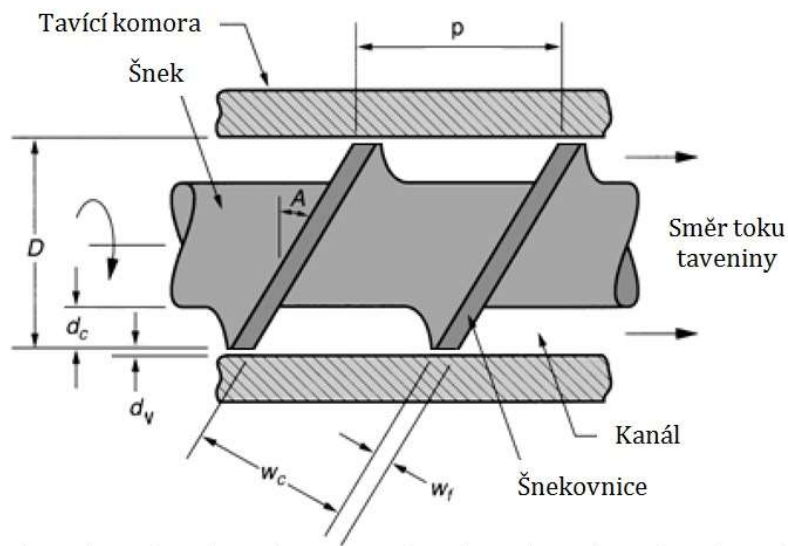
Parametry závitů, konkrétně volba úhlu stoupání šneku, souvisí s viskozitou jednotlivých plastů v homogenizační zóně a ovlivňuje tím tlak i výsledný průtok z trysky. Na obrázku (Obr. 2-21) lze vidět, že maximální průtok bude při úhlu šroubovice 35° . V praxi se nicméně běžně používá úhel stoupání $17,6^\circ$ jednak kvůli lepší vyrobitelnosti šroubu, a jednak kvůli tomu, že značná část šneku slouží k dopravě polymeru v pevném stavu, a v takových případech je známo a používáno optimálního úhlu 17° až 20° [21].

V opačném případě při zvolení menšího úhlu, zvýšením počtu závitů na šroubu, lze dosáhnout redukce tavicí sekce šroubu, snazší dopravy tužších materiálů, nicméně za snížení dopravní rychlosti [22].



Obr. 2-21 Závislost průtoku na úhlu šroubovice [21]

Na obrázku (Obr. 2-22) jsou zobrazeny hlavní geometrické prvky šneku. Neméně důležitý rozměr d_v , propustnost, zjednodušeně vůle mezi šroubovicí a komorou, má vliv na výsledné fungování extruderu. Vůle by neměla být příliš malá, jelikož by se závitů mnohem rychleji opotřebovaly, ale ani příliš velká. S větší vůlí by mezi šroubem a komorou vznikala tlustší film, který by redukoval přenos tepla od komory a také by hrozilo snížení průtoku vlivem netěsnosti [21].

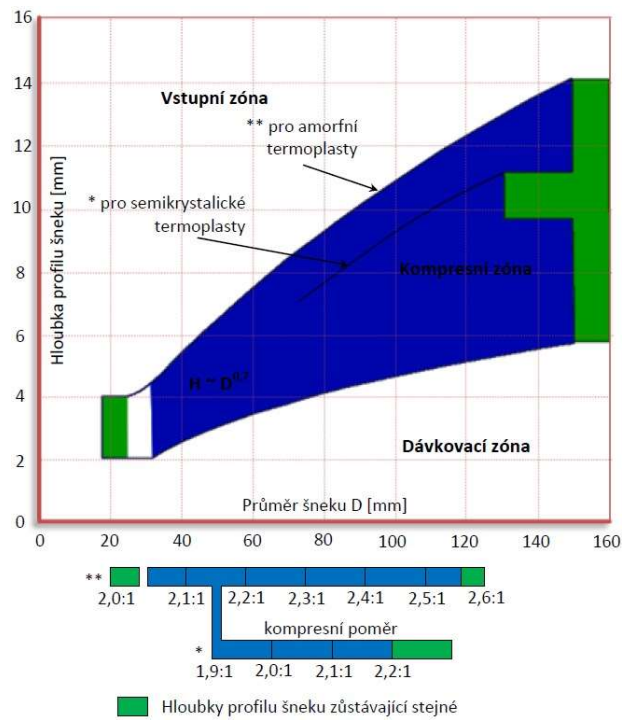


Obr. 2-22 Geometrické parametry šneku, d_v – vůle mezi válcem a šroubovicí, A – úhel stoupání závitů, D – průměr válce tavící komory, w_c - šířka závitů, w_f - šířka šnekovnice, p - rozteč závitů šroubovice, d_c - hloubka kanálu [18]

Kompresní poměr

Kompresní poměr je podíl hloubky drážek dopravní a homogenizační zóny (H_1/H_2) a platí pro všechny šrouby [23]. Typický poměr pro termoplasty se pohybuje v rozmezí od 1,5:1 do 4,5:1, avšak většina šneků má poměr mezi 2:1 až 3:1 pro obecnější použití (Obr. 2-23) [18].

S vyšším kompresním poměrem se zvyšuje smykové teplo předávané polymeru, rovnoměrnost rozprostření tepla v tavenině, spotřeba energie, a může docházet k napětí u některých plastů. Každý polymer se liší svými energetickými požadavky a je třeba vzít v úvahu takové věci, jako je viskozita polymeru při různých smykových rychlostech spolu s měrným teplem a ideální výstupní teplotou [22].

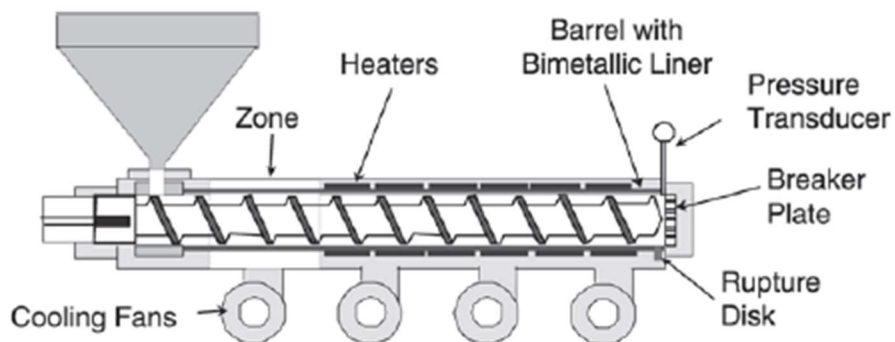


Obr. 2-23 Závislost hloubky profilu šneku na průměru šneku [18]

L/D poměr

Typický poměr L/D (délka/průměr) u šroubů bývá mezi 20:1 až 34:1. Délka šroubu závisí na množství uvažovaných zón, které závisí na zpracovávaném polymeru. Pro termoplasty se poměr L/D pohybuje v rozmezí 19 až 22:1. Kratší šneky nezajistí dostatečnou teplotní homogenitu taveniny a odvodušnění, a šneky delší již mohou způsobit tepelnou degradaci materiálu vlivem dlouhého působení tření [18,20].

2.2.6 Tavicí komora

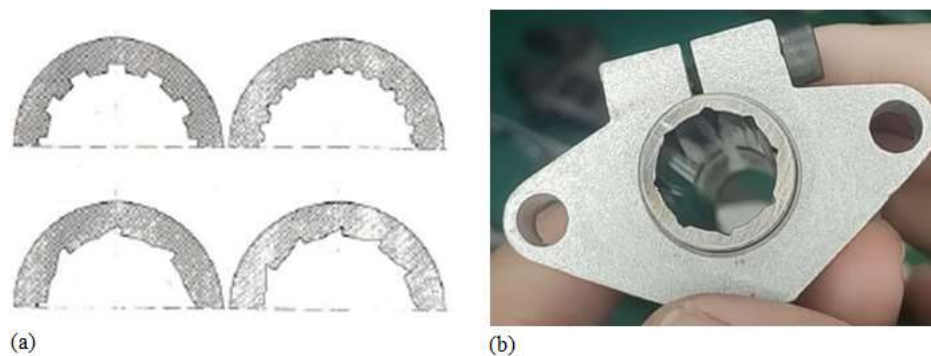


Obr. 2-24 Konfigurace šroubu, komory a topných pásů [17]

Tavící komora s ostatním příslušenstvím je zobrazena na obrázku (Obr. 2-24). Vnitřní průměr komory by měl být odolnější, z tvrdšího kovu než je šroub. Poměr válcové plochy k ploše šroubu je přibližně 10:1, a proto dochází k rychlejšímu opotřebení šroubu oproti válci. Nejčastěji bývá komora vyráběna z uhlíkové oceli s následným kalením nebo se nitriduje do hloubky okolo 0,5 milimetru. Povrchová úprava nitridováním není příliš efektivní vůči abrazivním materiálům. Pro malé komory se používá nerezová ocel, avšak kalení nerezové oceli snižuje odolnost proti korozi, a také není ideální pro přenos tepla.

Další řešení pro zlepšení odolnosti povrchu komory spočívá ve využití bimetalického povlaku. Tyto povlaky s tloušťkou 1,5 až 3 milimetry jsou oproti nitridaci silnější s vyšší odolností proti opotřebení. Třetí řešení je použití vložky, může být z nerezové oceli, slitiny niklu, z kalené oceli apod. Tato vložka bývá vsunuta přímo do komory, jejíž nevýhodou může být horší vedení tepla v případě, že se v mezeře mezi komorou a vložkou vyskytují bublinky vzduchu [17].

Celkový průtok je také závislý na drsnosti povrchu šneku a komory. Pro maximální průtok je vhodné mít hladký šnek a komoru s vysokou drsností [17]. Pro zvýšení účinnosti se používají tvarové úpravy komory. Tyto úpravy drážkováním zvyšují průtok, disipaci tepla a zabraňují ucpání.



Obr. 2-25 (a) - tvarové úpravy komory [17]; (b) - úprava komory v praxi [24]

2.2.7 Topná tělesa

K ohřevu jsou k dispozici slídová, keramická topná tělesa či odlitky. Ohřivače musí pokrývat maximální plochu hlavně a musí být pevně sevřeny kolem válce, aby se zabránilo horkým místům a zajistilo se rovnoměrné zahřívání [17]. Keramická topná tělesa jsou schopna pracovat v teplotách do 900 °C. Tělesa se slídovou izolací pracují do 340 °C [14].

Odporové vytápění zahrnuje především pásové ohřivače, lité hliníkové ohřivače, keramické ohřivače a tak dále. Výhodou těchto topidel jsou malé rozměry, snadná výroba a údržba [25].

Topná tělesa trysková keramická a slídová jsou často využívána pro ohřev strojů na výrobu plastů a ohřev nejrůznějších válcových ploch. Válcová plocha topného tělesa zajišťuje maximální plochu dotyku s komorou a efektivně ohřívá požadované těleso. Rozměry těles se pohybují v širokém rozmezí průměrů a výšek [14,26].



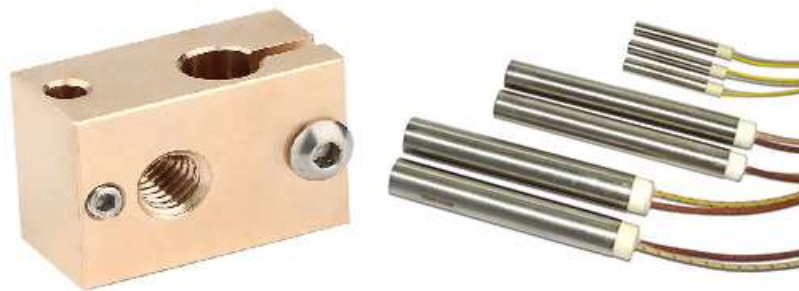
Obr. 2-26 Topné pásy (a) - slídové, (b) - keramické, (c) - s minerální izolací [26]

Topné odlitky jsou z odlitku hliníku nebo ze slitiny hliníku a bronzu. Tělesa mají výbornou tepelnou vodivost. Nejpoužívanější jsou hliníková topná tělesa pracující do 400 °C. Tělesa ze slitiny hliníku a bronzu jsou možné ohřívát až do 650 °C. Uplatnění odlitků je zejména u vytlačovacích strojů, ohřevu vzduchu nebo plynu, varných desek, vstřikovacích lisů, válcoven, lisů na balení a teplovzdušných lisů [14,27].



Obr. 2-27 Topné segmenty (odlitky) [27]

Topné patrony (Obr. 2-28) vynikají univerzálním použitím. Velký podíl je v 3D tisku, kde patrona zahřívá termoplast v hliníkovém bloku na určitou teplotu. Tělo válce je z nerezové oceli a montuje se do díry s tolerancí H7. Pro lepší tepelnou výměnu se využívá teplo vodivá pasta. Výkon patron se pohybuje od 30 W do 2500 W [14,27].



Obr. 2-28 Hliníkový topný blok s topnými patronami [27, 28]

2.2.8 Tryska

Tryska je neméně důležitou součástí. V různých podobách se vyskytuje u vstřikovacích lisů i samotných extruderů 3D tiskáren. Trysky pro 3D tisk jsou dle rozměru rozděleny na standard, volcano a supervolcano. Materiál trysek se volí podle toho, jak moc abrazivní typ filamentu je používán. Typické materiály jsou mosaz, kalená ocel, nerez nebo rubínový hrot.

Standard

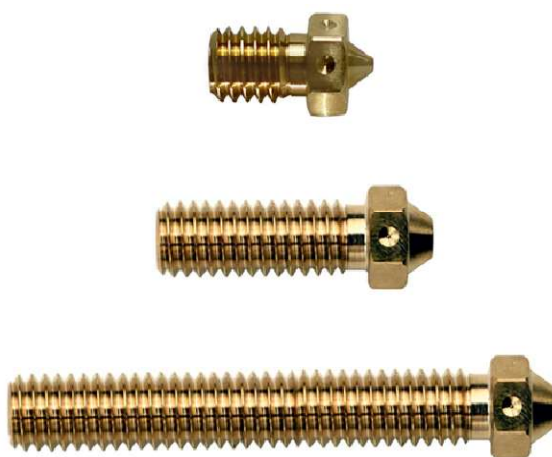
Současné standardní rozměry vyhovují V6 hotendu a MK8 extruderům s délkou 12 až 13 milimetrů od špičky po konec závitu trysky, kdy závit je M6x1.

Volcano

Takzvané Volcano hotendy jsou speciálně navrženy pro vyšší rychlosti a teploty s nárokem nejméně 3krát vyššího zpracování plastu než regulární V6 hotendy. Kvůli těmto důvodům jsou potřeba trysky o délce 21 milimetrů.

Supervolcano

Supervolcano je delší provedení předchozího Volcano, s rozměrem téměř 50 milimetrů. Pro zvládnutí těchto rozměrů je topné těleso dimenzováno na výkon 80 W v rozmezí teplot až do 500 °C [3].



Obr. 2-29 Mosazné trysky, odshora – Original E3D v6, Volcano, SuperVolcano [29]

Mosaz

Trysky z mosazi jsou nejběžnější pro její dobré tepelné vlastnosti, kdy její součinitel tepelné vodivosti je $106 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, a také pro nízkou cenu. Mosaz nepatří mezi mechanicky tvrdé materiály, proto je velmi náchylná na opotřebení, na druhou stranu jednoduchá na výrobu a opracování. Maximální pracovní teplota trysky je $300 \text{ }^\circ\text{C}$ [30,31].

Kalená ocel

Trysky z kalené oceli jsou dostatečně odolné pro časté používání abrazivních materiálů a nabízejí roky používání bez nutnosti výměny. Tepelná vodivost je přibližně $40 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a dosažení cílové teploty trvá déle. Maximální pracovní teplota je $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Opracování je vlivem tvrdosti komplikované. Vlivem toho není vnitřní povrch trysky tak hladký, což může vést k nižší kvalitě tisku [30,31].

Nerezová ocel

Hlavní rozdíl nerezové oceli od kalené spočívá v její menší tvrdosti. Trysky z nerezové oceli nejsou doporučované pro častý tisk z abrazivních filamentů. V porovnání s mosazí je povrch nerezové oceli výhodnější proti lepení filamentu k povrchu, a také je vyloučena kontaminace plastu olovem, které mosaz obsahuje. Tím jsou teoreticky vhodné pro tisk materiálů bezpečných pro potraviny. Jedinou větší nevýhodou je její součinitel tepelné vodivosti $15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Maximální pracovní teplota je taktéž $500 \text{ }^\circ\text{C}$ [30,32,33].

Rubín

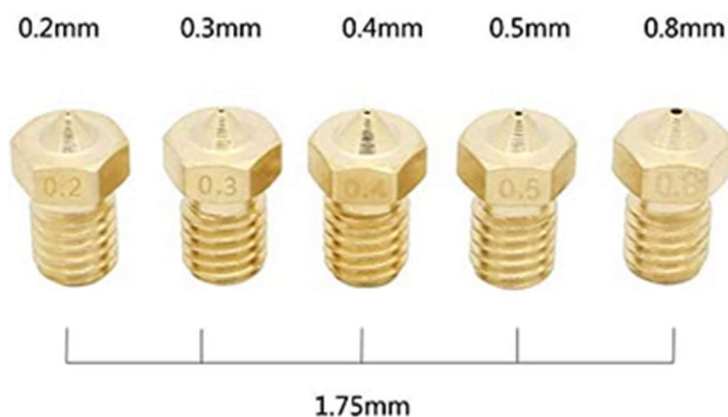
Trysky s rubínovými hroty spadají do nejdražší kategorie trysek 3D tiskáren. Samotná tryska je zpravidla mosazná, opatřená rubínem na její špičce. Tolerance výstupního otvoru jsou velmi přesné. Rubínový hrot zajišťuje trysce dodatečnou odolnost proti opotřebení a dovoluje využití tisku ze speciálních filamentů. Maximální provozní teplota je $550 \text{ }^\circ\text{C}$ [31].



Obr. 2-30 (a) - mosazné trysky; (b) - kalené trysky; (c) - nerezové trysky; (d) - rubínové trysky [3]

Průměry trysek

Běžně dostupné trysky pro konvenční 3D tiskárny se vyrábí s výchozím průměrem 0,4 milimetru. Pro použití trysky s jiným průměrem je nutné její zakoupení. Na trhu jsou běžně dostupné s vyráběnými průměry od 0,1 až po 0,8 milimetru. Maximální výstupní průměr trysky vyskytující se na trhu je 1,4 milimetru. Pro trysky s větším výstupním průměrem je potřeba volby jiného extruderu kvůli jiným výrobním rozměrům.








Obr. 2-31 Mosazné trysky s různými výstupními průměry pro filament o průměru 1,75mm [34]

2.2.9 Komerční dostupná řešení

Na trhu se vyskytuje hned několik výrobců extruderů na pelety, nicméně jako produkt nabízí kompletované rámové konstrukce, delta roboty či robotická ramena s již zabudovaným extruderem. Počet samotných tisknoucích hlav je tak na trhu pro spotřebitelský 3D tisk poměrně malý. Některé z nich jsou spolu s údaji uvedeny níže.

Tab. 2-1 Samostatné extrudery dostupné na trhu

| Společnost | Produkt | Parametr | Hodnota | Jednotky |
|--------------------|---|-------------------|-----------|----------|
| Massive Dimensions |  Obr. 2-32 MDPH2 [35] | Kompresní poměr | 1,3:1 | - |
| | | L/D | 9:1 | - |
| | | Maximální teplota | 450 | °C |
| | | Topný výkon | 300 | W |
| | | Maximální průtok | 0,9 | kg/h |
| | | Hmotnost | 8,39 | kg |
| | | Cena | 5,499 | USD |
| CEAD |  Obr. 2-33 E25 [36] | Kompresní poměr | - | - |
| | | L/D (D25 mm) | - | - |
| | | Maximální teplota | 310 | °C |
| | | Topný výkon | 2450 | W |
| | | Maximální průtok | 12 | kg/h |
| | | Hmotnost | 30 | kg |
| | | Cena | - | - |
| Dyze Design |  Obr. 2-34 Pulsar [37] | Kompresní poměr | 2,57:1 | - |
| | | L/D (D19,3 mm) | 18:1 | - |
| | | Maximální teplota | 400 | °C |
| | | Topný výkon | 1100 | W |
| | | Maximální průtok | 2,5 | kg/h |
| | | Hmotnost | 7 | kg |
| | | Cena | 10,850 | USD |
| REV3RD |  Obr. 2-35 RD-M10+ [38] | Kompresní poměr | 2,5:1 | - |
| | | L/D (D16 mm) | 20:1 | - |
| | | Maximální teplota | 500 | °C |
| | | Topný výkon | 1000-2000 | W |
| | | Maximální průtok | 7-12 | kg/h |
| | | Hmotnost | 18 | kg |
| | | Cena | - | - |

| | | | | |
|-------|---|-------------------|--------|------|
| Mahor |  | Kompresní poměr | - | - |
| | | L/D (D8 mm) | 6,25:1 | - |
| | | Maximální teplota | 300 | °C |
| | | Topný výkon | 50 | W |
| | | Maximální průtok | 0,2 | kg/h |
| | | Hmotnost | 0,75 | kg |
| | | Cena | 645 | EUR |
| | | Obr. 2-36 V4 [39] | | |

Šroub v technologii MEX (Material Extrusion)

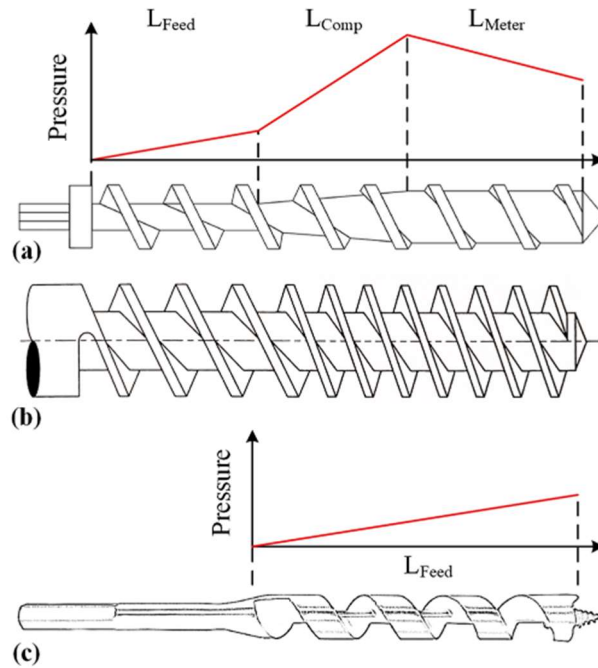
U takových jednošroubových extruderů je šroub uložen vertikálně a je poháněn nejčastěji krokovým motorem. Ve většině případů slouží šroub jako dopravník pelet do ohřívací části, kde dochází k tavení a vytlačení z trysky.

U běžných konvenčních extruderů se používají tři sekce (plnění, komprese, dávkování). Graf znázorňuje průběh tlaku způsobený materiálem uvnitř komory. K tomu je potřeba vyšších točivých momentů pohonu. Celkový tlak je vyjádřen v rovnici (2-1):

$$P_B = \Delta P_{feed} + \Delta P_{comp} + \Delta P_{meter} \quad (2-1)$$

kde:

- P_B Pa - celkový zpětný tlak
- ΔP_{feed} Pa - tlak plnicí zóny
- ΔP_{comp} Pa - tlak kompresní zóny
- ΔP_{meter} Pa - tlak homogenizační zóny



Obr. 2-37 (a), (b) - běžné šrouby se třemi sekcemi s typickým tlakovým profilem pro danou geometrii, (c) - hadovitý vrták do dřeva s lineárním tlakovým profilem [40]

U malých extruderů pro 3D tisk není žádoucí velký točivý moment z důvodu hmotnosti a rozměrů pohonu. Velký točivý moment není také vhodný z důvodu častého zastavování a rozběhu motoru. Proto je použit běžně dostupný, upravený hadovitý vrták (Obr. 2-37c). Účelem šroubu je pouze přeprava materiálu do tavné zóny a následné vytlačení z trysky. Díky tomu jsou sníženy nároky na točivý moment, tlak na hnací hřídel a motor. Z rovnice (2-2) jsou tedy odstraněny zóny komprese a dávkování [14,40].

$$\Delta P_{feed} = \frac{dP}{dZ} L \quad (2-2)$$

kde:

ΔP_{feed} Pa - tlak plnicí zóny

dP/dZ - - tlakový gradient

L m - délka šroubu

Nestandardní rozměry trysek

Každý extruder je jiný a výrobci si navrhují vlastní rozměry trysek. Jejich design je nicméně velmi podobný tryškám určeným na běžné 3D tiskárny. Největší rozdíly jsou v jejich velikosti a v rozměru výstupního otvoru, který bývá zpravidla okolo 1–5 až 10 milimetrů dle potřeby tisku (Obr. 2-38, Obr. 2-39, Obr. 2-40, Obr. 2-41)



Obr. 2-38 Tryska společnosti Massive Dimension [35]



Obr. 2-39 REV3RD RD-M10+ trysky [38]



Obr. 2-40 Tryska společnosti Cosine [41]



Obr. 2-41 Dyze Design trysky [37]

2.3 Materiály

Velká většina dnešních tiskáren s technologií FDM používá jako zdroj materiálu struny o standardizovaném průměru 1,75 mm nebo 2,85 mm, které jsou namotané na cívku v množství od 200 g do 5 kg. Hlavní nevýhoda tohoto filamentu je vysoká cena. Filamenty jako takové se také vyrábí z granulátu, který však prochází tepelným zpracováním, kalibrováním a motáním na cívku. Tento technologický proces se podepisuje na ceně filamentu.

Proto je z tohoto hlediska výhodnější využít tisk z pelet. Jsou levnější a běžně používány ve všech průmyslových odvětvích zabývajících se zpracováním polymerů. Při velkém nákupním množství, v řádu tun, cena pelet výrazně klesá. Velikost pelet ovšem není standardizována. Tvar a rozměr pelet je závislý na schopnostech produkce daného výrobce, a ne všechny mohou svými rozměry vyhovovat danému extruderu.

2.3.1 ABS (Akrylonitril-butadien-styren)

Společně s PLA (Polylactic acid) patří mezi nejpoužívanější materiály při 3D tisku. Používá se v širokém spektru od domácnosti až po automobilový průmysl hlavně pro tvrdost, houževnatost, odolnost vůči mechanickému poškození, odolnosti vůči kyselinám a vyšším teplotám do 100 °C [42]. Je vyráběn z ropných produktů, proto není vhodný pro potravinářský průmysl. Tisk doprovází tvorba výparů [43].

Teplota zpracování se pohybuje okolo 230 °C v závislosti na výrobcu. Teplota vyhřívání podložky se doporučuje v rozmezí 80–110 °C [42]. Cena struny je přibližně 480 Kč/kg, cena granulátu 290 Kč/kg [44].

2.3.2 PLA (Polylactic acid – kyselina polymlečná)

Spolu s ABS se jedná o jeden z nejpoužívanějších filamentů do FDM tiskáren. Vyznačuje se lepší tisknutelností, vyšší pevností, ale také křehkostí [44,45]. PLA je vyráběn z cukru extrahovaného z biologických materiálů, například z kukuřičného škrobu či cukrové třtiny, tudíž je zdravotně nezávadný a biologicky odbouratelný [46].

Teplota zpracování se pohybuje kolem 180-220 °C, s teplotou podložky 50-60 °C, přičemž je to teplota, kdy materiál měkne [42,45]. Cena struny je v průměru 550 Kč/kg oproti granulím 245 Kč/kg.

2.3.3 PET/PET–G (Polyetylén tereftalát-glykol)

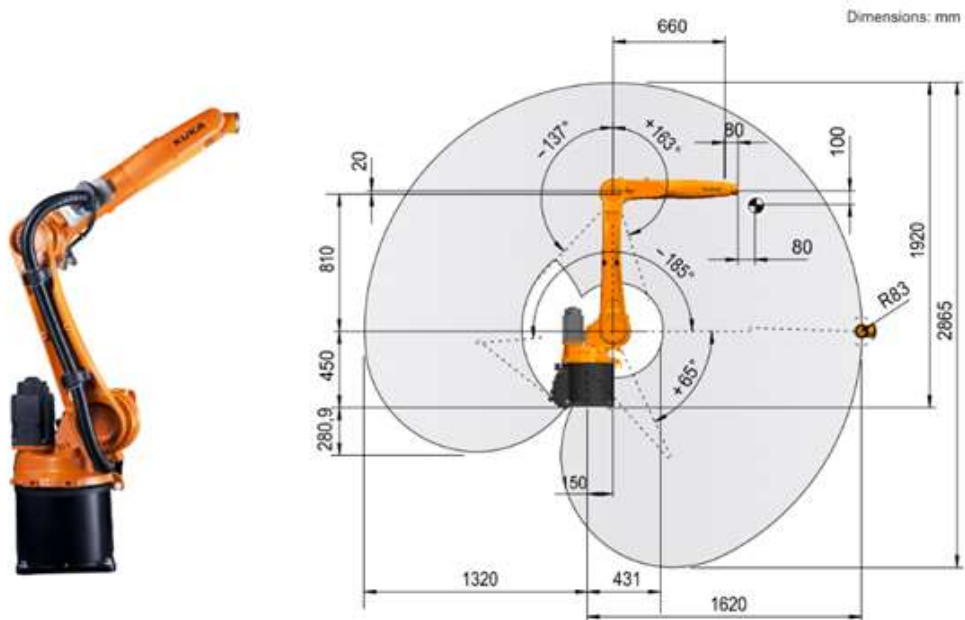
PET se vyznačuje nemačkovostí a nízkou navlhavostí, a oproti předchozím materiálům je pružnější a mechanicky odolnější. Poměrně vysoká houževnatost a dobrá teplotní odolnost z něj činí vhodný filament pro tisk levných technických dílů [44,46].

Písmeno G ve zkratce PET–G označuje glykol, který se přidává během výrobního procesu. Ten modifikuje PET, aby byl méně křehký, snadnější pro tisk a více průhledný při tisku s poloprůhlednými variantami. PET/G materiály jsou zdravotně nezávadné. Další výhodou je, že se během tisku nevytváří výpary ani zápach [46].

Teplota zpracování se pohybuje v rozmezí 220–260 °C a odolnost vůči okolní teplotě je od 70 do 80 °C. Relativně široké teplotní rozmezí je způsobeno tím, že výrobci tají z velké části složení PET, a také protože tyto materiály nejsou čisté PET, ale obsahují kopolymery (polymery, které mají makromolekuly z minimálně dvou druhů monomerů). Cena filamentu se pohybuje v průměru 495 Kč/kg a cena granulátu 330 Kč/kg [44, 45].

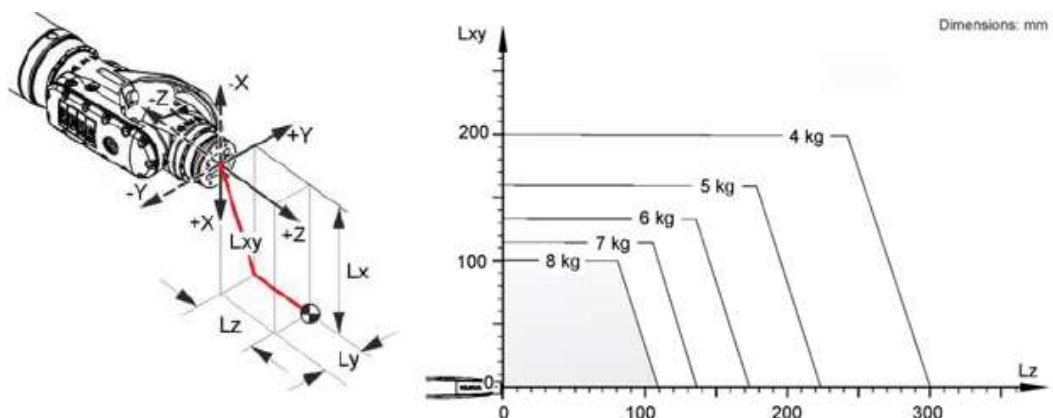
2.4 Robot KUKA

Robotické rameno KUKA, které bude používáno, a na které bude namontován extruder, nese označení KR 8 R1620. Jde o šestiosého robota s maximálním dosahem 1620 mm a rotací kolem své vertikální osy o $\pm 185^\circ$.



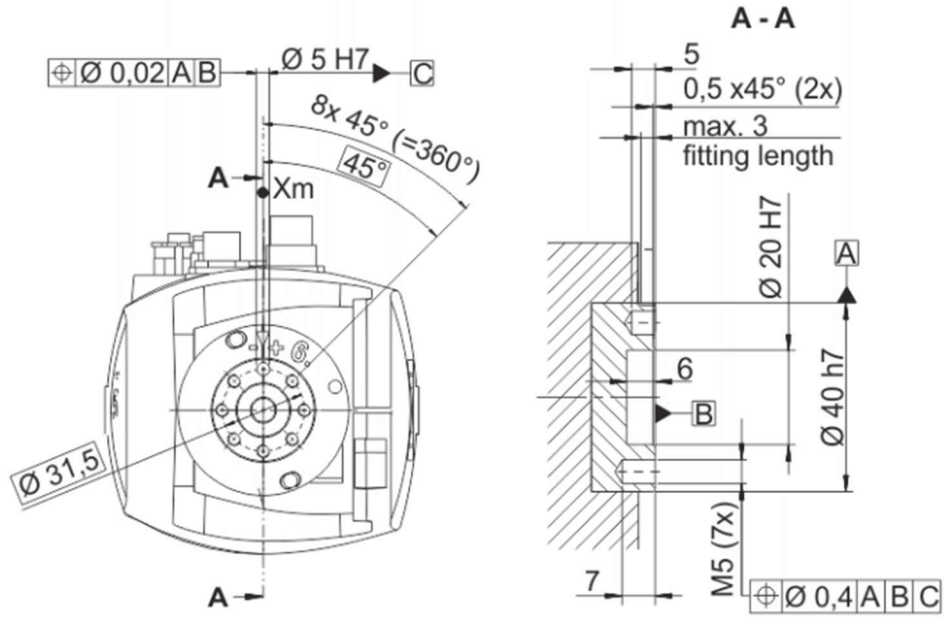
Obr. 2-42 Robot KUKA KR 8 R1620 vlevo, obrázek pracovní zóny vpravo [47]

Pro ovládání obsluhou je robot vybaven ručním ovladačem KUKA smartPAD pro manuální řízení a nastavení pohybu stroje. Maximální nosnost ramene je závislá na těžišti připojeného zatížení v osách x, y a z. Tuto závislost lze vyčíst z grafu (Obr. 2-43). Při nedodržení hodnot a přetížení stroje může dojít k rychlému opotřebení jednotlivých součástí. Efektor bude upevněn k rameni skrze přírubu robota, která je zobrazena na obrázku (Obr. 2-44).



Obr. 2-43 Závislost nosnosti ramene na těžišti efektoru [47]

Dimensions: mm



Obr. 2-44 Geometrie příruby robota [47]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Na trhu se vyskytují šnekové extrudery velkých rozměrů s vysokou hmotností, primárně určeny pro velkoobjemový tisk na velká robotická ramena nebo rámové konstrukce. Některé z nich se dají navíc pořídit pouze s celou tiskárnou. Menší šnekové extrudery tak v této oblasti nemají příliš velké zastoupení.

V praxi se ve velké míře využívají kompresní šrouby, a to hlavně u vstřikovacích jednotek. Podobný trend se objevuje i u komerčních extruderů na 3D tisk, které také využívají těchto šroubů. Existují však některé typy extruderů, které využívají hadovitých vrtáků plnicích funkci šroubového dopravníku.

Kompresní šroub při zpracovávání materiálu vytváří vyšší tlaky v komoře, kdežto od hadovitého vrtáku jsou tlaky výrazně nižší. Kompresní šroub má lepší, komplexnější geometrii s lepšími vlastnostmi pro tisk polymerů. Hadovitý vrták má jedinou výhodu, a to velký dopravní objem a nízkou cenu.

U krátkých šroubů je obtížné zajistit dostatečnou teplotní homogenitu taveniny oproti dlouhým komerčně vyráběným šnekům. Tavení polymeru závisí z velké části na smykovém tření mezi šnekem a komorou, které lépe zprostředkovávají delší šrouby.

Pro tisk z více druhů polymerů s odlišnými vlastnostmi bude potřeba výpočtů z oblasti reologie. Výpočty budou sloužit pro určení průtoku taveniny tryskou, průběhu tlaku v extruderu a pro posouzení vhodnosti typu šroubu.

Pro ohřev konvenčních extruderů se používají topné pásy, dráty stočené do spirály nebo topné odlitky. Díky jejich válcovitému tvaru se ohřívá extruder po celém obvodu. U spotřebitelských 3D tiskáren jsou používány topné patrony. Mají menší rozměr a větší intenzitu oproti topným pásům, avšak nezajišťují rovnoměrné rozprostření tepla.

Pro průmyslového robota schopného vykonávat mnoho funkcí je aditivní výroba již využívána. Při návrhu extruderu se musí brát ohled na parametry robota. Především se jedná o rozměry příruby, rychlost ramene a maximální nosnost pro dosažení maximálního pracovního prostoru.

3.2 Cíl práce

Cílem práce je návrh šnekového extruderu vhodného jako koncový efektor robotického šestiosého ramene pro 3D tisk z plastových pelet.

Navrhovaný extruder má být zmenšenou verzí již existujícího extruderu. Snahou je minimalizovat jeho rozměry a hmotnost. Produkt by tak neměl přesahovat délku 300 milimetrů a jeho limitní váha byla stanovena na 2 kilogramy. Základní rozměr výstupního otvoru trysky byl určen na 2 milimetry z uživatelských důvodů. Pro využití v praxi by výkon extruderu měl být podobný či lepší oproti extruderům na filament.

Od návrhu se slibuje univerzálnější využití při 3D tisku. Extruder se bude moct montovat na robotické rameno či na větší rámovou 3D tiskárnu díky své nízké váze. Svými parametry a nízkou pořizovací cenou by měl také konkurovat extruderům používaným na běžných 3D tiskárnách.

Přínosem práce by bylo vyplnění mezery na trhu, a také vyšší povědomí o nízkonákladových extruderech zpracovávající levné plastové pelety, které by se daly využít jak při uživatelském, tak v průmyslovém 3D tisku.

Dílčí cíle bakalářské práce:

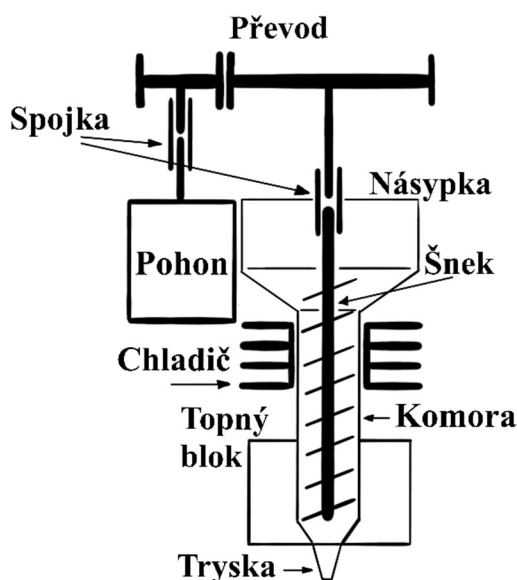
- rešerše
- identifikace klíčových konstrukčních uzlů
- návrh variant řešení
- výběr a zpracování nejvhodnější varianty.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

4.1 Obecný popis uspořádání

4.1.1 Paralelní uspořádání

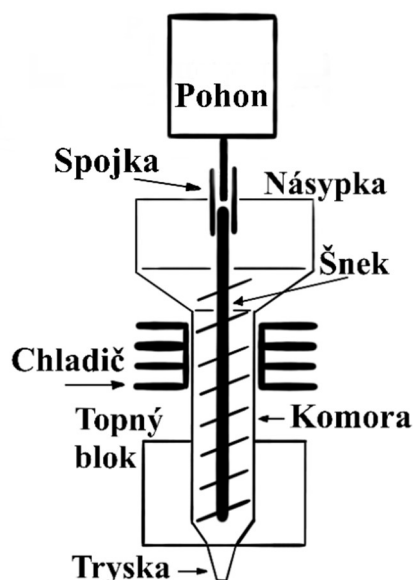
Největší výhodou tohoto uspořádání (Obr. 4-1) je snížení délky extruderu o rozměr pohonu, který je upevněn paralelně k ose šneku. To dovoluje užití u menších zařízeních, jako jsou třeba rámové 3D tiskárny apod. Zredukování rozměru nicméně přináší problémy ohledně přenášení kroutícího momentu z motoru na šnek. Potřebou převodu je nutné vyřešit volbu typu převodu, namáhání ohybem, uchycení a celkově jeho pevné uložení.



Obr. 4-1 Schéma paralelního uspořádání extruderu

4.1.2 Sériové uspořádání

Uspořádání disponuje jednoduchou konstrukcí s přímým propojením šneku a pohonu pomocí spojky. Toto uspořádání je nejrozšířenější i u jiných extruderů na trhu (Obr. 4-2). Rozdíl oproti paralelnímu uspořádání je právě absence převodu, přičemž se lze zaměřit jen na upevnění motoru ke zbytku extruderu. Nevýhodou je větší výška extruderu.



Obr. 4-2 Schéma sériového uspořádání extruderu

4.2 Pohon

Vhodným motorem pro pohon navrženého extruderu je krokový motor s řídicí jednotkou (driver), známý z 3D tiskáren a malých CNC strojů. Tento typ motorů dosahuje podstatně nižších pracovních otáček s poměrně velkým kroučícím momentem oproti asynchronním motorům. Jejich největší výhodou je malý rozměr a nízká váha. Krokové motory jsou navíc opatřeny NEMA přírubami pro montáž převodovek, které zvyšují točivý moment. Krokové motory s planetovými převodovkami se využívají i pro pohon 3D tiskáren používajících pelety a šnek.

4.3 Typ šneku

Konvenční šnekový šroub se používá ve vstřikových lisech, extruzních linkách pro výrobu profilů, folií, granulátů atd. V Česku existuje několik výrobců specializovaných na návrh a výrobu těchto šneků, například BOCO s.r.o., DATRIA s.r.o., Borra s.r.o.. Výrobci optimalizují parametry (průměr, délka, délka sekcí, rozteč, povrchová úprava), dle specifických požadavků použití.

V tabulce (Tab. 4-1 Parametry využívané při vstřikování Tab. 4-1) jsou vypsány ideální parametry pro plasty, které se využívají jak při běžném vstřikování, tak rovněž při 3D tisku. Některé materiály, zejména PLA, se u vstřikovacích jednotek nepoužívají a nejsou k nim žádné hodnoty, proto se v tabulce nevyskytuje.

Tab. 4-1 Parametry využívané při vstřikování [17]

| Parametry | PET | PP | ABS |
|-----------------|--------|--------|------------|
| Stoupání | 22° | 17,5° | - |
| Kompresní poměr | 3,25:1 | 3:1 | 2,75:1 |
| L/D | 30:1 | 20:1 | 25-30:1 |
| Teplota tavení | 265 °C | 221 °C | 200-245 °C |

Ačkoliv jsou k dispozici data od různých firem, tyto parametry existujících šroubů jsou uplatnitelné vždy pouze pro konkrétní zpracovávaný polymer. Vlastní design šroubu tak nepřipadá v úvahu, neboť tento proces vyžaduje reálná data zpracování různorodých materiálů jedním šroubem, ať už z provozu či z testování. V případě navrhovaného extruderu je plánován tisk a experimentování s různými typy polymerů. Proto bude tato kapitola zaměřena pouze na dostupné šrouby na trhu hodící se pro tento návrh.

4.3.1 Kompresní šnekový šroub

Pro naše použití jsou konvenční šnekové šrouby, běžně používané u vstřikovacích jednotek, nevhodné vzhledem k jejím velkým rozměrům. Na trhu, konkrétně na online internetovém obchodě aliexpress.com je však možné zakoupit mikro šroub do extruderu od výrobce ZANYAPRT (Obr. 4-3).



Obr. 4-3 Kompresní šroub [48]

Tab. 4-2 Parametry kompresního šroubu

| Parametry šneku | Označení | Hodnota | Jednotka |
|-------------------------------------|---------------------|---------|----------|
| Průměr | D | 10 | mm |
| Délka šneku | L | 120 | mm |
| Délka závitů | L_z | 75 | mm |
| Úhel šroubovice | θ | 20 | ° |
| Šířka drážky | T | 10 | mm |
| Hloubka drážky v homogenizační zóně | H_{mete} | 1,75 | mm |
| Hloubka drážky v dopravní zóně | H_{feed} | 2,5 | mm |
| Šířka šnekovnice | e | 0,94 | mm |
| Kompresní poměr | H_{feed}/H_{mete} | 1,43 | - |
| L/D poměr | L/D | 7,5 | - |

Tento šroub sice nespĺňuje ideální parametry z předešlé tabulky (tab. 4-1), ale geometricky se podobá konvenčnímu šroubu. Hlavní výhodou je malá hloubka drážky v homogenizační zóně, která zaručuje lepší prohrátí materiálu. V krajním případě existuje možnost vlastního návrhu s optimálnější geometrií a parametry, je ovšem nutné zahrnout náklady na vývoj, výrobu a testování.

4.3.2 Nekonvenční šnekový šroub

Nekonvenčním šnekovým šroubem je zde rozuměno použití šroubu do dřeva, přesněji řečeno vrtáku, a to konkrétně hadovitého vrtáku (Obr. 4-4). Tento vrták se geometrií nejvíce podobá šroubům u konvenčních extruderů.



Obr. 4-4 Hadovitý vrták [49]

Tab. 4-3 Parametry hadovitého vrtáku

| Parametry šroubu | Označení | Hodnota | Jednotka |
|-------------------------------------|-------------|---------|----------|
| Průměr | D | 9,8 | mm |
| Délka šroubu | L | 120 | mm |
| Délka závitu | Lz | 75 | mm |
| Úhel šroubovice | θ | 35,55 | ° |
| Šířka drážky | T | 10 | mm |
| Hloubka drážky v homogenizační zóně | Hmete | 4,5 | mm |
| Hloubka drážky v dopravní zóně | Hfeed | 4,5 | mm |
| Šířka šnekovnice | e | 9,65 | mm |
| Kompresní poměr | Hfeed/Hmete | 1 | - |
| L/D poměr | L/D | 7,65 | - |

Při pořízení hadovitého vrtáku je nutné počítat s jeho rozměrovou úpravou, a to se zkrácením délky stopky a šroubovice.

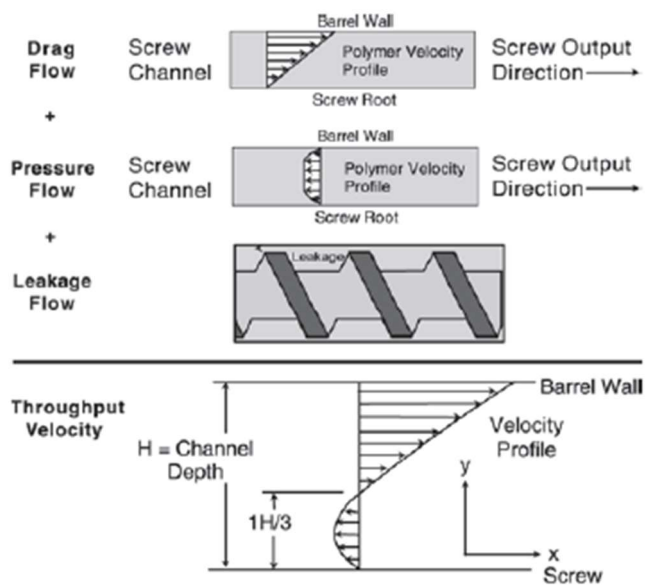
4.3.3 Teoretický průtok extruderem

Celkový tok taveniny extruderem je dán součtem tří druhů proudění, které se v něm v průběhu procesu vyskytují (4-1). Jedná se o proudění unášivé Q_D , proudění tlakové Q_P , proudění vzniklé netěsností mezi šroubem a komorou Q_{LF} (Obr. 4-5).

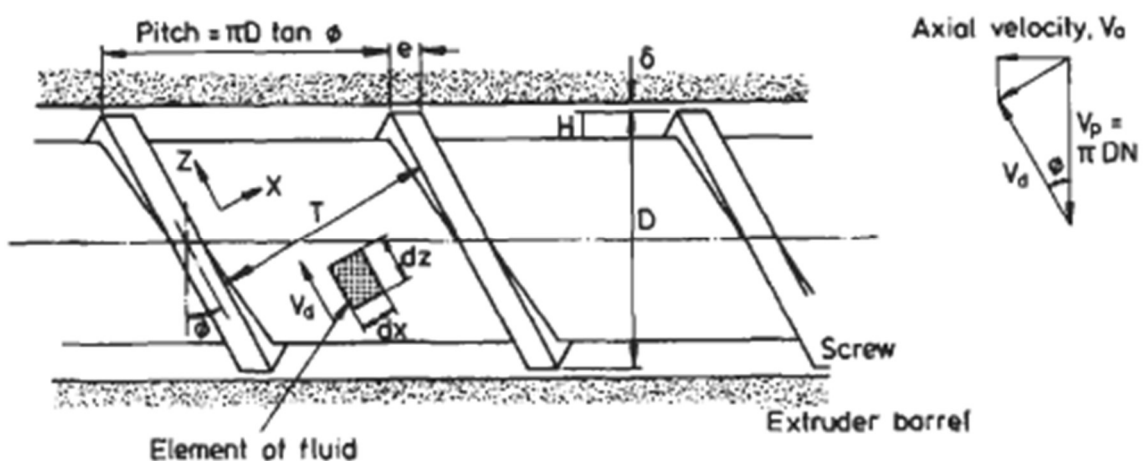
$$Q = Q_D + Q_P + Q_{LF} \quad (4-1)$$

Kde:

- Q m^3/s - celkový průtok
- Q_D m^3/s - unášivé proudění
- Q_P m^3/s - tlakové proudění
- Q_{LF} m^3/s - proudění vlivem netěsností



Obr. 4-5 Druhy proudění v extruderu [17]



Obr. 4-6 Detaily šroubu extruderu [21]

Unášivé proudění lze zapsat jako:

$$Q_d = \frac{1}{2} THV_d \quad (4-2)$$

Kde T je šířka drážky a lze vyjádřit vztahem:

$$T = (\pi D \tan \theta - e) \cos \theta \quad (4-3)$$

A V_d je unášivá rychlost vzniklá rotací a geometrií šroubu.

$$V_d = \pi D N \cos \theta \quad (4-4)$$

Při dosazení zpět do rovnice (4-2) bude mít unášivé proudění tvar:

$$Q_d = \frac{1}{2} (\pi D \tan \theta - e) (\pi D N \cos^2 \theta) H \quad (4-5)$$

Tlakové proudění je dáno rovnicí:

$$Q_p = \frac{\pi D H^3 \sin^2 \theta}{12 \eta} \cdot \frac{P}{L} \quad (4-6)$$

Kde:

L m - délka sekce

P Pa - tlak uvnitř extruderu

η Pa·s - dynamická viskozita

Poslední člen rovnice Q_{LF} lze zanedbat, a tudíž i z rovnice vyřadit. Poté bude celkový průtok extruderem vypadat následovně:

$$Q = Q_d - Q_p = \frac{1}{2} (\pi D \tan \theta - e) (\pi D N \cos^2 \theta) H - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \theta}{12 \eta} \cdot \frac{P}{L} \quad (4-7)$$

V případě nulového tlaku uvnitř extruderu, kdy $P = 0$, nastává případ, kdy průtok je maximální a lze tvrdit:

$$Q_d = Q_{max} = \frac{1}{2} (\pi D \tan \theta - e) (\pi D N \cos^2 \theta) H \quad (4-8)$$

V opačném případě, kdy Q_d je nulové, tlak v extruderu je natolik velký, že zastaví průtok, lze z rovnice (4-7) vyjádřit maximální tlak ve tvaru:

$$P_{max} = \frac{6LN\eta(\pi D \tan \theta - e)}{H^2 \tan^2 \theta} \quad (4-9)$$

Na celkový průtok a tlak mají vliv také parametry trysky. Z rovnice (4-7) vyplývá, že pro nejvyšší průtok je za potřeby dosáhnout co nejnižšího tlaku. Je třeba si uvědomit, že právě tento tlak z extruderu je zároveň jakýmsi vstupním tlakem trysky. Proto je průtok tryskou určen rovnicí:

$$Q = K_t P \quad (4-10)$$

Kde:

P Pa - tlak v extruderu

K_t je faktor odporu pro kapiláru, v našem případě trysky:

$$K_t = \frac{\pi R^4}{8\eta L_{nozzle}} \quad (4-11)$$

Kde:

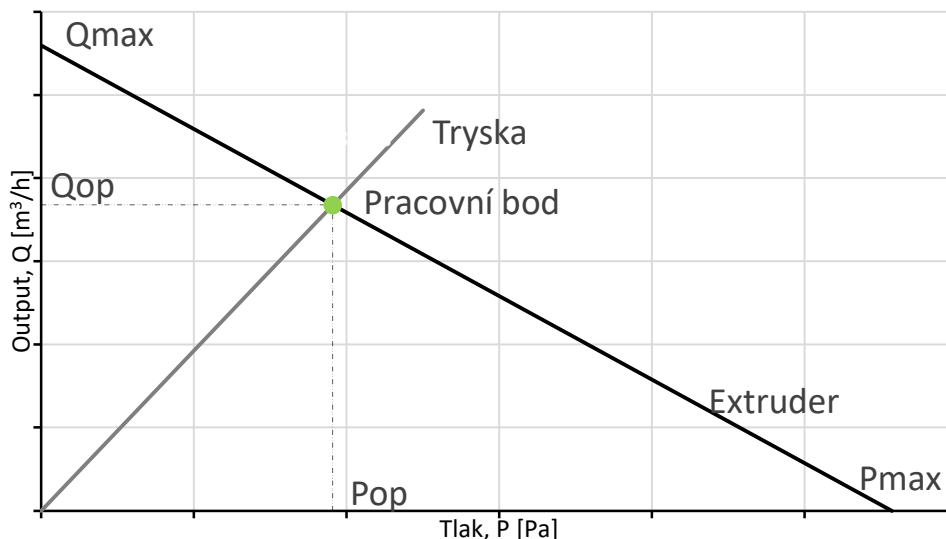
K_t m⁴·s/kg - faktor odporu pro trysku

R m - poloměr trysky

L_{nozzle} m - délka trysky

Rovnice (4-10) umožňuje vynést charakteristiky trysky na (Obr. 4-7) a průsečík těchto dvou charakteristik je pracovním bodem extruderu. Tento graf je užitečný v tom, že ukazuje, jaký vliv budou mít změny různých parametrů na výstup. Například zvýšení rychlosti šneku N posune charakteristiku extruderu nahoru. Podobně by zvětšení poloměru trysky R zvýšilo sklon charakteristiky trysky a v obou případech by se zvýšil výkon extruderu.

Charakteristiky extruderu a trysky



Obr. 4-7 Charakteristiky extruderu a trysky

Hodnoty tlaku a průtoku pracovního bodu lze dosáhnout také početně, a to dosazením rovnice (4-7) do rovnice (4-10), přičemž dostaneme:

$$Q = \frac{1}{2}(\pi D \tan \theta - e)(\pi D N \cos^2 \theta) H - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \theta}{12\eta} \cdot \frac{P}{L} = \frac{\pi R^4}{8\eta L_{nozzle}} P \quad (4-12)$$

Z tohoto vztahu lze dále vyjádřit tlak v pracovním bodě (operating point) pro trysku:

$$P_{OP} = \frac{Q_{max}}{\frac{\pi DH^3 \sin^2 \theta}{12L\eta} + K_t} \quad (4-13)$$

Díky tlaku v pracovním bodě lze získat pracovní průtok:

$$Q_{OP} = K_t P_{OP} \quad (4-14)$$

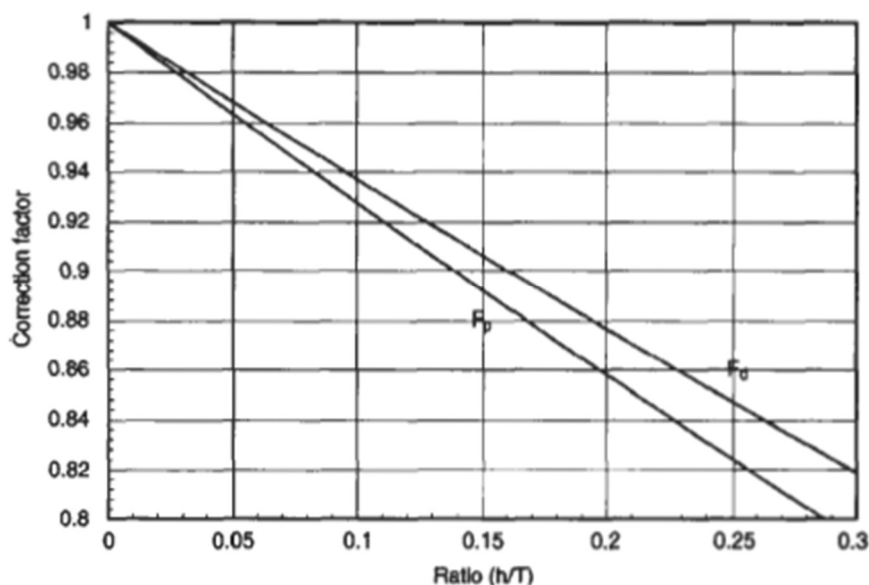
Kde:

Q_{OP} m^3/s - průtok v pracovním bodě

P_{OP} Pa - tlak v pracovním bodě

Pro přesnější model se využívá tvarový faktor (F_d a F_p) pro unášivé i tlakové proudění. Jsou závislé na poměru hloubky drážky a šířky drážky šneku (Obr. 4-8). Se snižujícím se poměrem roste účinnost přístroje [14,21]. Potom má rovnice tento tvar:

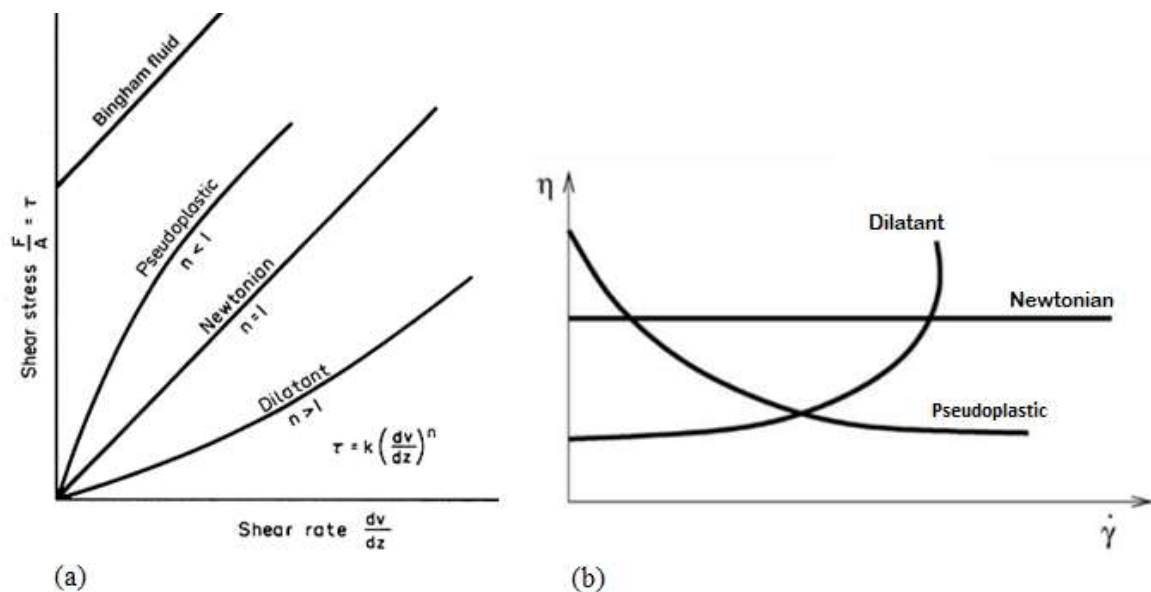
$$Q = \frac{1}{2} (\pi D \tan \theta - e) (\pi D N \cos^2 \theta) H F_d - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \theta}{12\eta} \cdot \frac{P}{L} F_p \quad (4-15)$$



Obr. 4-8 Tvarové faktory závislé na geometrii šroubu [21]

Jelikož jsou některé výpočty také funkcí dynamické viskozity, bylo potřeba vyhledat a zpracovat data plastů, které budou využívány při tisku. Z dostupných grafů znázorňující charakter chování polymerů při určité teplotě v závislosti dynamické viskozity na smykové rychlosti (Příloha 1, Příloha 2, Příloha 3) byly odečteny hodnoty pro ABS a PLA.

Pro zjištění těchto hodnot existují také teoretické výpočty. Roztavené polymery se chovají pseudoplasticky, tudíž neneutonsky, a při vyšších smykových rychlostech klesá jejich viskozita, jak lze vidět na obrázku (Obr. 4-9b) popisujícím chování kapalných látek.



Obr. 4-9 a) Vztah smykového napětí/smykové rychlosti v tekutinách [50] b) vztah dynamické viskozity/smykové rychlosti v kapalinách [51]

Proto se nejčastěji nahrazuje toto reologické chování mocninným zákonem.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (4-16)$$

Kde:

- K Pa·sⁿ - koeficient konzistence
- $\dot{\gamma}$ s⁻¹ - smyková rychlost
- n - - mocninný index

Obecná definice viskozity je popsána Newtonovou rovnicí:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta\dot{\gamma} \quad (4-17)$$

Kde:

- τ Pa - tečné napětí
- η Pa·s - dynamická viskozita
- $\frac{dv}{dy}$ s⁻¹ - rychlostní gradient

Dosažením rovnice (4-16) za tečné napětí do Newtonovy rovnice (4-17) a následnou úpravou získáme tvar pro dynamickou viskozitu, která je funkcí smykové rychlosti.

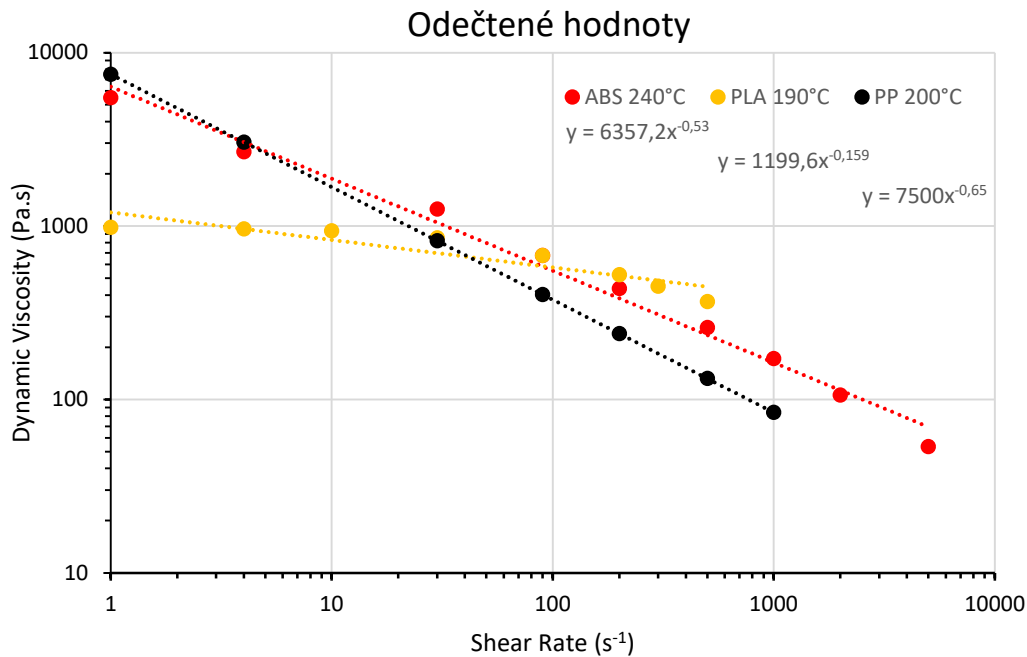
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{K\dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4-18)$$

Smykové rychlosti pro šnek a trysku jsou:

$$\dot{\gamma}_s = \frac{V_d}{H} = \frac{\pi DN \cos \theta}{H} \quad (4-19)$$

$$\dot{\gamma}_t = \frac{4Q_{max}}{\pi R^3} \quad (4-20)$$

Hodnoty materiálu PolyPropylen byly získány právě pomocí vztahu (4-18), neboť u tohoto polymeru byly známy hodnoty pro koeficient konzistence K a mocninného indexu n při teplotě 200 °C. Vypočtené hodnoty PP spolu s odečtenými body pro ABS a PLA byly následně zaznačeny do grafu a proloženy spojnicí trendu mocninného typu.



Obr. 4-10 Reologické vlastnosti polymerů proložené směrnicí trendu

Proložením bodů z (Obr. 4-10) byly získány rovnice, popisující chování dynamické viskozity při různých smykových rychlostech. Díky těmto rovnicím lze spočítat viskozitu v extruderu a v trysce pro různé otáčky motoru, neboť právě ty jsou funkční hodnotou smykových rychlostí šneku i trysky (4-19; 4-20). Výpočtem viskozit lze dále dopočítat ostatní hodnoty.

4.3.4 Teoretický výpočet průtoku pro kompresní šnek a hadovitý vrták

V následující tabulce jsou v základních jednotkách uvedeny parametry obou šroubů, konvenčního a nekonvenčního, potřebné k výpočtu teoretického průtoku.

Tab. 4-4 Parametry šroubů

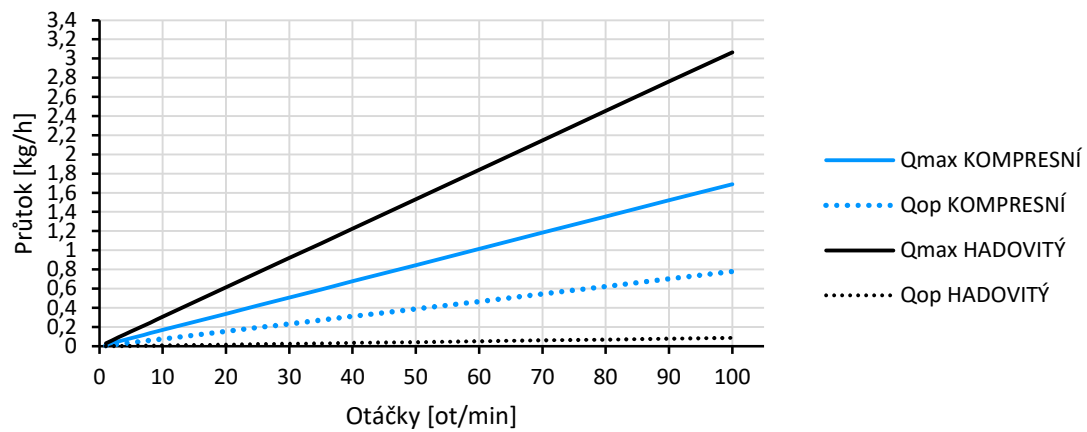
| Parametry šneku | Označení | Kompresní | | Hadovitý | |
|---------------------------|---------------------|-----------|-----------------|----------|-----------------|
| | | Hodnota | Jednotka | Hodnota | Jednotka |
| Průměr | D | 0,01 | m | 0,0098 | m |
| Úhel šroubovice | θ | 20 | ° | 35,55 | ° |
| Hloubka kanálu | H _{mete} | 0,00175 | m | 0,0045 | m |
| Šířka šnekovnice | e | 0,00094 | m | 0,00965 | m |
| Otáčky | N | 0,5 | s ⁻¹ | 0,5 | s ⁻¹ |
| Délka závitu | L | 0,075 | m | 0,08 | m |
| Délka homogenizační zóny | L ₃ | 0,024 | m | 0,024 | m |
| Délka trysky | L _{nozzle} | 0,012 | m | 0,012 | m |
| Průměr trysky | D _{tryska} | 0,002 | m | 0,002 | m |
| Rozteč závitů | p | 0,011 | m | 0,022 | m |
| Faktor unášivého proudění | F _d | 0,891 | - | 0,727 | - |
| Faktor tlakového proudění | F _p | 0,876 | - | 0,688 | - |

Teoretické výsledky pro oba šrouby jsou vypsány v tabulce (Tab. 4-5). Pro porovnání údajů a výsledků jednotlivých šroubů byly jako výchozí otáčky zvoleny 30 min⁻¹.

Tab. 4-5 Teoretické výsledky pro PLA při 190 °C

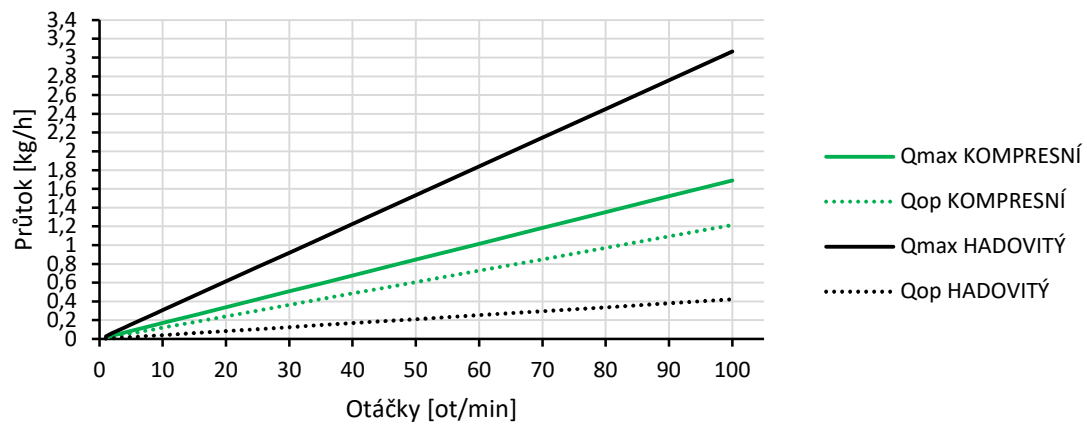
| Název | Označení | Kompresní | | Hadovitý | Jednotky |
|------------------------------|------------------|-------------------------|--|-------------------------|---------------------|
| | | Hodnota | | | |
| Otáčky motoru | N | 30 | | | min ⁻¹ |
| | | 0,5 | | | s ⁻¹ |
| Unášivá rychlost | V _d | 0,0148 | | 0,0125 | m/s |
| Maximální průtok | Q _{max} | 507,2 | | 919,5 | g/h |
| Smyková rychlost šneku | $\dot{\gamma}_s$ | 8,435 | | 2,783 | s ⁻¹ |
| Smyková rychlost trysky | $\dot{\gamma}_t$ | 144,653 | | 262,257 | s ⁻¹ |
| Dynamická viskozita v šneku | η_s | 854,657 | | 1019,417 | Pa·s |
| Dynamická viskozita v trysce | η_t | 543,932 | | 494,833 | Pa·s |
| Maximální tlak | P _{max} | 1 687 683 | | 92 698 | Pa |
| Faktor odporu trysky | K _t | 6,016·10 ⁻¹⁴ | | 6,613·10 ⁻¹⁴ | m ⁴ s/kg |
| Průtok v pracovním bodě | Q _{OP} | 239,3 | | 26,6 | g/h |
| Tlak v pracovním bodě | P _{op} | 891 193 | | 90 019 | Pa |

Teoretický průtok PLA při 190°C



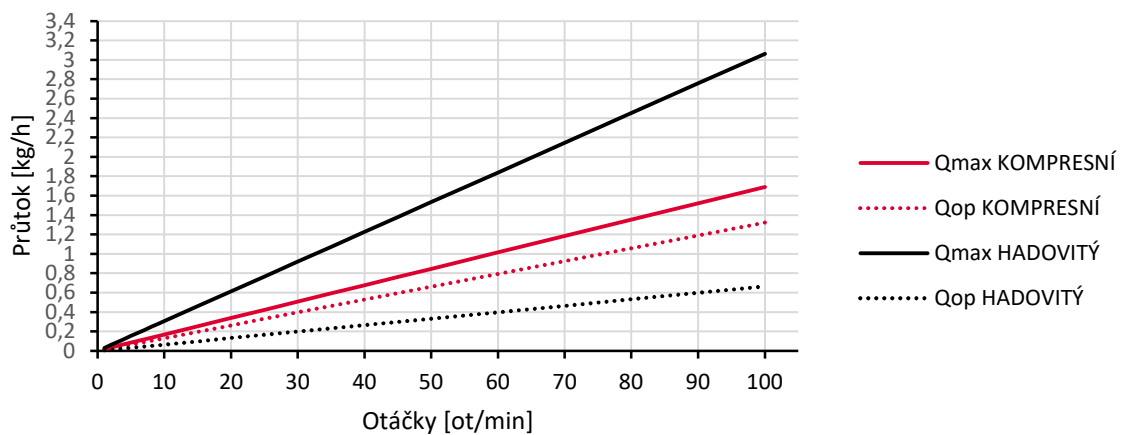
Obr. 4-11 Teoretický průtok PLA

Teoretický průtok ABS při 240°C



Obr. 4-12 Teoretický průtok ABS

Teoretický průtok PP při 200°C



Obr. 4-13 Teoretický průtok PP

Z údajů tabulky (Tab. 4-5) jsou nejvíce zajímavé právě hodnoty průtoku. Na první pohled se zdá, že hadovitý vrták má skoro 2krát vyšší maximální průtok než kompresní šroub a je tak jasnou volbou. Při hlubší analýze lze nicméně přijít na to, že průtok v pracovním bodě hadovitého vrtáku poklesl 34krát, přičemž průtok kompresního šroubu poklesl na téměř polovinu průtoku maximálního. Tohle chování se projevuje u všech porovnávaných polymerů a je lépe zobrazeno na obrázcích (Obr. 4-11, Obr. 4-12, Obr. 4-13). Tento rozdíl je způsoben právě pracovním tlakem, jak popisuje vztah (4-10) a je ovlivněn tvarem šroubu. U kompresního šroubu dochází k nárůstu tlaku vlivem jeho geometrie, hlavně malou hloubkou drážky, úhlem šroubovice a délkou sekce (4-13). Geometrie hadovitého vrtáku je vhodná na rychlou dopravu granulátu (obr. 2-11), nicméně právě jeho tvar se jeví ve výsledku jako kontraproduktivní s rozdílem téměř 13násobného poklesu pracovního tlaku oproti kompresnímu šroubu zapříčiňující malý pracovní průtok.

Pomocí přepočtu lze z průtoku vyjádřit rychlost tisku v milimetrech za sekundu. Výpočet nezahrnuje parametrizaci výšky tisknuté vrstvy, pouze rychlost extruze.

$$Q_{OP} = S_{tryska} v_{tryska} \rightarrow v_{tryska} = \frac{Q_{OP}}{S_{tryska}} \quad (4-18)$$

$$v_{tryska} = \frac{4 \cdot 5,24631 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 0,002^2} \cdot 1000 = 16,70 \text{ mm/s}$$

Rychlost tisku extruderu s kompresním šroubem pro 30 otáček za minutu je 16,70 mm/s. Rychlost tisku extruderu s hadovitým vrtákem pro 30 otáček za minutu je 1,89 mm/s.

Pro podmínky, na které je extruder navrhován, tj. základní průměr trysky 2 milimetry, rozsah teplot až do 350 °C, zpracovatelnost různých materiálů, se kompresní šroub jeví jako nejvhodnější volba z hlediska výpočtového, konstrukčního i technologického. Od této volby se budou dále odvíjet výpočty výkonu topného tělesa.

4.4 Volba topného tělesa

4.4.1 Výpočet výkonu topného tělesa

Pro výpočet byl zvolen konzervativní přístup, kdy se bude počítat s maximálním možným průtokem, aby nedošlo k potenciálnímu poddimenzování topných těles. Výkon se vypočítá dle rovnice (4-19), kdy první část vyjadřuje potřebný výkon k ohřevu materiálu o rozdíl počáteční a koncové teploty (teplota polymeru před a během tavení), druhá část vyjadřuje výkon k přeměně z pevného skupenství na kapalné.

$$P_{top} = \dot{m}c_p\Delta T + \dot{m}\Delta H \quad (4-19)$$

Kde:

| | | |
|------------|-------|-----------------------------|
| P_{top} | W | - výkon topného tělesa |
| c_p | J/kgK | - měrná tepelná kapacita |
| ΔT | K, °C | - rozdíl teplot |
| ΔH | J/kg | - měrné skupenské teplo |
| \dot{m} | kg/s | - hmotnostní průtok tryskou |

Výpočet výkonu se odvíjí od hmotnostního toku, proto rychlost tisku v_{tisk} bude zvolena na 100 mm/s, neboť tato hodnota se udává jako běžná rychlost u 3D tiskáren, a také bude tvořit jakousi pomyslnou krajní podmínku pro výpočet a návrh výkonu extruderu.

$$\dot{m} = \rho Q_{max} = \rho S_{tryska} v_{tisk} = \rho \frac{1}{4} \pi D^2 v_{tisk} \quad (4-20)$$

Kde:

| | | |
|--------------|-------------------|------------------------|
| ρ | kg/m ³ | - hustota polymeru |
| S_{tryska} | m ² | - průřez otvoru trysky |
| v_{tisk} | m/s | - rychlost tisku |

Při předpokladu, že teplota T_1 bude odpovídat teplotě prostředí laboratoře, bude tato teplota stanovena na 20 °C. Vypočtené hodnoty jsou stanoveny v tabulce (Tab. 4-6).

Tab. 4-6 Fyzikální vlastnosti polymerů a teoretický potřebný výkon

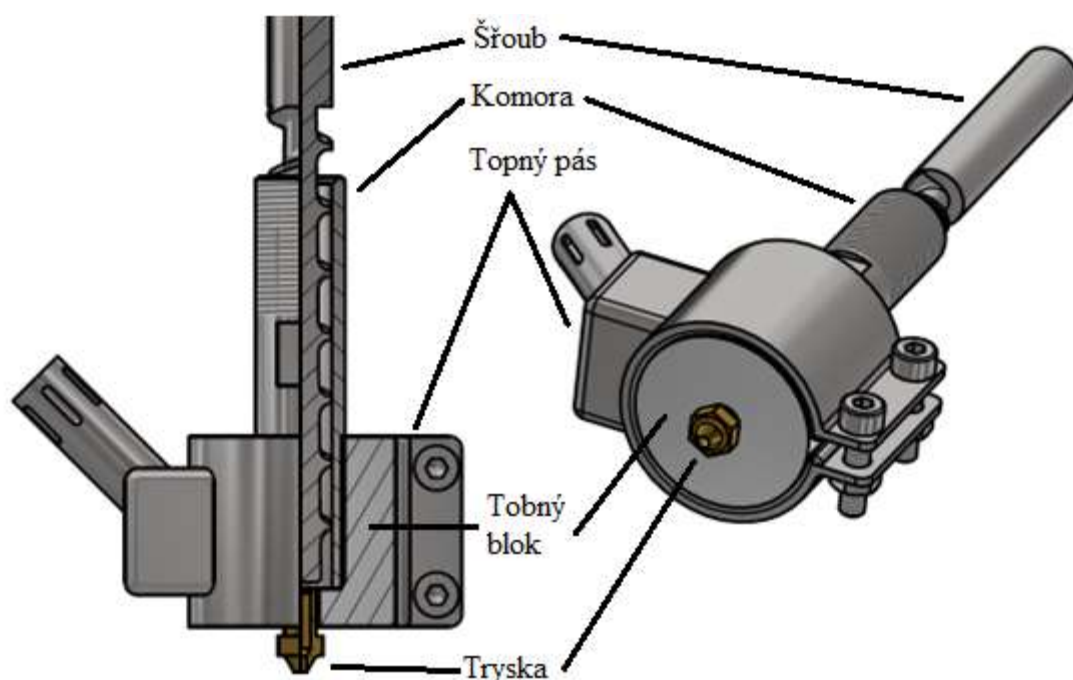
| Název | Označení | Typ polymeru | | | | Jednotky |
|------------------------|------------|--------------|-----------------|----------|----------|-------------------|
| | | PLA | PET | ABS | PP | |
| Hustota polymeru | ρ | 1240 | 1270 | 1040 | 855 | kg/m ³ |
| Měrná tepelná kapacita | c_p | 1800 | 1250 | 1865 | 1920 | J/kgK |
| Pracovní teplota | T_2 | 210 | 245 | 230 | 235 | K, °C |
| Měrné skupenské teplo | ΔH | 85341,99 | 140100 | - | 170000 | J/kg |
| Rychlost tisku | v_{tisk} | 100 | | | | mm/s |
| Potřebný výkon | P_{top} | 166,4743 | 168,1112 | 127,9621 | 156,5437 | W |

Při odhadované účinnosti zařízení 80 % a při uvažování dalšího experimentování s tímto prototypem bude výkon topného tělesa navržen na 300 W.

4.4.2 Typ topného tělesa

Topný pás

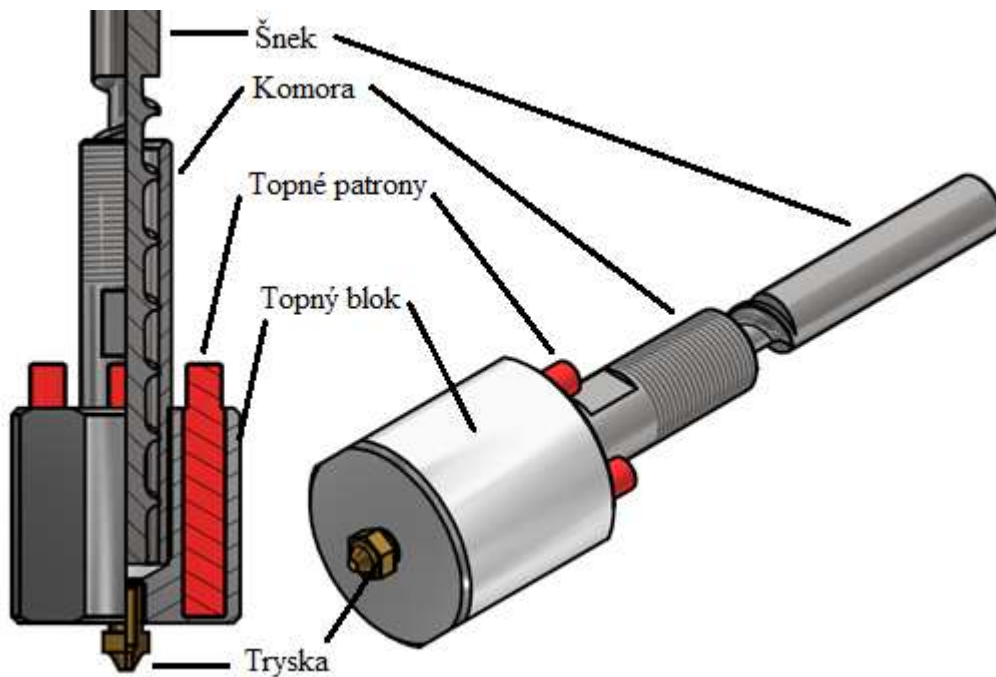
Topný pás (Obr. 4-14) disponuje rovnoměrným rozprostřením tepla po celém obvodu topného bloku. Mechanismus uchycení dvěma šrouby s maticemi dovoluje rychlou montáž či demontáž v případě poruchy pásu. Vyrábí se v různých velikostech a provedeních. Maximální měrný výkon bývá přibližně 6 W/cm^2 s maximální povrchovou teplotou $400 \text{ }^\circ\text{C}$ v závislosti na materiálu, rozměru a výrobci. Nevýhodou je využití pouze u pevně daných průměrů, neboť jakákoliv změna v rozměru topného bloku vyžaduje nový topný pás s jinými rozměry.



Obr. 4-14 Ohřívání topným pásem

Topné patrony

Topné patrony (Obr. 4-15) jsou oproti topnému pásu menšího rozměru, nicméně mohou být tak jako topné pásy vyráběny v mnoha průměrech a délkách. Nejčastěji jsou používány pro ohřev při zpracování plastů, ohřevu forem a nástrojů, vtokových systémů apod. Hlavní výhodou oproti pásům je vyšší povrchová teplota až $800 \text{ }^\circ\text{C}$, a také relativně vysoká intenzita, kdy u patron konkrétně pro tento návrh dosahuje intenzita 17 W/cm^2 .

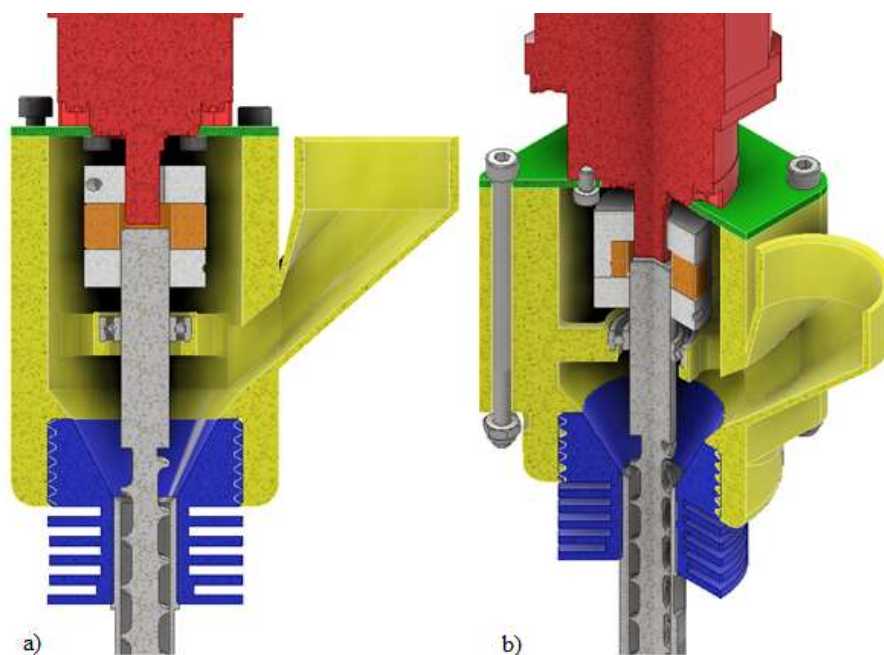


Obr. 4-15 Ohřívání topnými patronami

4.5 Systém upevnění hotendu

Varianta 1

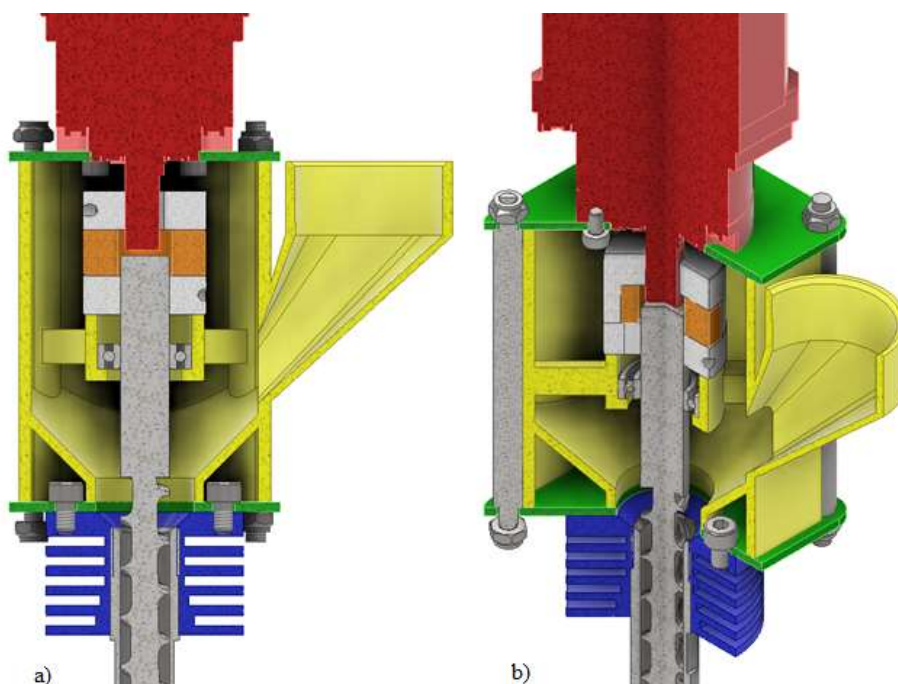
Tato varianta (Obr. 4-16) se vyznačuje jednoduchostí sestavení a malého počtu potřebných součástí, zapříčiňující lepší a rychlejší kompletaci či rozložení. Motor se zabudovanou převodovkou (červená) bude připevněn k násypce (žlutá) pomocí šroubů a spojovacího plechu (zelená). Chladič (modrá) spolu s komorou a topným blokem, dále jen hotend, se bude k násypce šroubovat. Šnek extruderu bude mít shodný směr otáčení se směrem závitu chladiče, aby se zamezilo odšroubování celého hotendu z násypky, například vlivem tření mezi šnekem a komorou. Násypka bude tištěna na 3D tiskárně z ABS, který má z ostatních dostupných materiálů nejvyšší teplotu skelného přechodu, pro případ nedostatečného výkonu chlazení.



Obr. 4-16 Řešení jedna; a) řez extruderem, b) tříčtvrteční řez

Varianta 2

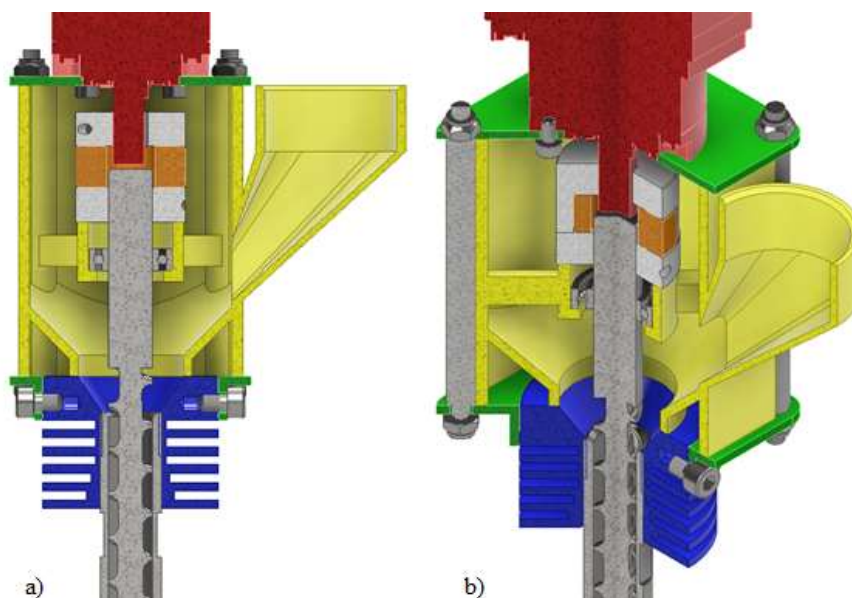
Druhá varianta se vyznačuje bytelnější konstrukcí v podobě užití čtyř distančních sloupků a dvou ocelových plátů tvořící pevnou klec, do které bude vsazena násypka. Hotend bude ke zbytku extruderu přichycen skrze chladič a spodní plát pomocí čtyř šroubů, které budou zakryty násypkou (Obr. 4-17). Tento typ konstrukce snese vyšší zatížení v krutu oproti variantě 1. Nevýhodou je však potřeba více součástí, časově náročnější a nepraktická montáž a demontáž, kdy je zapotřebí odšroubovat čtyři matice z distančních sloupků.



Obr. 4-17 Řešení dva; a) řez extruderem, b) tříčtvrteční řez

Varianta 3

Třetí varianta extruderu je modifikací předchozí varianty 2. Extruder sdílí stejně robustní tělo, čili konstrukci dvou plechů spojenými čtyřmi šrouby s vkládanou násypkou. Zásadní rozdíl a vylepšení oproti variantě 2 je přizpůsobení tvaru spodního ocelového plechu vůči chladiči (Obr. 4-18). Chladič opatřený čtyřmi dírami se závity po obvodu se zasune do upraveného spodního plechu a zajistí se čtyřmi šrouby. Nemusí se tak rozebírat celá konstrukce. Nevýhodou je vyšší náročnost na výrobu součástí, zejména spodního plechu.



Obr. 4-18 Řešení tří; a) řez extruderem, b) tříčtvrteční řez

4.6 Typ trysky

Navrhovaná tryska

Výhodou je možnost návrhu a výroby optimalizované trysky s dosáhnutím co nejlepšího průtoku vlivem redukce odporu trysky. Vlastní výrobou lze také dosáhnout většího průměru či jiného tvaru průřezu dle požadavku, pro objemnější metody tisku. Nevýhodou je potom nekompatibilita s komerčními tryskami, kvůli většímu rozměru závitové díry pro trysku v topném bloku.

Upravovaná komerční tryska

Rozměry komerčních trysek jsou typizovány, a proto není nutný celý návrh. Trysky určené pro filament 2,75 mm mají vstupní průměr rozměr 3,2 mm. Úprava výstupního otvoru spočívá v převrtání existující díry na požadovaný rozměr, přičemž lze komerční trysku upravit až na velikost otvoru 4 milimetry. Užití větších rozměrů výstupního průměru (>4 mm) je limitováno tvarem a konstrukcí trysky.

4.7 Typ chlazení

Stlačený vzduch

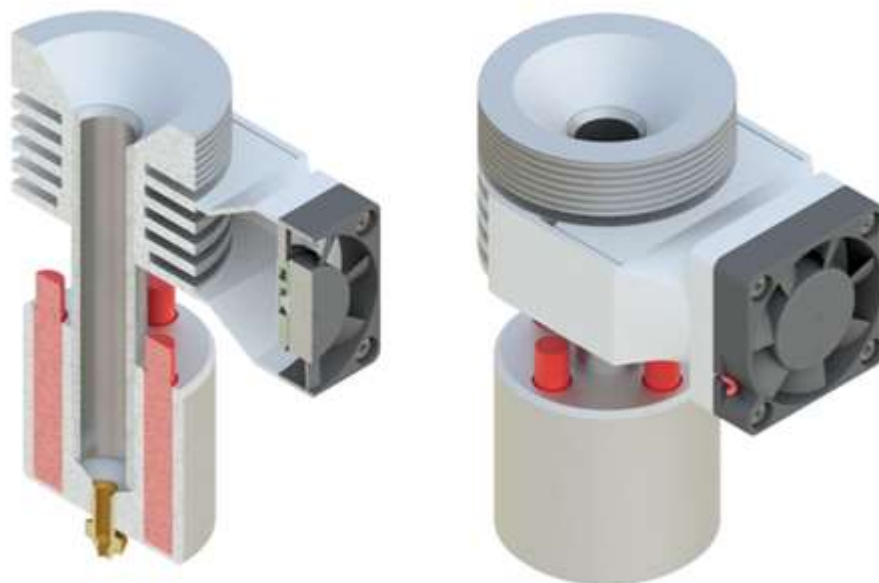
Laboratoř, ve které se robot nachází, je vybavena pneumatickým obvodem se stlačeným vzduchem, který lze využít při chlazení extruderu. Stlačený vzduch umožňuje lepší chlazení díky vyšší rychlosti proudění vzduchu skrz žebra chladiče vlivem vysokého tlaku. Nevýhodou tohoto způsobu chlazení je vysoká hlučnost, a také limitace použití extruderu pouze pro pracoviště poskytující stlačený vzduch.



Obr. 4-19 Příruba na stlačený vzduch

Ventilátor

Jako nejuniverzálnější řešení aktivního chlazení je použití ventilátoru. Lze jej pořídit v různých velikostech s různým rozsahem otáček. Provoz ventilátoru je tichý v porovnání se stlačeným vzduchem. Použití extruderu s namontovaným ventilátorem není limitováno potřebou pneumatického obvodu na pracovišti, a lze použít prakticky všude.



Obr. 4-20 Chlazení ventilátorem

Pasivní chlazení

Pasivní chlazení spočívá v chlazení komory a odvodu tepla do okolního vzduchu čistě skrze žebra chladiče. Efektivita předávání tepla závisí na stykové ploše a geometrii samotného chladiče. Neužívá žádných pohyblivých částí, které by zapříčiňovaly dodatečné proudění vzduchu.

4.8 Shrnutí výběru

Volba uspořádání

V případě paralelního uspořádání je třeba upevnit motor z boku a navrhnout uchycení převodu s krytováním. Tohle uspořádání disponuje menším rozměrem ve svislé ose s potencionálním využitím na rámové 3D tiskárně. Nicméně přítomnost převodu zvyšuje náročnost konstrukce, vyžaduje použití více součástí a tímto zvyšuje hmotnost extruderu, ale i náklady na výrobu. Uspořádání tzv. v sérii se jeví jako výhodnější s ohledem na jednoduchost konstrukce a počet použitých dílů. Pozice motoru v horní části navíc umožňuje prostor na uchycení ventilátorů po bocích extruderu. Z vizuálního hlediska se jedná také o designově elegantnější řešení.

Volba pohonu

Nejvhodnějším řešením je výběr krokového motoru osazeného planetovou převodovkou, který spolu s driverem může být ovládaný vývojovou deskou Arduina. Konečný výběr ovšem záleží na celkovém rozpočtu pro všechny části pohonu a na požadovaných parametrech pohonu.

Volba šroubu

Hadovitý vrták je oproti kompresnímu šroubu cenově přívětivější (5krát levnější) a velmi snadno dostupný. Vyniká vyšším maximálním průtokem vlivem jeho geometrie, zároveň ale mezi nevýhody tohoto nekonvenčního šroubu patří právě vysoká hloubka drážky, která zvyšuje potřebný čas na protavení. Kompresní poměr 1:1 způsobuje horší homogenitu, navíc zde nefunguje efekt eliminování vzduchových bublinek, který má za následek snížení kvality extrudátu.

Kompresní šroub má naopak menší maximální průtok, nicméně geometrií odpovídá tak, aby se co nejvíce přiblížil optimálním podmínkám extruze polymerů. Vlivem kompresního poměru 1:1,43 má schopnost vytlačovat vzduch z taveniny. Nižší hloubka drážky v homogenizační zóně znamená méně objemu, rychlejší ohřev materiálu, a tudíž lze tisknout vyššími rychlostmi tisku. Jak už bylo nastíněno v kapitole 4.3.4, pro předem dané podmínky, které má extruder splňovat, a na které je navrhován, vychází kompresní šroub z hlediska výpočtového, konstrukčního i technologického jako nejvhodnější volba.

Vlastní design šroubu nepřipadá v úvahu, neboť tento proces vyžaduje reálná data z provozu či testování. Ačkoliv jsou k dispozici data od různých firem, tyto parametry existujících šroubů jsou uplatnitelné vždy pouze pro konkrétní zpracovávaný polymer. V případě této bakalářské práce je plánováno zpracování a experimentování s různorodými typy polymerů. Proto se tato kapitola zaměřuje pouze na dostupné šrouby na trhu malých rozměrů.

Volba ohřevu

Pro ohřev komor extruderů se běžně ve velké míře využívají topné pásy. Jsou velmi vhodné pro velké průměry extruderů, díky rovnoměrnému rozložení tepla po celé styčné ploše. Topné pásy pro malé průměry však nejsou rozšířené a jsou drahé. Proto jsou zvoleny topné patrony. Mají vyšší měrný výkon oproti topným pásům, navíc jsou menšího rozměru. Při navýšení celkového výkonu stačí přidat další patrony do stávajícího bloku, oproti tomu pásy s vyšším výkonem jsou zpravidla vyráběny na velké průměry.

Volba mechanismu sestavení

Po porovnání všech tří variant byla vybrána varianta 1. Bylo tak učiněno na základě jednoduchosti sestavení a praktičnosti při čištění, kontroly součástí.

Volba trysky

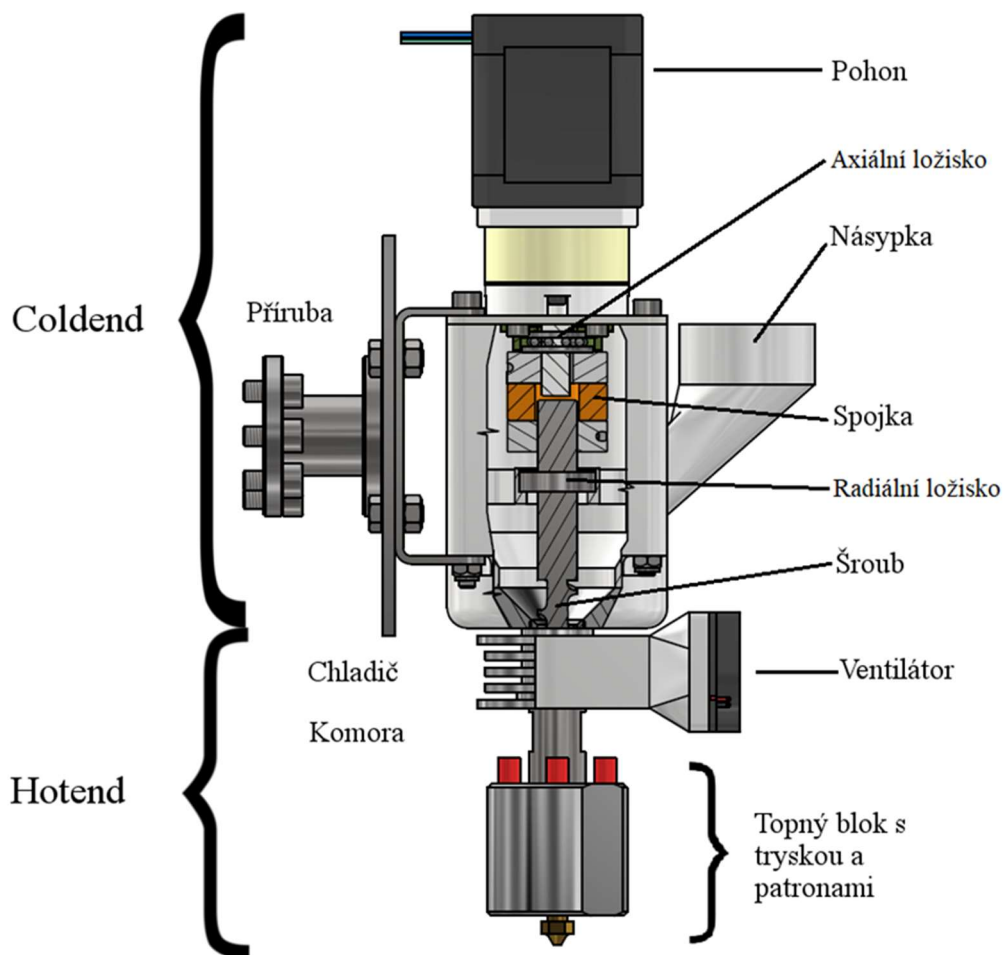
Jelikož byl tento extruder navrhován pro tisk s tryskou s výchozí hodnotou 2 milimetry, byl vybrán typ komerční trysky pro tisk z filamentu 2,75mm. Tento typ trysek má větší rozměry děr, a hlavně odpadá proces výroby celé trysky. Jedinou úpravou bude zvětšení výstupní díry dle potřeby.

Volba chlazení

Ačkoliv laboratoř disponuje pneumatickým obvodem, bylo vybráno řešení s použitím ventilátoru. Provoz je tišší než u stlačeného vzduchu. Extruder není závislý na pneumatickém obvodě, a lze použít i externě. Je možné regulování otáček a tím rychlost proudění vzduchu.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Konstrukce extruderu pro tisk z více druhů polymerů se skládá ze 2 hlavních částí: coldend a hotend (Obr. 5-1).



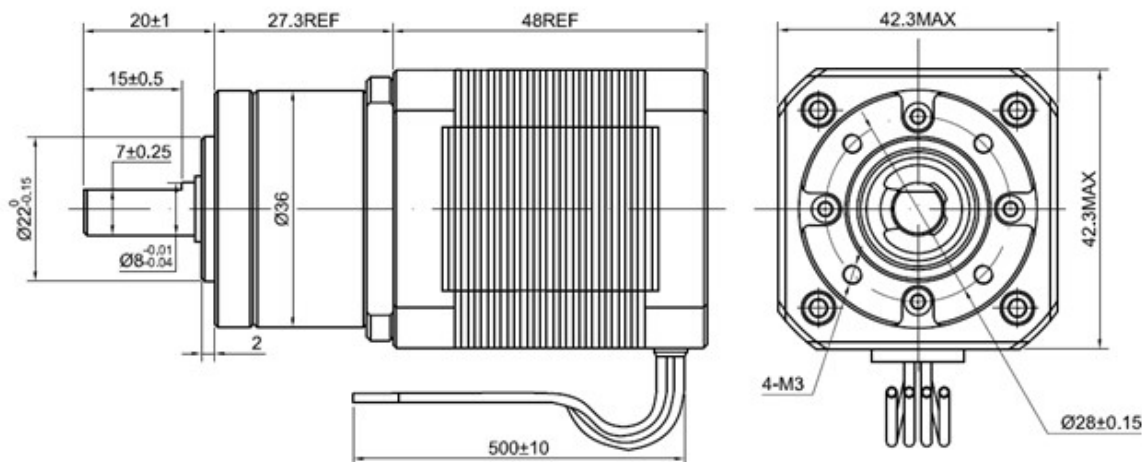
Obr. 5-1 Navrhnutý extruder

5.1 Coldend

5.1.1 Pohon

Jako pohonná jednotka tohoto extruderu byl zvolen krokový motor NEMA 17 s planetovou převodovkou s převodovým poměrem 5,18:1 a maximálním kroučícím momentem 2 Nm (Obr. 5-2). Tento motor byl vybrán na základě podobnosti s extruderem PX0850 v4 od výrobce Mahor a dvou technických prací [40,52]. Parametry motoru jsou uvedeny v příloze.

Pro ověření potřebného krouticího momentu by bylo ideální experimentální měření pro jeho stanovení. Jelikož tato možnost neexistuje, bude krouticí moment vybraného motoru zkontrolován výpočtem, kterým se zabývá kapitola 5.3.

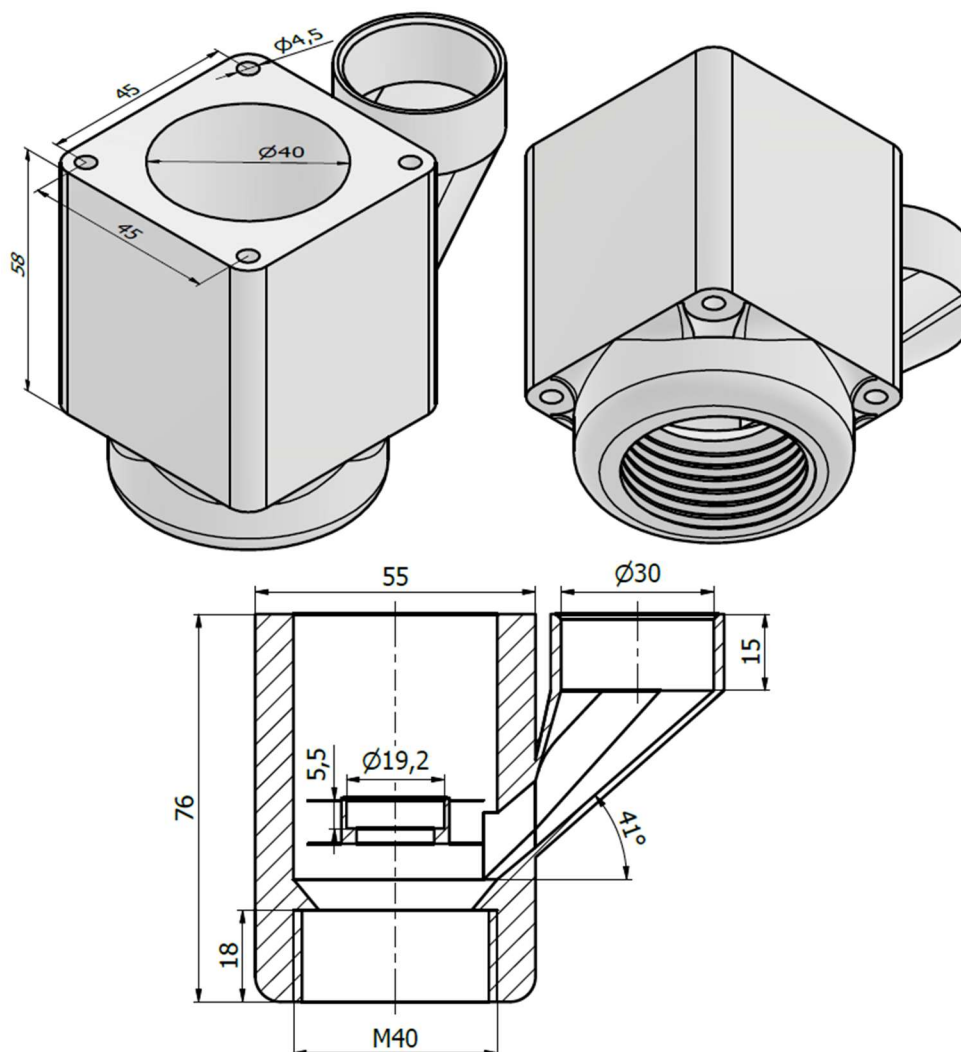


Obr. 5-2 Rozměry motoru [53]

5.1.2 Násypka

Násypka je tištěna na 3D tiskárně z materiálu ABS (Obr. 5-3). Technologie výroby byla zvolena kvůli komplexnosti tvaru a designu tohoto dílu. Materiál byl vybrán pro jeho nejvyšší teplotu skelného přechodu (přibližně 105 °C) z běžně dostupných materiálů pro 3D tisk.

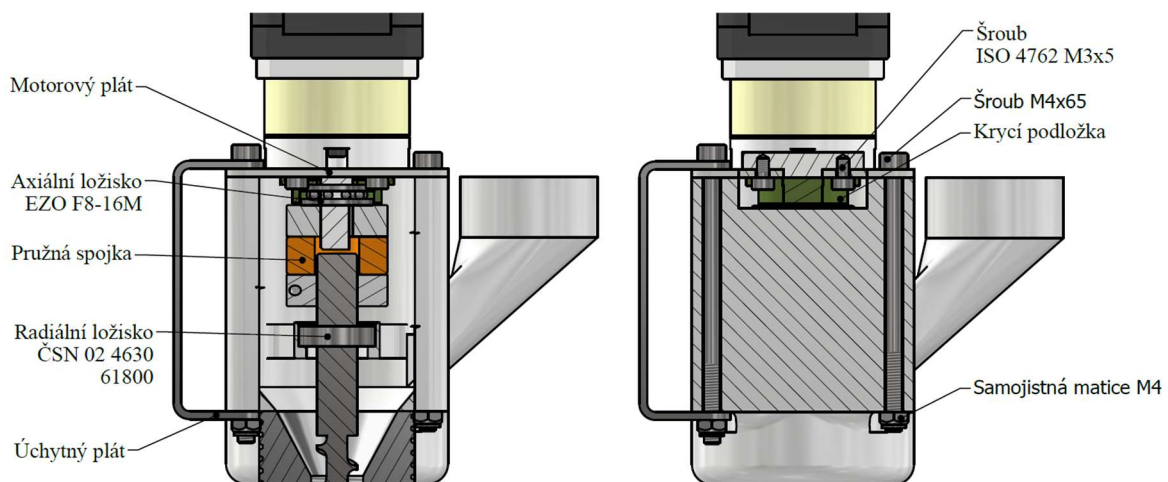
Tento design násypky zprostředkovává více funkcí zároveň. Zboku je přiveden svod na přívod granulátu s úhlem sklonu 41°, který vyhovuje sypkému úhlu granulátu i drti. Spodní část násypky je opatřena závitem, do kterého se šroubuje celý hotend. Ve střední části se vyskytuje domek pro radiální ložisko, které bude zajišťovat, aby osa šroubu byla zároveň s osou komory a nedocházelo k házení od spojky. V rozích násypky jsou 4 otvory pro šrouby, které k násypce připevňují motor.



Obr. 5-3 Náсыпка

5.1.3 Uložení komponent

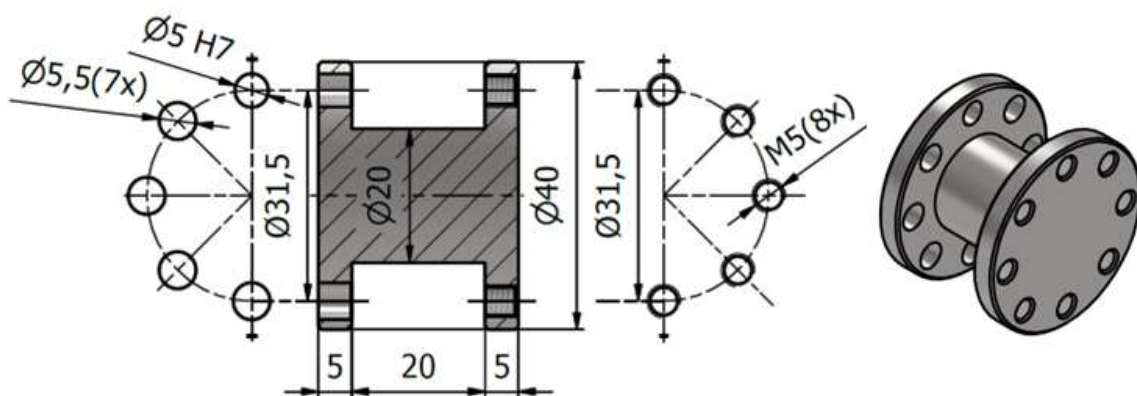
Motorový plát je ke krokovému motoru přišroubován čtyřmi šrouby M3x5. Dále je na hřídel od převodovky nasazena krycí podložka, která slouží jako uložení a kryt pro axiální ložisko. Toto axiální ložisko přenáší sílu šroubu od tlaku v komoře do konstrukce a zabraňuje poškození převodovky. Do správné pozice je dotlačeno pružnou spojkou. Z druhé strany spojky je upevněn kompresní šroub s předem nasazeným radiálním ložiskem. Sestava motor – plát – podložka – axiální ložisko – spojka – šroub s ložiskem je následně vložena do náсыпки a zajištěna šrouby M4x65 a samojistnými maticemi (Obr. 5-4). Až na závěr se ze spodu přišroubuje hotend.



Obr. 5-4 Uložení komponent extruderu

5.1.4 Příruba

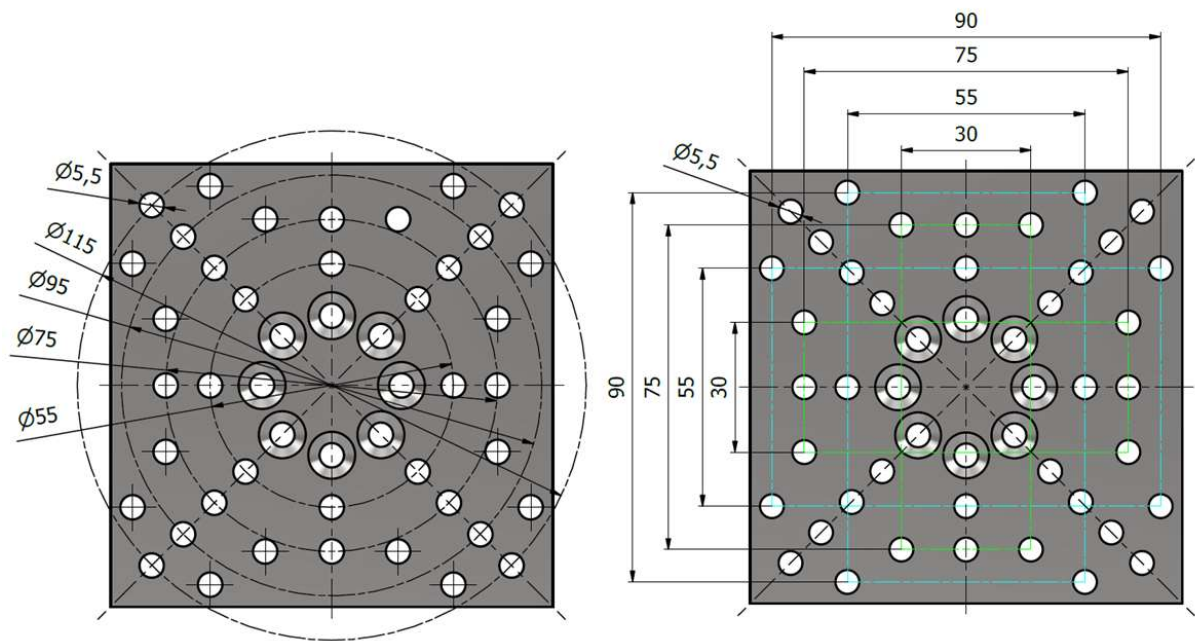
Uchycení extruderu k ramenu robota KR 8 R1620 je zprostředkováno menší přírubou (Obr. 5-5) a upínací deskou (Obr. 5-6) tvořící univerzální přírubu na robot. Deska je opatřena dírami o průměru 5,5 milimetrů uspořádanými do kruhových a obdélníkových tvarů. Tyto uspořádání dovolují uchycení různorodých nástrojů k této přírubě a celkově k robotickému rameni.



Obr. 5-5 Malá příruba

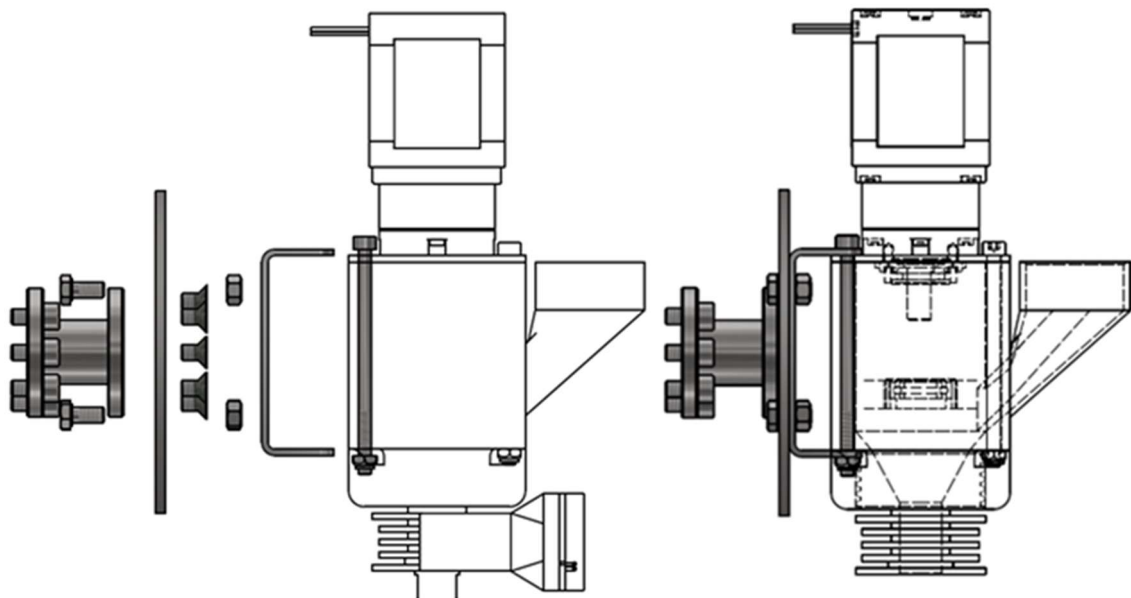
Upínací deska (Obr. 5-6) umožňuje 2 typy uchycení. Prvním typem jsou díry v kruhovém uspořádání v rozmezí průměru roztečné kružnice od 55 do 115 milimetrů. V případě odejmutí upínací desky lze efektor připevnit rovnou na malou přírubu (Obr. 5-5), která je opatřena 8 dírami se závity M5.

Druhým typem uchycení, kterou deska disponuje, jsou díry v obdélníkovém uspořádání. Tyto uspořádání jsou rozdělené na menší zelené a větší modré obdélníky o rozměrech 30x75 a 55x90 milimetrů.



Obr. 5-6 Upínací deska

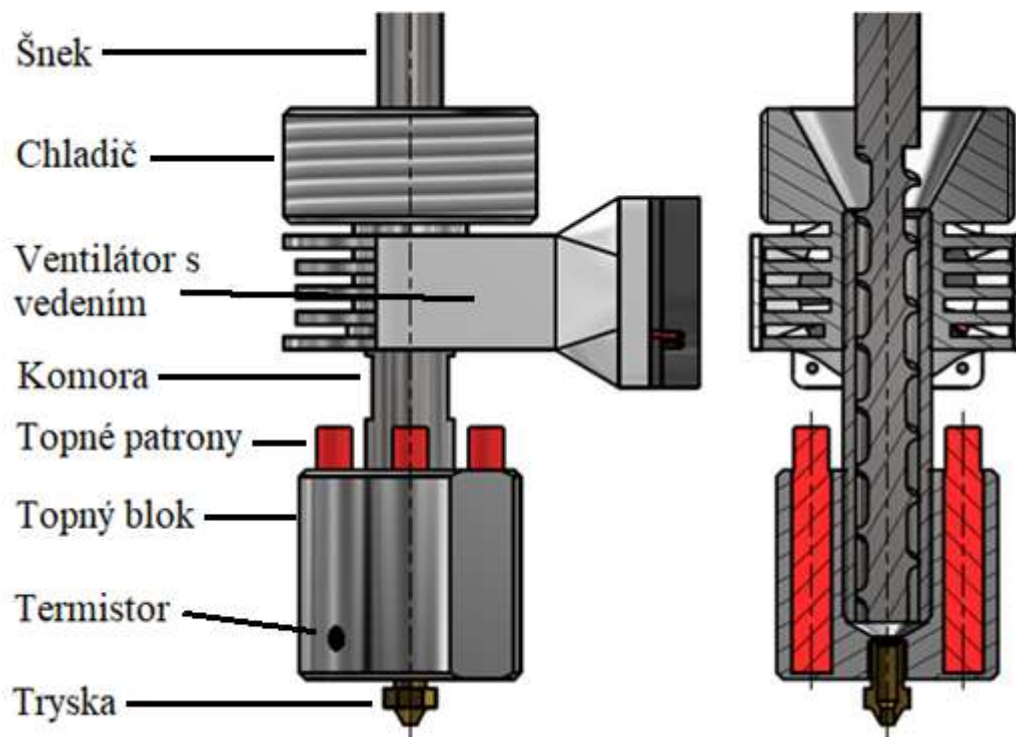
Extruder se k přírubě, respektive k upínací desce, upevňuje čtyřmi šrouby a maticemi skrze úchytný plát (Obr. 5-7).



Obr. 5-7 Uchycení extruderu k přírubě

5.2 Hotend

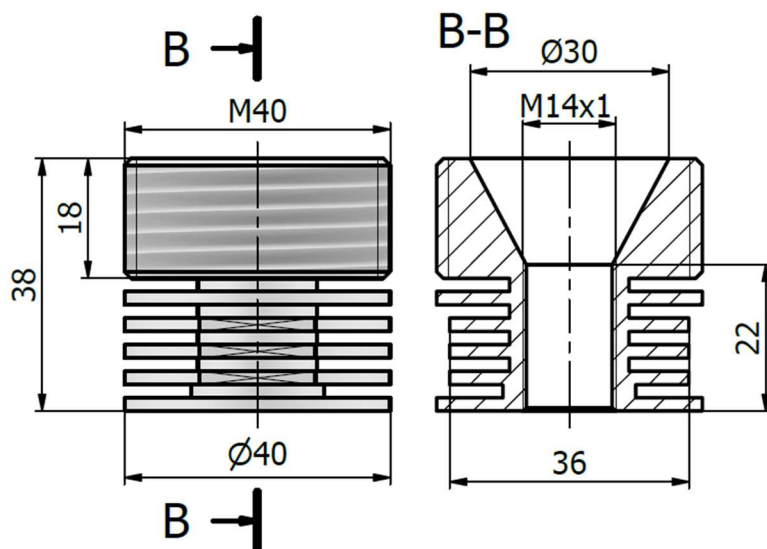
Hotend (Obr. 5-8) je navržen a zkonstruován tak, aby se dal od zbytku extruderu odmontovat vcelku, ale i jednotlivě, podle potřeby výměny součástí. Byl kladen důraz na jednoduchost při montáži i demontáži, aby byla eliminována nutnost rozebrání celého extruderu na jednotlivé díly.



Obr. 5-8 Hotend

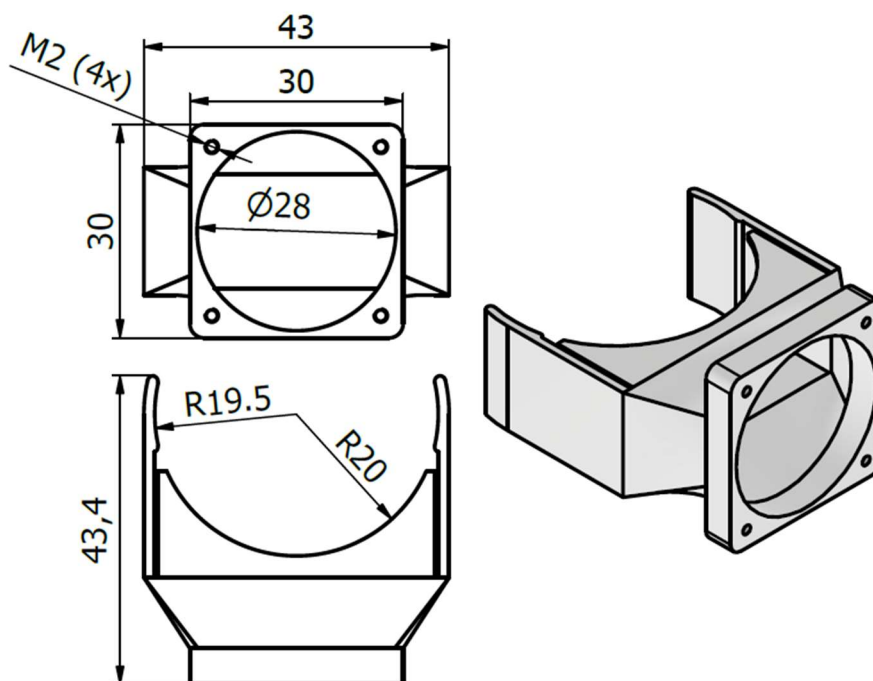
5.2.1 Chladič

Tato součást bude vyráběna ze slitiny hliníku AW 6082, která je dobře obrobitelná a její tepelná vodivost se pohybuje od 170 do 200 W/mK. Chladič (Obr. 5-9) je opatřen vnějším závitem M40, který se bude šroubovat do násypky, přičemž spoj bude opatřen teflonovou páskou pro co největší eliminování přenosu tepla. Vnitřní závit M14x1 bude spojovat chladič s komorou. Po stranách žeber chladiče budou vyfrézovány 2 drážky pro lepší manipulaci, například při zaseknutí, kdy se může použít klíč o velikosti 36.



Obr. 5-9 Chladič

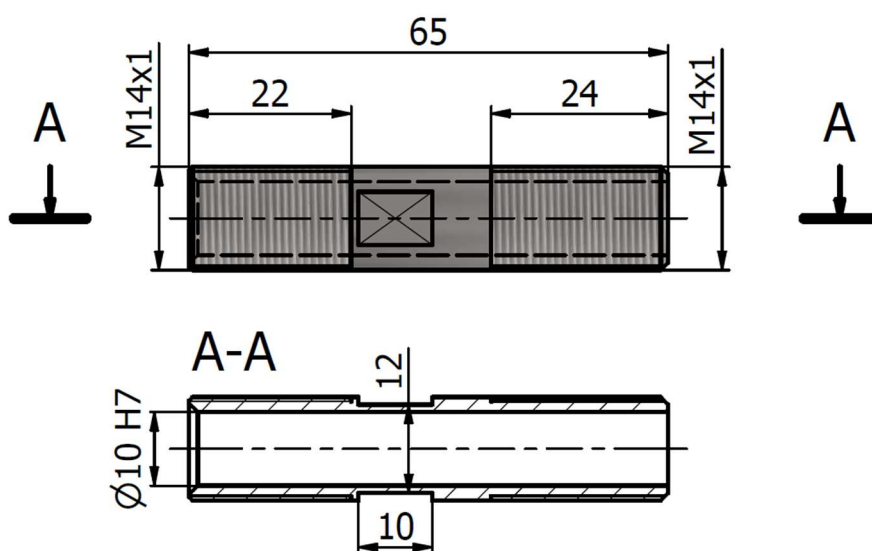
Aktivní odebrání tepla chladiči zajišťuje ventilátor. Je připevněný čtyřmi šrouby k 3D vytisknutému vedení z ABS (Obr. 5-10). Na chladič se nasazuje jednoduchým nacvaknutím, lze tedy kdykoliv oddělat nebo pootočit dle potřeby. Samotný ventilátor lze navíc z vedení odmontovat a na přírubu je možné připevnit jiný typ chlazení, například redukci pro pneumatické chlazení.



Obr. 5-10 Vedení ventilátoru

5.2.2 Komora

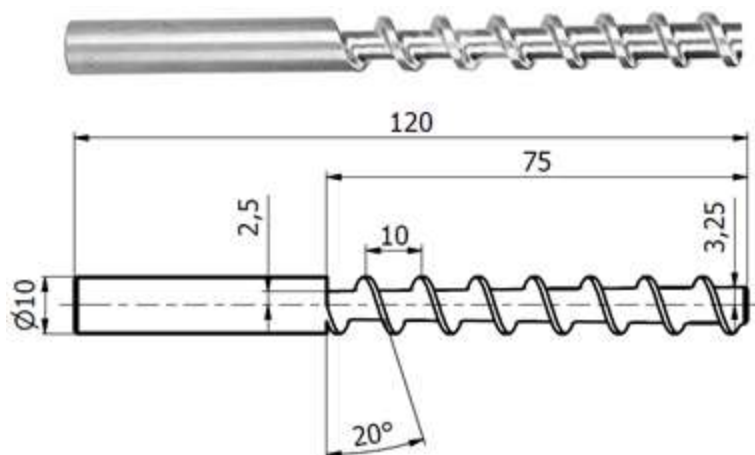
Celý díl se bude vyrábět z nerezové oceli 1.4301. Komora je navržena z jednoho kusu, aby se nemusela nijak tepelně ošetřovat ani vložkovat (Obr. 5-11). Díra je tolerována v závislosti na velikosti šroubu, aby se součásti mezi sebou zbytečně neopotřebovávaly, nicméně je také brán zřetel na velikost propustnosti viz. kapitola 2.3.5 – Geometrie šroubu. Komora je opatřena dvěma závity na obou koncích, na kratší přijde chladič, na delší topný blok. Uprostřed jsou drážky pro dotažení či povelení klíčem velikosti 12.



Obr. 5-11 Komora

5.2.3 Šnek

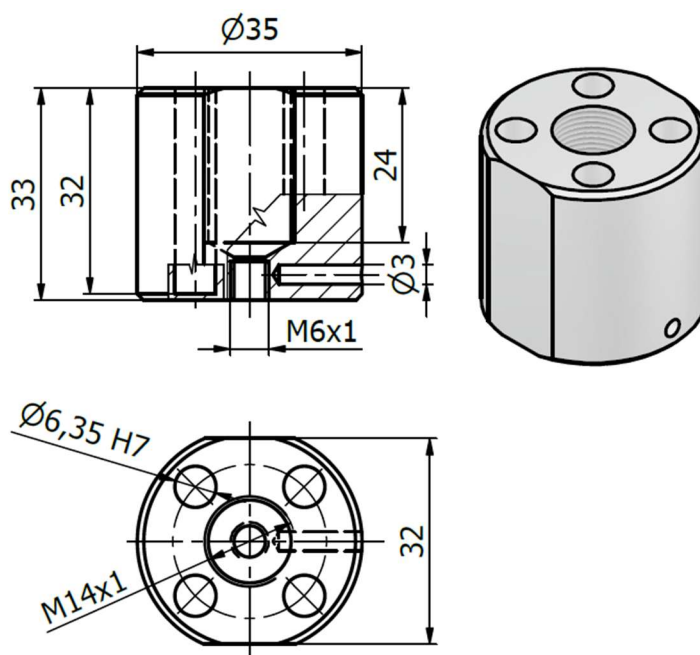
Pro prototyp extruderu je zvolen kupovaný kompresní šroub. Jeho volba je popsána a odůvodněna v kapitole 4, Koncepční řešení. Délka šroubu je 120 milimetrů s funkční délkou závitu 75 milimetrů. Materiál šroubu je nerezová ocel 304, jak uvádí výrobce ZANYAPRT.



Obr. 5-12 Šroub extruderu [48]

5.2.4 Topný blok

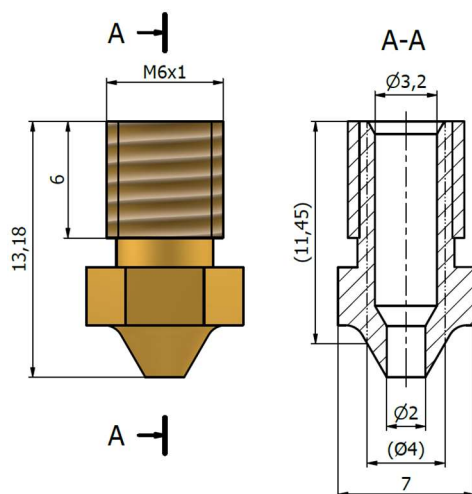
Topný blok je z materiálu jako chladič, konkrétně ze slitiny hliníku AW 6082. Tento materiál má vhodné vlastnosti. Tepelná vodivost se pohybuje v rozmezí hodnot 170–200 W/mK, navíc je dobře obrobitelný. Blok (Obr. 5-13) se bude šroubovat na komoru, které bude předávat teplo skrze závitový spoj od čtyř topných patron o celkovém maximálním výkonu 300 W (kapitola 4.4.1). Patrony budou vsunuty do děr s tolerancí H7, doporučenou výrobcem. Z boku kolmo k ose topného bloku je vrtaná díra pro termistor HT-NTC100K, s rozsahem měření teplot do 350 °C.



Obr. 5-13 Topný blok (Heatblock)

5.2.5 Tryska

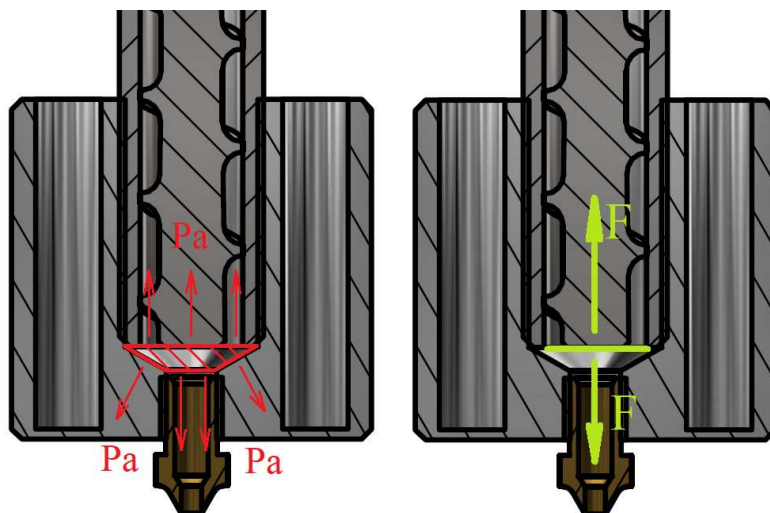
Tento extruder bude primárně sloužit k tisku čistých polymerů, a proto je pro tento účel volena konvenční tryska z mosazi, jež je populární u běžných 3D tiskáren, a tudíž je i levná. Její úprava spočívá v převrtání otvoru na požadovaný rozměr. Na obrázku (Obr. 5-14) je také zobrazen maximální možný průměr 4 milimetry, který lze u této trysky vyrobit. Zbytek rozměrů trysky zůstane původní. Díky tomu lze na extruder montovat více průměrů trysek.



Obr. 5-14 Tryska

5.3 Analýza tlaků a sil

Uvnitř komory v oblasti konce šneku a začátku trysky roste tlak. Jeho působení však generuje síly, které se přenášejí do celé konstrukce extruderu (Obr. 5-15). Proto je nutné udělat výpočty a zkontrolovat slabá místa pro eliminaci poškození.



Obr. 5-15 Tlaky a síly v komoře extruderu

Při uvažování rychlosti tisku 100 mm/s jako maximální hodnoty, se v komoře naakumuluje tlak na nejvyšší hodnotu 7,7 MPa při porovnání použití PLA, ABS, PP. Přepočtem lze vyjádřit sílu působící na součásti extruderu.

$$p_{kom} = \frac{F_{axi}}{S_{kom}} \rightarrow F_{axi} = p_{kom} \cdot S_{kom} = p_{kom} \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \cdot 7,7 \cdot \pi \cdot 10^2 \quad (5-1)$$

$$F_{axi} = 604,8 \text{ N}$$

Kde:

- p_{kom} MPa - tlak v komoře
 S_{kom} mm² - průřez otvoru komory
 F_{axi} N - síla v ose šroubu od tlaku v komoře

Kontrola výběru motoru

Nyní lze porovnat a zkontrolovat volbu motoru, respektive jeho kroutící moment, zda je dostatečný pro funkční extruzi polymeru. Pro ověření je použit vztah (bez uvažování tření):

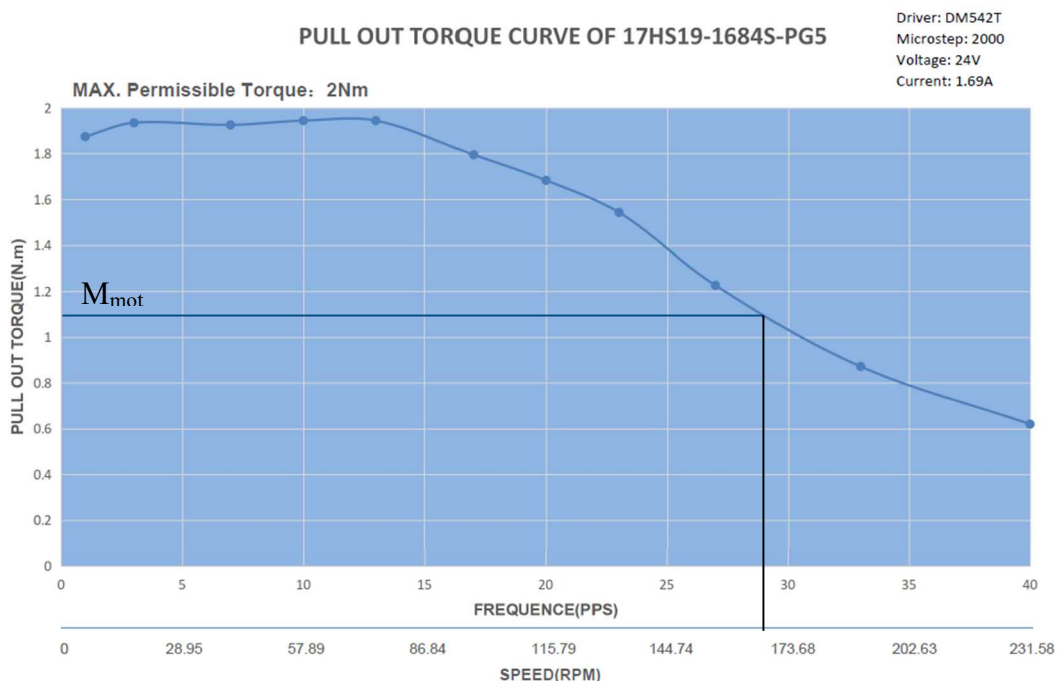
$$M_{mot} = \frac{F_{axi} \cdot p}{2\pi} = \frac{F\pi D \tan \theta}{2\pi} = \frac{604,8 \cdot \pi \cdot 0,01 \cdot \tan 20}{2\pi} \quad (5-2)$$
$$M_{mot} \geq 1,1 Nm$$

Kde:

- M_{mot} Nm - minimální potřebný kroutící moment od motoru
 p m - rozteč závitů

Z rovnice (5-2) byl vypočítán minimální potřebný kroutící moment na to, aby byl motor schopen šroubem posunovat polymer dál do komory až ven skrze trysku.

Na následujícím obrázku (Obr. 5-16) je zobrazen průběh momentové křivky zvoleného motoru. Porovnáním s tabulkou (Tab. 5-1) pod obrázkem lze dojít k závěru, že je motor teoreticky schopen rychlosti tisku 100 mm/s u dvou ze tří typů polymerů. U polymeru PLA je schopen extruder s tímto motorem tisknout rychlostí okolo 80 mm/s.



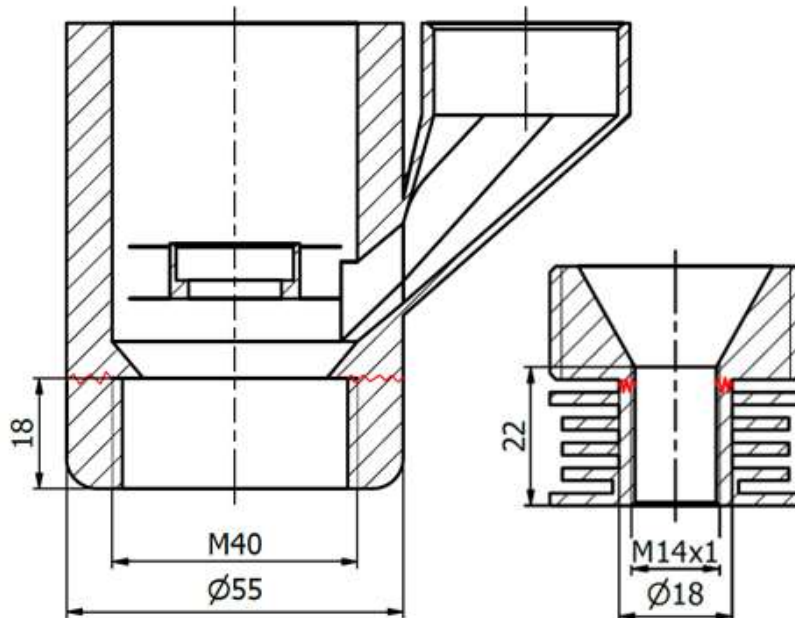
Obr. 5-16 Momentová křivka motoru [53]

Tab. 5-1 Rychlost tisku při daných otáčkách

| PLA 190 °C | | ABS 240 °C | | PP 200 °C | |
|------------|-------|------------|-------|-----------|-------|
| N (min) | mm/s | N (min) | mm/s | N (min) | mm/s |
| 20 | 11,4 | 10 | 8,7 | 10 | 9,4 |
| 35 | 19,9 | 25 | 21,7 | 20 | 18,9 |
| 50 | 28,4 | 35 | 30,4 | 35 | 33,0 |
| 70 | 39,8 | 45 | 39,0 | 45 | 42,5 |
| 90 | 51,2 | 60 | 52,0 | 50 | 47,2 |
| 110 | 62,6 | 70 | 60,7 | 70 | 66,1 |
| 120 | 68,3 | 80 | 69,4 | 90 | 84,9 |
| 140 | 79,6 | 90 | 78,1 | 110 | 103,8 |
| 160 | 91,0 | 100 | 86,7 | | |
| 180 | 102,4 | 120 | 104,1 | | |

Namáhání od pohonu

V případě zaseknutí šneku se zátěž, kroutící moment, přenáší od komory přes chladič až do konstrukce násypky. Proto je nutné zkontrolovat kritická místa chladiče (Obr. 5-17), ale hlavně u násypky, jelikož je vyrobena z nejméně pevného materiálu, a to z ABS.



Obr. 5-17 Kritická místa součástí

Součásti jsou namáhané na krut od motoru. První kontrolní výpočet (5-3) je tedy na napětí v krutu ve vyznačených kritických místech. Druhý výpočet (5-4, 5-5) se týká kontroly na tah a třetí (5-6) otlacení závitů. Všechny výsledky jsou uvedeny v tabulce.

$$\tau_k = \frac{M_{kM}}{W_{kO}} = \frac{M_{kM}}{\frac{\pi(D_{>}^4 - D_{<}^4)}{16D_{>}}} = \frac{16D_{>}M_{kM}}{\pi(D_{>}^4 - D_{<}^4)} \leq \tau_{dov}$$

$$\tau_{dov} = 0,5R_e$$
(5-3)

Kde:

| | | |
|--------------|-----------------|---|
| τ_k | MPa | - napětí v krutu |
| τ_{dov} | MPa | - dovolené napětí v krutu |
| M_{kM} | Nmm | - kroučící moment od motoru |
| W_{kO} | mm ⁴ | - modul průřezu v krutu |
| $D_{>}/<$ | mm | - větší průměr (rozměr) / menší průměr (rozměr) |
| R_e | MPa | - napětí na mezi kluzu |

Kontrola kritických míst na tah

Nutné podotknout, že vztah neuvažuje tření mezi závity.

$$M_{kM} = \frac{F \cdot p}{2\pi} \rightarrow F = \frac{2\pi M_{kM}}{p}$$
(5-4)

Kde:

| | | |
|----------|-----|---|
| M_{kM} | Nmm | - kroučící moment od motoru |
| F | N | - síla v ose vzniklá kroučícím momentem |
| p | mm | - rozteč závitů |

$$\sigma = \frac{F + F_{axi}}{S_{kr}} \leq R_e$$
(5-5)

Kde:

| | | |
|----------|-----------------|---------------------------|
| σ | MPa | - napětí v tahu |
| S_{kr} | mm ² | - průřez kritického místa |

Kontrola na otláčení závitů

$$p_z = \frac{F + F_{axi}}{\pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot z} \leq p_{dov}$$

$$p_{dov} = 0,25R_e$$
(5-6)

Kde:

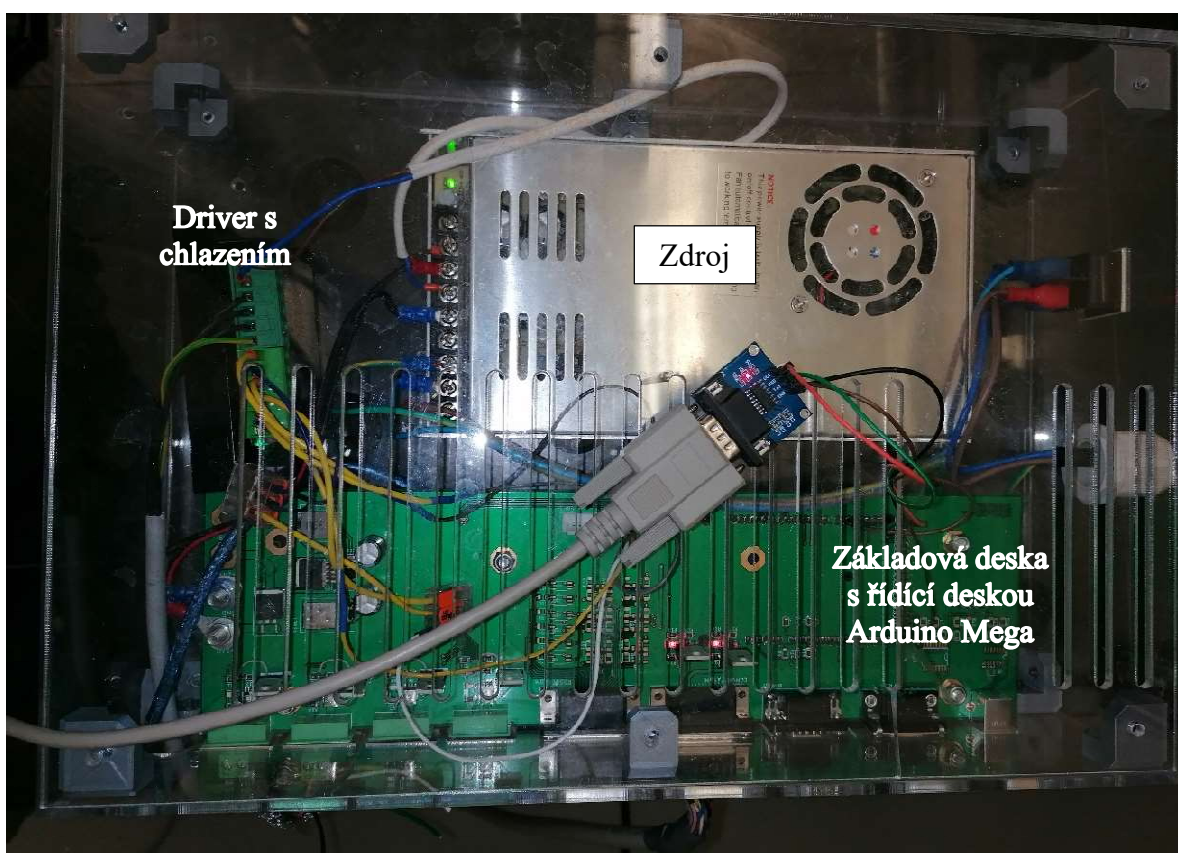
| | | |
|-----------|-----|----------------------------------|
| p_z | MPa | - tlak v závitech |
| p_{dov} | MPa | - dovolený tlak v závitech |
| d_2 | mm | - střední průměr závitu |
| H_1 | mm | - nosná hloubka závitu |
| z | - | - počet závitů šroubu / v matici |

| | Chladič | Násypka | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| Materiál | AW 6082-T6 | ABS | |
| Veličina | Hodnota | | Jednotky |
| R_e | 250 | ~18 | MPa |
| τ_{dov} | 125 | 9 | MPa |
| p_{dov} | 62,5 | 4,5 | MPa |
| M_{kM} | 2000 | 2000 | Nmm |
| W_{kO} | 726,06 | 23528,48 | mm ⁴ |
| τ_K | 2,75 | 0,09 | MPa |
| | $\tau_K < \tau_{dov}$ | $\tau_K < \tau_{dov}$ | |
| F | 12566,37 | 4188,79 | N |
| σ | 131,02 | 4,28 | MPa |
| | $\sigma < R_e$ | $\sigma < R_e$ | |
| p_z | 26,36 | 4,12 | MPa |
| | $p_z < p_{dov}$ | $p_z < p_{dov}$ | |

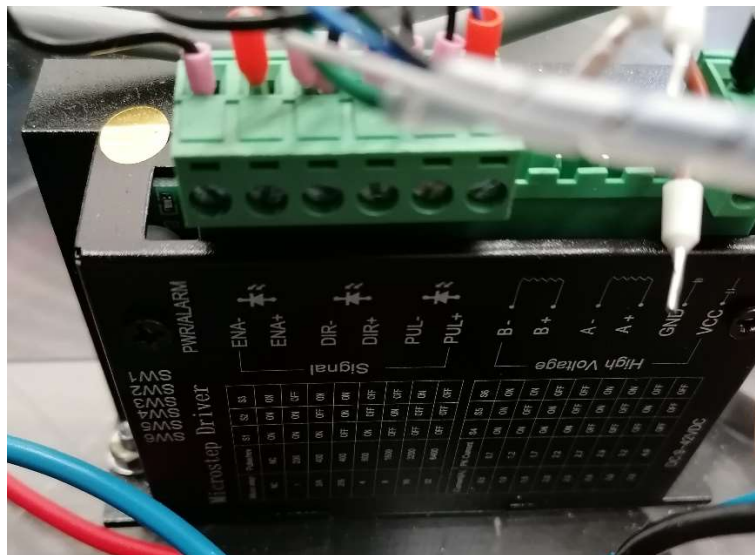
Všechny podmínky jsou splněny. Kritická místa vydrží zatížení.

5.4 Řídící elektronika

Elektronika, která bude zajišťovat funkci tohoto šnekového extruderu, již existuje, a je používána pro ovládání jiného extruderu, který je určen pro zpracovávání filamentu. Všechny součástky jsou zasazeny do průhledného boxu (Obr. 5-18). Krabice obsahuje zdroj S-350-24, který napájí všechnu elektroniku. Dále je tam driver, který posílá impulsy do motoru a je opatřen chladičem, který zabraňuje přehřátí této součásti (Obr. 5-19). Celý systém je řízen výpočetním čipem, kterým disponuje Arduino Mega (Obr. 5-20). Arduino je k základové desce připevněno ze spodní strany, tudíž nelze na obrázku (Obr. 5-18) vidět. Základová deska (Obr. 5-21) zabírající téměř polovinu boxu je uživatelsky navržena speciálně pro tento případ tisku a není tak nikde ke koupi na trhu. Je vybavena několika typy konektorů.



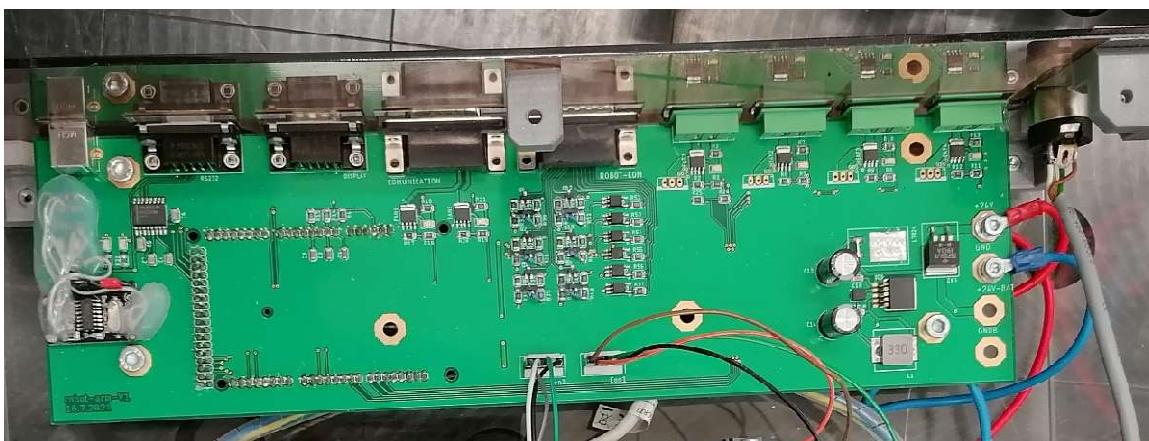
Obr. 5-18 Krabice s elektronikou



Obr. 5-19 Driver s chladičem



Obr. 5-20 Arduino Mega



Obr. 5-21 Základová deska

6 DISKUZE

Momentální konstrukce extruderu je navržena na tisk z běžně dostupných materiálů pro 3D tisk. Pro použití granulátu s abrazivními plnivy by proto bylo lepší zvolit vhodnějších materiálů komor i trysek. Komora z nerezové oceli je částečně odolná proti abrazivnímu opotřebení, nicméně při velmi častém tisku z abrazivních materiálů by se rychle opotřebovala. Vhodnou alternativou by tak byla komora z kalené oceli, stejně tak i materiál trysky.

Dle teoretického výpočtu průtoku je kompresní šroub nejlepší volbou. Vypočtené hodnoty jsou však jen čistě teoretické, a proto by bylo ideální je ověřit v praxi při provozu extruderu. Získáním vstupních dat lze posléze navrhnout šrouby s vlastní geometrií s optimálnějšími parametry, které by se následně dále testovaly. Výsledný návrh by případně mohl být uveden na trh samostatně, nebo ideálně s celým extruderem.

Upevnění hotendu řešené závitovým spojením chladiče a komorou (hliník, plast) by mohlo být upraveno tak, aby zatížení nebylo přenášeno plastovým, méně pevným materiálem. Jako možnost řešení se jeví kovový mezikus, který by byl opatřen závitěm pro montáž hotendu, přičemž by se dal zvláště připevnit k tělu násypky, například pomocí distančních sloupků. Toto řešení by extruderu dovolovalo snášet větší namáhání.

Ačkoliv je výkon topných těles dostatečně dimenzován, pro zlepšení a zvýšení průtoku by se mohl topný blok navrhnout tak, aby vytvářel tepelný spád. Topný blok by pokrýval jak homogenizační zónu, tak i kompresní zónu. Teplo od topného bloku by už při kompresi nahřívalo v komoře materiál, a ten by se v homogenizační zóně rychleji taval vlivem nižší potřebné energie na zahřátí.

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem šnekového extruderu využitelného při 3D tisku plastových pelet, který bude součástí robotického ramene jako koncový efektor. Cílem bylo navrhnout šnekový extruder menšího rozměru oproti existujícímu velkému extruderu používanému v laboratoři robotické aditivní výroby FSI VUT. Rovněž bylo cílem navrhnout extruder tak, aby byl jednoduchý na údržbu a zároveň by dokázal konkurovat dosavadním typům tiskáren a jiným šnekovým extruderům podobných velikostí.

Rešeršní část je výhradně věnována popisu šnekového extruderu a jeho komponent. Významná část teorie v rešeršní části se však zabývá šnekem a extruzí, jejichž pochopení a znalost jsou z konstrukčního hlediska důležité pro tuto bakalářskou práci.

Koncepční část se věnuje možným řešením jednotlivých komponent extruderu. Tato kapitola obsahuje popis navržených variant, jejich porovnání, výhody a nevýhody použití a posouzení celkové vhodnosti součástí pro reálné použití v praxi. Volba šroubu a návrh ohřevu jsou doplněny o teoretické výpočty, které slouží k lepšímu posouzení výběru.

V poslední kapitole konstrukční řešení je představen výsledný návrh šnekového extruderu. Navržený extruder s teoretickou rychlostí tisku až 100 mm/s konkuruje extruderům běžných 3D tiskáren. Těchto hodnot je extruder schopen dosahovat díky kompresnímu šroubu v kombinaci s ohřevem o výkonu 300 W. Pohon extruderu zaručuje krokový motor NEMA 17 s planetovým převodem. Systém využívající závitové spojení součástí umožňuje jednoduchou údržbu zařízení.

Ve výsledku byly všechny stanovené cíle dosaženy. Navržený extruder má maximální rozměr 235,5 milimetrů a hmotnost 1,4 kilogramu. S výkonem ohřevu dokáže teoreticky tisknout až 100 mm/s. Tímto je konkurence schopný vůči extruderům využívající filament. Lze jej montovat na různá zařízení. Průtok je navržen na trysku s otvorem 2 mm, nicméně tryska je vyměnitelná a dá se použít tryska s výstupním otvorem až 4 mm. Cena navrženého extruderu se bez zahrnutí nákladů na výrobu dílů se pohybuje okolo 4000 Kč.

Závěrem lze konstatovat, že tato práce přispívá k rozvoji aditivní výroby z levných dostupných plastových materiálů, jako jsou pelety, granulát nebo recyklovaná drť. Tento návrh má navíc díky svým parametrům potenciál vyplnit nedostatek šnekových extruderů na trhu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MATTERHACKERS. Anatomy of a 3D Printer [online]. [Citováno 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer>.
2. 3DJAKE. Direct Drive Extruder vs. Bowden Extruder [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.3djake.com/info/guide/direct-drive-extruder-vs-bowden-extruder>.
3. ALL3DP. [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://all3dp.com/>.
4. Filament2Print. Bowden vs. Direct Extrusion [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: https://filament2print.com/gb/blog/94_bowden-direct-extrusion.html.
5. GLEADALL, Andy and VISSCHER, Dafydd and YANG, Jing and THOMAS-VAZQUEZ, Dan and SEGAL, Joel. (2018). Review of additive manufactured tissue engineering scaffolds: relationship between geometry and performance. Burns and Trauma. 6. 10.1186/s41038-018-0121-4.
6. MARTIN, Vincent, Jean-François WITZ, Frédéric GILLON, et al. *Low cost 3D printing of metals using filled polymer pellets* [online]. [Citováno dne 25. května 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067222000372>
7. EngineersGarage. What is the Best Stepper Motor Driver for Your 3D Printer? [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://3dprinterly.com/what-is-the-best-stepper-motor-driver-for-your-3d-printer/>.
8. 3DPrinterly. What is the Best Stepper Motor Driver for Your 3D Printer? [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://3dprinterly.com/what-is-the-best-stepper-motor-driver-for-your-3d-printer/>.
9. Encoder.com. What is an Encoder? [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.encoder.com/article-what-is-an-encoder>.
10. JSgears. Company Profile [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.jsgears.in/company-profile.html>.
11. VEVERKA, I. Deskripce planetových převodovek pro pohony robotů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, 40s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16901.
12. OMC StepperOnline. NEMA 17 Stepper Motor Bipolar L-48mm w/ Gear Ratio 5:1 Planetary Gearbox (17HS19-1684S-PG5) [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-stepper-motor-bipolar-l-48mm-w-gear-ratio-5-1-planetary-gearbox-17hs19-1684s-pg5>.

13. CNC Shop. Pružné spojky [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: http://www.cncshop.cz/pruzne-spojky_c.
14. KOČAŘ, Jiří. Konstrukce extrudéru pro aditivní výrobu vysoce plněných termoplastů. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117707>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Škaroupka.
15. 1PlastCompany. Gravimetrické versus volumetrické dávkování [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://1plastcompany.cz/gravimetricke-versus-volumetricke-davkovani>.
16. Plastics Technology Online. Gravimetric Color Dosing for Injection Molders [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/knowledgecenter/blending/dosing-basics/gravimetric-color-dosing-for-injection-molders>.
17. HAROLD F. GILES, JR., JOHN R. WAGNER, Jr. and Eldridge M. Mount III. Extrusion. Norwich, NY: William Andrew Pub., 2005. ISBN 978-0-8155-1473-2.
18. PUBLI. Další stroje pro zpracování plastů. Publi.cz. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/14.html>
19. Plastics Technology Online. Extrusion Barrier Screws and Mixers [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/articles/extrusion-barrier-screws-and-mixers>.
20. Macro Engineering and Technology. Understanding Screw Design for Film Extrusion Process [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.macroeng.com/understanding-screw-design-for-film-extrusion-process.php>.
21. CRAWFORD, R., J. Plastic Engineering. 3. vyd. B.m.: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 1998. ISBN 0 7506 3764 1.
22. REILOY USA. [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <http://reiloyusa.com>.
23. Plastics Technology. Why Compression Ratio Is Important [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/articles/why-compression-ratio-is-important>.
24. YouTube. Opent fu [online video]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=sg-A6XEF2vo&t=1503s>.
25. LESUN SCREW. Heating and Cooling of the Extruder Screw Barrel [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.lesunscrew.com/heating-and-cooling-of-the-extruder-screw-barrel.html>.

26. ACIM JOUANIN. Trysková topná tělesa [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://www.acim-jouanin.fr/cs/nas-sortiment/tryskova-topna-telesa/>.
27. SUBSYSTEM.CZ. Topná tělesa. 2004. Dostupné z: <http://www.subsystem.cz/>
28. SHARP LAYERS. E3D V6 - Kvalitní mosazný heat block [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/p/e3d-v6-kvalitni-mosazny-heat-block>.
29. Filament2Print. E3D Nozzle V6 Volcano Brass [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://filament2print.com/gb/nozzles/805-e3d-nozzle-v6-volcano-brass.html>.
30. 3DPrinterly. 3D Printer Nozzle: Brass vs. Stainless Steel vs. Hardened Steel [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://3dprinterly.com/3d-printer-nozzle-brass-vs-stainless-steel-vs-hardened-steel/>.
31. 3DJake. 3D Printer Nozzle Guide [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://www.3djake.com/info/guide/3d-printer-nozzle-guide>.
32. Thermtest Inc. Thermal Conductivity of Steel [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: <https://thermtest.com/thermal-conductivity-of-steel>.
33. Engineering Toolbox. Thermal Conductivity of Metals [online]. [Citováno dne 21. května 2023]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html.
34. Amazon.in. 3D Innovations CHPSS507-2 Extruder Compatible [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://www.amazon.in/3D-Innovations-CHPSS507-2-Extruder-Compatible/dp/B01M012MXV>.
35. MASSIVE DIMENSION. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://massivedimension.com/>.
36. CEAD Group. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/>.
37. DYZE DESIGN. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://dyzedesign.com/>.
38. REV3RD. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://rev3rd.com/>.
39. MAHOR. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://mahor.xyz/>.
40. WHYMAN, Sean, KHALID, Mahmood ARIF a Johan POTGIETER. Design and development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. 96. 10.1007/s00170-018-1843-y.

41. COSINE Additive. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://cosineadditive.com/>.
42. MK-eshop.cz. Přehled materiálů pro 3D tisk: ABS [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk#ABS>.
43. DDDROP. ABS Filament [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://dddrop.com/products/filaments-and-consumables/abs-filament/>.
44. NA3D. Overview of Available Materials [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/our-services/blog/overview-of-available-materials>.
45. HRÁČEK, Michal. Směšovač filamentu s proměnným podílem vstupních materiálů pro FDM 3D tiskárny. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127041>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Robert Bayer.
46. Prusa3D. PLA [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062.
47. KUKA KR 8 R1620. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/0000255785_cs.pdf?rev=f67f5e7f804e4289b9798a63bd19bc52&hash=5FC7231E34179BADD74ED11DC873316C.
48. Iset Ceramic Mud Powder Extruder Micro Screw Throat Feed Rod + Feed barrel 3D Printer parts|3D Printer Parts & Accessories - AliExpress. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/33049242488.html>.
49. VOK Beroun. Vrták do dřeva hákovitý 10 x 200 mm Dewalt DT4604 [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://vok-beroun.cz/hadovite-vrtaky/132479-vrtak-do-dreva-hadovity-10-x-200-mm-dewalt-dt4604-5011402385744.html>.
50. NZIFST. Fluid Flow: Laminar Flow and Turbulent Flow [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://nzifst.org.nz/resources/unitoperations/flfltheory3.htm>.
51. SlidePlayer. [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2895400/>.
52. Design of a Screw Extruder for Additive Manufacturing. *eScholarship* [online]. [Citováno dne 22.05.2023]. Dostupné z: <https://escholarship.org/uc/item/5142579v>

53. OMC StepperOnline. NEMA 17 Stepper Motor Bipolar L=48mm w/ Gear Ratio 5:1 Planetary Gearbox (17HS19-1684S-PG5) [online]. [Citováno dne 22. května 2023]. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-17-stepper-motor-bipolar-l-48mm-w-gear-ratio-5-1-planetary-gearbox-17hs19-1684s-pg5>.
54. BARCZEWSKI, Mateusz and MYSIUKIEWICZ, Olga. (2018). Rheological and Processing Properties of Poly(lactic acid) Composites Filled with Ground Chestnut Shell. *Polymer Korea*. 42. 267-274. 10.7317/pk.2018.42.2.267.
55. ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE (ABS) Shear Viscosity Vs Shear Rate Graph. [online]. [Citováno dne 24.05.2023]. Dostupné z: <http://www.gammadot.com/Techzone/nexus/ABS/ABSvisc.htm>
56. ZITZENBACHER, Gernot, DIRNBERGER, Hannes, LÄNGAUER, Manuel, HOLZER, Clemens. (2017). Calculation of the Contact Angle of Polymer Melts on Tool Surfaces from Viscosity Parameters. *Polymers*. 10. 38. 10.3390/polym10010038.
57. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
58. Online Materials Information Resource - MatWeb. *Online Materials Information Resource - MatWeb* [online]. [Citováno dne 24.05.2023]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/index.aspx>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam zkratek

| Zkratka | Význam |
|---------|---|
| 3D | 3 dimensions |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| CNC | Computer numerical control |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| MEX | Material Extrusion |
| NEMA | National Electrical Manufacturers Association |
| PE | Polyethylen |
| PET | Polyethylentereftalát |
| PET/G | Polyethylentereftalát glykol |
| PLA | Polylactic acid |
| PP | Polypropylen |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |

9.2 Seznam symbolů

| Veličina | Jednotka | Popis |
|-----------------|-----------------|---|
| c_p | J/kgK | měrná tepelná kapacita |
| D | m, mm | průměr šroubu |
| D_{tryska} | m, mm | průměr trysky |
| d_2 | m, mm | střední průměr závitu |
| $D_{>/<}$ | mm | větší průměr (rozměr) / menší průměr (rozměr) |
| dP/dZ | - | tlakový gradient |
| $\frac{dv}{dy}$ | s ⁻¹ | rychlostní gradient |

| | | |
|-------------------|----------------------|--|
| e | m, mm | šířka šnekovice |
| F | N | síla (v ose vzniklá kroutícím momentem) |
| F_{axi} | N | síla v ose šroubu od tlaku v komoře |
| ΔH | J/kg | měrné skupenské teplo |
| H_1 | mm | nosná hloubka závitu |
| H_{feed} | mm | hloubka drážky v dopravní zóně |
| H_{mete} | mm | Hloubka drážky v homogenizační zóně |
| K | Pa·s ⁿ | koeficient konzistence |
| K_t | m ⁴ /s/kg | faktor odporu pro trysku |
| L | m | délka závitu |
| L_{nozzle} | m | délka trysky |
| L_z | m | délka závitu |
| L_3 | m | délka homogenizační zóny |
| \dot{m} | kg/s | hmotnostní průtok tryskou |
| M_{kM} | Nmm | kroutící moment od motoru |
| M_{mot} | Nm | minimální potřebný kroutící moment od motoru |
| n | - | mocninný index |
| N | min ⁻¹ | otáčky / otáčky motoru |
| p | m, mm | rozteč závitů |
| P | Pa | tlak v extruderu |
| p_z | MPa | tlak v závitech |
| p_{dov} | MPa | dovolený tlak v závitech |
| p_{kom} | MPa | tlak v komoře |
| P_B | Pa | celkový zpětný tlak |
| P_{max} | Pa | maximální tlak |
| P_{op} | Pa | tlak v pracovním bodě |
| P_{top} | W | výkon topného tělesa / potřebný výkon |
| ΔP_{comp} | Pa | tlak kompresní zóny |
| ΔP_{feed} | Pa | tlak plnicí zóny |

| | | |
|----------------------|-----------|--------------------------------|
| ΔP_{meter} | Pa | tlak homogenizační zóny |
| Q | m^3/s | celkový průtok |
| Q_D | m^3/s | unášivé proudění |
| Q_{LF} | m^3/s | proudění vlivem netěsností |
| Q_{MAX} | m^3/s | maximální průtok |
| Q_{OP} | m^3/s | průtok v pracovním bodě |
| Q_P | m^3/s | tlakové proudění |
| R | m | poloměr trysky |
| R_e | MPa | napětí na mezi kluzu |
| S_{kom} | mm^2 | průřez otvoru komory |
| S_{kr} | mm^2 | průřez kritického místa |
| S_{tryska} | m^2 | průřez otvoru trysky |
| T | mm | šířka drážky |
| T_2 | K, °C | pracovní teplota |
| ΔT | K, °C | rozdíl teplot |
| V_d | m/s | unášivá rychlost |
| v_{tisk} | m/s, mm/s | rychlost tisku |
| v_{tryska} | mm/s | rychlost trysky |
| W_{kO} | mm^4 | modul průřezu v krutu |
| z | - | počet závitů šroubu / v matici |
| σ | MPa | napětí v tahu |
| $\dot{\gamma}$ | s^{-1} | smyková rychlost |
| $\dot{\gamma}_{\xi}$ | s^{-1} | smyková rychlost šneku |
| $\dot{\gamma}_t$ | s^{-1} | smyková rychlost trysky |
| η | Pa·s | dynamická viskozita |
| η_{ξ} | Pa·s | dynamická viskozita v šneku |
| η_t | Pa·s | dynamická viskozita v trysce |
| ρ | kg/m^3 | hustota polymeru |
| τ | Pa | tečné napětí |

| | | |
|--------------|-----|-------------------------|
| τ_{dov} | MPa | dovolené napětí v krutu |
| τ_k | MPa | napětí v krutu |
| θ | ° | úhel šroubovice |

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 2-1 Hobbed gear (ozubené kolo) [1]..... | 14 |
| Obr. 2-2 Idler gear (přítlačné kolo) [1]..... | 15 |
| Obr. 2-3 A) dávkovací mechanismus s ozubeným kolem vlevo a přítlačným kolem vpravo; B) filament; C) chladič extruderu s topným blokem ve spodní části; D) tryska [2]..... | 15 |
| Obr. 2-4 A) dávkovací mechanismus; B) PTFE trubice pro vedení filamentu; C) Hotend – chladič, topný blok, tryska [2] | 16 |
| Obr. 2-5 Vlevo – konstrukční provedení direct drive extruderu; Vpravo - konstrukční provedení bowden extruderu, kde je hotend od dávkovacího mechanismu oddělen PTFE trubicí [4] | 16 |
| Obr. 2-6 Řez modelem šnekového extruderu [6] | 17 |
| Obr. 2-7 Šroubové převodovky extruderu Duty od firmy JS Gears [10]..... | 18 |
| Obr. 2-8 Krokový motor NEMA 17 se zabudovanou převodovkou s převodovým poměrem 5.18:1 [12]..... | 19 |
| Obr. 2-9 Typy pružných spojek od výrobce COUP-LINK; vlevo – pružná spojka 6Nm svěrná LK20-C25; vpravo – pružná spojka spirálová LK2 [13] | 19 |
| Obr. 2-10 Gravimetrický dávkovač jako přimíchávač barviva [16] | 20 |
| Obr. 2-11 Extruder se zaplavovacím zásobníkem [17]..... | 20 |
| Obr. 2-12 Plnění hladověním [17]..... | 21 |
| Obr. 2-13 Extruder s plnicím šroubem [17] | 21 |
| Obr. 2-14 Extruder s tavicím plněním [17]..... | 22 |
| Obr. 2-15 Rozdělení extruderu do sekcí a popis jednotlivých dějů v jednotlivých fázích [17] | 22 |
| Obr. 2-16 Teoretický popis mechanismu tavení [18]..... | 23 |
| Obr. 2-17 Mechanismus tavení materiálu uvnitř komory [17]..... | 23 |
| Obr. 2-18 Distributivní (horní) a disperzní (dolní) míchání [17] | 24 |
| Obr. 2-19 Druhy míchačů [19]..... | 24 |
| Obr. 2-20 Šroub s rozdělením na 3 zóny: dopravní, kompresní (přechodovou), mísící či homogenizační [17]..... | 25 |
| Obr. 2-21 Závislost průtoku na úhlu šroubovice [21]..... | 25 |

| | |
|---|----|
| Obr. 2-22 Geometrické parametry šneku, dv – vůle mezi válcem a šroubovicí, A – úhel stoupání závitu, D – průměr válce tavicí komory, wc - šířka závitu, wt - šířka šnekovnice, p - rozteč závitu šroubovice, dc - hloubka kanálu [18] | 26 |
| Obr. 2-23 Závislost hloubky profilu šneku na průměru šneku [18]..... | 27 |
| Obr. 2-24 Konfigurace šroubu, komory a topných pásů [17]..... | 27 |
| Obr. 2-25 (a) - tvarové úpravy komory [17]; (b) - úprava komory v praxi [24]..... | 28 |
| Obr. 2-26 Topné pásy (a) - slídové, (b) - keramické, (c) - s minerální izolací [26] | 29 |
| Obr. 2-27 Topné segmenty (odlitky) [27] | 29 |
| Obr. 2-28 Hliníkový topný blok s topnými patronami [27, 28]..... | 30 |
| Obr. 2-29 Mosazné trysky, odshora – Original E3D v6, Volcano, SuperVolcano [29] | 31 |
| Obr. 2-30 (a) - mosazné trysky; (b) - kalené trysky; (c) - nerezové trysky; (d) - rubínové trysky [3] | 32 |
| Obr. 2-31 Mosazné trysky s různými výstupními průměry pro filament o průměru 1,75mm [34] | 32 |
| Obr. 2-32 MDPH2 [35] | 33 |
| Obr. 2-33 E25 [36]..... | 33 |
| Obr. 2-34 Pulsar [37]..... | 33 |
| Obr. 2-35 RD-M10+ [38]..... | 33 |
| Obr. 2-36 V4 [39] | 34 |
| Obr. 2-37 (a), (b) - běžné šrouby se třemi sekcemi s typickým tlakovým profilem pro danou geometrii, (c) - hadovitý vrták do dřeva s lineárním tlakovým profilem [40] | 35 |
| Obr. 2-38 Tryska společnosti Massive Dimension [35] | 36 |
| Obr. 2-39 REV3RD RD-M10+ trysky [38] | 36 |
| Obr. 2-40 Tryska společnosti Cosine [41]..... | 36 |
| Obr. 2-41 Dyze Design trysky [37] | 36 |
| Obr. 2-42 Robot KUKA KR 8 R1620 vlevo, obrázek pracovní zóny vpravo [47]..... | 39 |
| Obr. 2-43 Závislost nosnosti ramene na těžišti efektoru [47]..... | 39 |
| Obr. 2-44 Geometrie příruby robota [47] | 40 |
| Obr. 4-1 Schéma paralelního uspořádání extruderu..... | 43 |
| Obr. 4-2 Schéma sériového uspořádání extruderu | 44 |
| Obr. 4-3 Kompresní šroub [48]..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Obr. 4-4 Hadovitý vrták [49] | 46 |
| Obr. 4-5 Druhy proudění v extruderu [17]..... | 47 |
| Obr. 4-6 Detaily šroubu extruderu [21] | 47 |
| Obr. 4-7 Charakteristiky extruderu a trysky..... | 49 |
| Obr. 4-8 Tvarové faktory závislé na geometrii šroubu [21] | 50 |
| Obr. 4-9 a) Vztah smykového napětí/smykové rychlosti v tekutinách [50] b) vztah dynamické viskozity/smykové rychlosti v kapalinách [51]..... | 51 |
| Obr. 4-10 Reologické vlastnosti polymerů proložené směrnicí trendu | 52 |
| Obr. 4-11 Teoretický průtok PLA | 54 |
| Obr. 4-12 Teoretický průtok ABS | 54 |
| Obr. 4-13 Teoretický průtok PP | 54 |
| Obr. 4-14 Ohřívání topným pásem | 57 |
| Obr. 4-15 Ohřívání topnými patronami..... | 58 |
| Obr. 4-16 Řešení jedna; a) řez extruderem, b) tříčtvrteční řez..... | 59 |
| Obr. 4-17 Řešení dva; a) řez extruderem, b) tříčtvrteční řez | 59 |
| Obr. 4-18 Řešení tři; a) řez extruderem, b) tříčtvrteční řez | 60 |
| Obr. 4-19 Příruba na stlačený vzduch | 61 |
| Obr. 4-20 Chlazení ventilátorem | 62 |
| Obr. 5-1 Navrhnutý extruder | 65 |
| Obr. 5-2 Rozměry motoru [53] | 66 |
| Obr. 5-3 Násypka..... | 67 |
| Obr. 5-4 Uložení komponent extruderu..... | 68 |
| Obr. 5-5 Malá příruba | 68 |
| Obr. 5-6 Upínací deska | 69 |
| Obr. 5-7 Uchycení extruderu k přírubě | 69 |
| Obr. 5-8 Hotend | 70 |
| Obr. 5-9 Chladič | 71 |
| Obr. 5-10 Vedení ventilátoru | 71 |
| Obr. 5-11 Komora..... | 72 |
| Obr. 5-12 Šroub extruderu [48]..... | 72 |

| | |
|---|----|
| Obr. 5-13 Topný blok (Heatblock)..... | 73 |
| Obr. 5-14 Tryska | 74 |
| Obr. 5-15 Tlaky a síly v komoře extruderu | 74 |
| Obr. 5-16 Momentová křivka motoru [53] | 75 |
| Obr. 5-17 Kritická místa součástí..... | 76 |
| Obr. 5-18 Krabice s elektronikou..... | 79 |
| Obr. 5-19 Driver s chladičem | 80 |
| Obr. 5-20 Arduino Mega | 80 |
| Obr. 5-21 Základová deska | 80 |

11 SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 2-1 Samostatné extrudery dostupné na trhu..... | 33 |
| Tab. 4-1 Parametry využívané při vstřikování [17]..... | 45 |
| Tab. 4-2 Parametry kompresního šroubu..... | 45 |
| Tab. 4-3 Parametry hadovitého vrtáku | 46 |
| Tab. 4-4 Parametry šroubů | 53 |
| Tab. 4-5 Teoretické výsledky pro PLA při 190 °C | 53 |
| Tab. 4-6 Fyzikální vlastnosti polymerů a teoretický potřebný výkon..... | 56 |
| Tab. 5-1 Rychlost tisku při daných otáčkách | 76 |

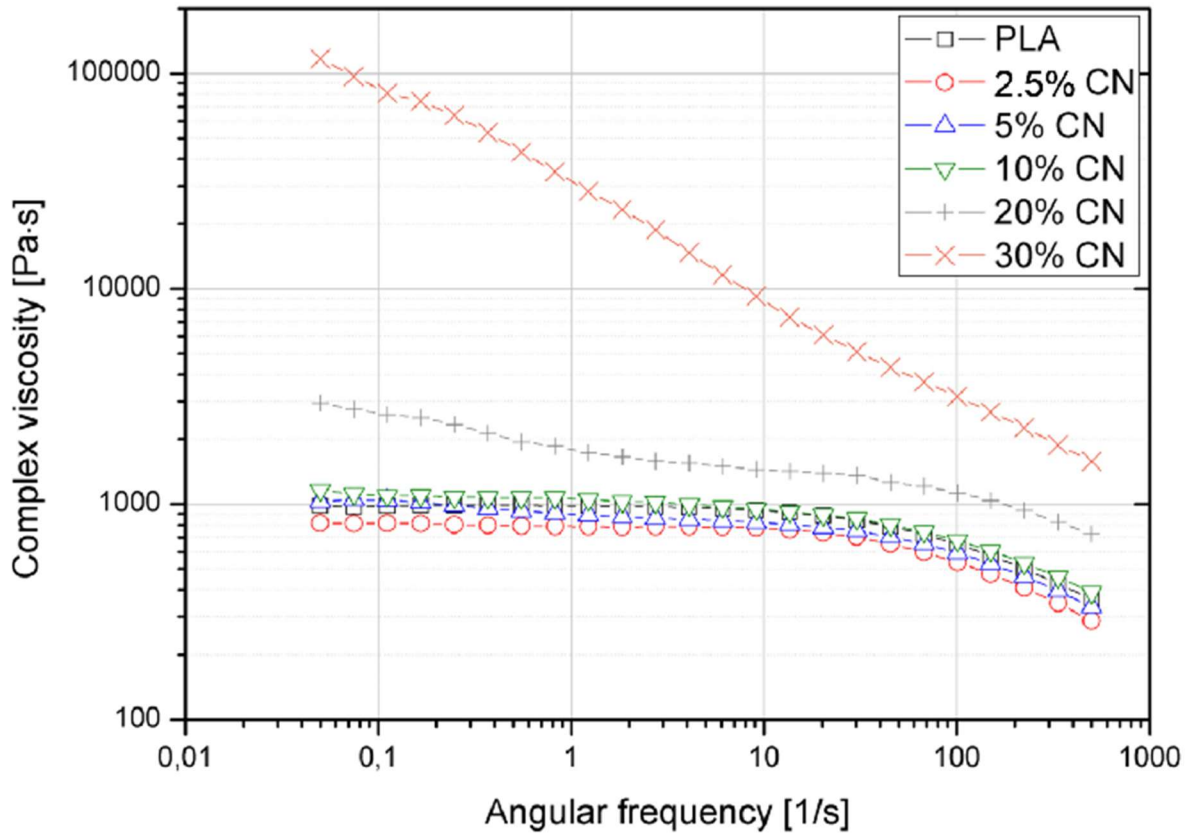
12 SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|--|----|
| Příloha 1 Závislost dynamické viskozity na smykovém tření PLA při 190 °C [54] | 98 |
| Příloha 2 Závislost dynamické viskozity na smykovém tření ABS [55]..... | 98 |
| Příloha 3 Závislost dynamické viskozity na smykovém tření PP [56]..... | 99 |

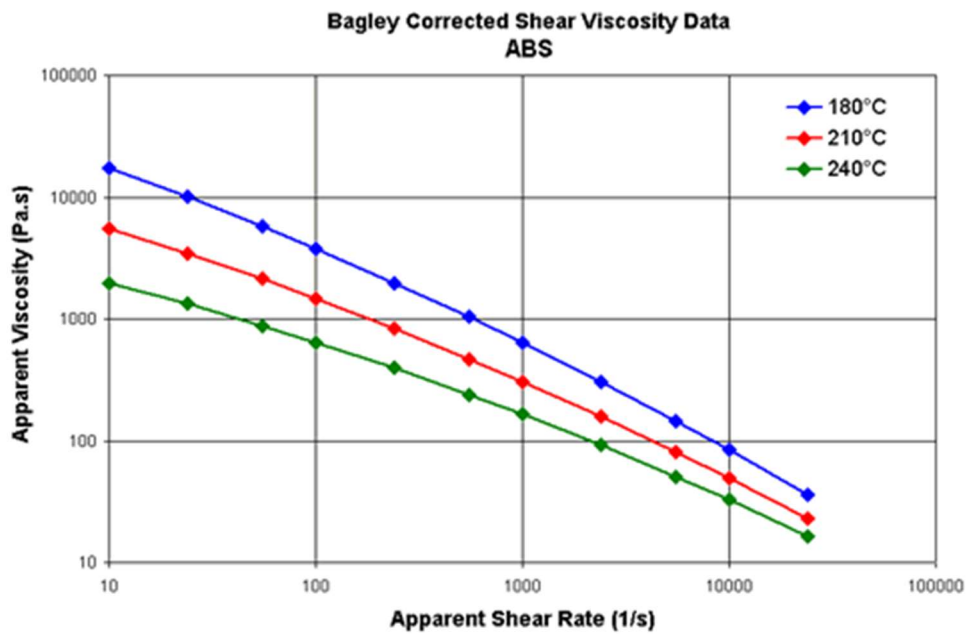
Externí přílohy:

| | |
|---|--|
| Příloha 4 Výrobní výkres, výkres sestavení | |
|---|--|

Příloha 1 Závislost dynamické viskozity na smykovém tření PLA při 190 °C [54]



Příloha 2 Závislost dynamické viskozity na smykovém tření ABS [55]



Příloha 3 Závislost dynamické viskozity na smykovém tření PP [56]

