

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Ústav procesní a zpracovatelské techniky**

**TECHNOLOGIE 3D TISKU**

**V PROCESNÍ TECHNICE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Autor:** Nikita Kozlov  
**Studijní obor:** Procesní technika a energetika  
**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Moravec, Ph.D.

**Praha 2017**



### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Podpis

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat za cenné rady k obsahu i k pojetí práce panu **Ing. Jiřímu Moravcovi, Ph.D.** a také zaměstnanci oddělení zavádění nových výrobků společnosti GE Aviation s.r.o. <sup>1</sup> **Pavlovi Horčíčkovi** za odbornou pomoc při realizaci této práce.

---

<sup>1</sup>) <https://www.geaviation.cz/en/home>

## **Anotace**

Tato bakalářská práce je zaměřena na technologii 3D tisku a její využití v procesní technice. Uvádí existující technologie aditivní výroby, popisuje jejich principy a uvádí používané materiály. Následně se práce zaměřuje na FDM metodu a na konstrukční řešení takové tiskárny. Ve výpočtové části této práci je uvedena metoda výpočtu výkonu pro natavení drátu.

### **Klíčová slova**

Aditivní výroba, 3D tiskárna, neneutonské chování, přenos tepla, plasty, tavení polymerů

## **Anotation**

This bachelor thesis focuses on 3D printing technology and its usage in process engineering. Usher existing technologies of additive manufacturing, describes the principles behind these technologies and ushers materials used with these technologies. Afterwards the thesis focuses on the FDM technology and on the design of a such 3D printing machine. In the computational part of this thesis a method of calculation of power output needed to melt the plastic is described.

### **Key words**

Additive manufacturing, 3D printer, nonnewtonian behavior, heat transfer, plastics, melting of polymers

## Obsah

1	Úvod a cíl této práce.....	9
2	Aditivní technologie.....	10
2.1	Rozvoj a současný stav technologie 3D tisku a Rapid Prototyping .....	10
2.2	Existující aditivní technologie .....	12
2.2.1	Metoda SLA (Stereolitografie – ang. stereolithography apparatus) .....	12
2.2.2	Metoda FDM.....	14
2.2.3	Metoda SLS .....	15
2.3	Materiály, používané v technologii 3D tisku .....	17
2.3.1	Obecné pojetí polymerních materiálů.....	17
2.4	Problematika tečení plastů – Reologie polymerů .....	23
2.4.1	Specifikum termoplastů.....	24
2.4.2	Newtonské kapaliny .....	24
2.4.3	Nenewtonské kapaliny .....	25
2.5	Zaměření na technologii FDM a její využití v procesní technice .....	28
2.5.1	Konstrukce FDM tiskárny.....	28
2.5.2	Pojezdy.....	29
2.5.3	Vyhřívání.....	30
2.5.4	Tryska.....	30
2.5.5	Motory .....	32
2.5.6	Elektronika a řídicí systém .....	32
2.5.7	Konstrukční a výpočtové zásady a výhody a nevýhody různých konstrukčních návrhů.....	34
2.5.8	Využití technologie FDM v oblasti procesní techniky.....	34

---

3	Výpočtová část.....	36
3.1	Předpoklady výpočtu a užité vztahy .....	36
3.2	Postup výpočtu .....	39
3.3	Vliv sálání a přepočet vlivu sálání .....	44
4	Závěr .....	47
5	Použitá literatura .....	48
6	Seznam symbolů a značek .....	51

## 1 Úvod a cíl této práce

Jedním z hlavních podnětů pro vznik a vývoj technologií 3D tisku, neboli *Additive Manufacturing* (dále AM – česky aditivní výroba) podle standardu ISO / ASTM52910 - 17, byla snaha průmyslů o konstantní zvyšování produktivity. Z tohoto důvodu byla v minulých 30 letech patrná implementace automatizace výroby, mezi kterou patří i AM.

Současný strojírenský průmysl je založen na konvenčních metodách výroby, jako jsou například klasické metody obrábění kovů, slévání, tváření za studena nebo za tepla, vstřikování plastů a jiné. Jednou velkou nevýhodou klasického průmyslu je to, že není schopen se chytit stále se zrychlujícího pokroku a vývoje, který si vyžaduje rychlou výrobu prototypů, jejich odzkoušení, a následné uvedení do sériové výroby či další vylepšení. Zde do hry vstupuje technologie 3D tisku, jak plastu, tak i kovu.

V současné době nejčastějšími zástupci 3D tisku jsou technologie, které využívají metod: SLA (Stereolitografie – ang. stereolithography apparatus), FDM (tavené modelování depozice – ang. Fused deposition modeling) a SLS (selektivní laserové slinování – ang. Selective laser sintering). Samozřejmě tyto metody se dále větví na různé podtypy, ale princip bude vždy založen na jedné z výše uvedených metod.

Cílem této práce je zpracování rešerše na téma 3D tisku a použití 3D tisku v oblasti procesní techniky. Následně bude ve výpočtové části práce proveden přibližný výpočet výkonu topného zařízení, které umožní roztavení drátu procházející tryskou tiskárny využívající metody FDM. Bude proveden modelový výpočet pro zvolený způsob ohřevu tiskové hlavy a zvolenou velikost drátu a rychlost tisku.



## 2 Aditivní technologie

### 2.1 Rozvoj a současný stav technologie 3D tisku a Rapid Prototyping

Existuje velké množství literatury, která popisuje dané technologie. Převážná část informací z hlediska využití *AM* byly získány z [1] a [2].

Historie a počátky technologie 3D tisku nalezneme na konci 20. století, kdy v polovině 80. letech téhož století se patentovala technologie stereolitografie. Tato technologie umožňovala postupné vytvrzování polymerů za působení záření různých vlnových délek, nejčastěji UV záření. Dodnes je tato technologie 3D tisku jedna z přesnějších.

Dodnes probíhal poměrně razantní vývoj více technologií (SLS, SLA a FDM) a dnes na trhu nalezneme i 3D pero.

Všechny tyto zmíněné technologie umožňují rychle vyrobit funkční produkt, který bude sloužit k testování (nejčastěji plastový – ale nemusí sloužit jen k testování). Současným trendem ve strojírenství je 3D tisk kovu a následné obráběcí operace. Již existují stroje, kde obě tyto technologie (3D tisk a obrábění) jsou implementovány do jednoho celku. Například to jsou stroje firmy DMG Mori, která je v této oblasti průkopníkem. Příklad funkce stroje je znázorněn na obrázcích 1 a 2. [3]



Obrázek 1 Stroj DMG Mori v provozu - Metoda SLS [3]



Obrázek 2 Stroj DMG Mori v provozu – obrábění [3]

Výše popsané technologie umožňují poměrně značně šetřit na materiálu, logistice a dalších nákladech, spojených s běžnou výrobou. Jejich uplatnění je také velmi široké – od medicíny (protézy apod.) po letecký průmysl (například výroba vstupní skříně z hliníku u turbovrtulového motoru).

Nedílnou součástí tohoto výrobního procesu jsou CAD/CAM programy, které se díky rozvoji 3D technologií vyvíjejí čím dál tím rychleji.

## 2.2 Existující aditivní technologie

Hlavním cílem této práce je zaměření na 3D tiskárny, které vyrábějí díly z plastů. Ale v dnešní době se také poměrně rychle vyvíjí 3D tiskárny na kovové díly. V následujících kapitolách teoretické části této práce se tedy zmíním hlavně o plastových aditivních technologiích, ale neopomenu i kovové.

### 2.2.1 Metoda SLA (Stereolitografie – ang. stereolithography apparatus)

Metoda je založena na ozařování UV laserem (nebo DLP – Digital Light Processing™) tekutého fotopolymeru, umístěného v nádobě a nazývá se stereolitografie. Jedná se o první formu aditivní technologie, která se stále používá dodnes. Celé zařízení se skládá z několika základních prvků (uspořádání těchto prvků – viz Obrázek 3 a Obrázek 4):

- 1) pohyblivá (základní) deska, na které se postupně vytvrzuje díl
- 2) laser (nebo DLP projektor)
- 3) Nádoba s tekutým fotopolymerem
- 4) Zrcadla (při vytvrzování DLP projektorem)

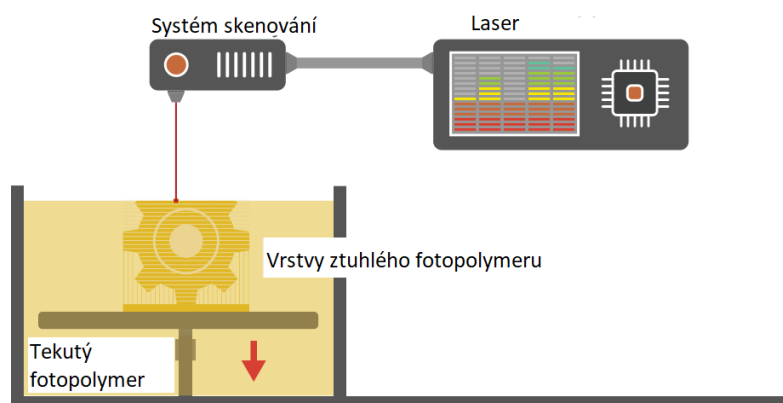
Využití laseru nebo DLP projektoru určuje to, zda se bude fotopolymer ozařovat zdola nebo shora. Tím se též dá rozdělit tyto tiskárny na dva typy.

První, kde se fotopolymer ozařuje shora, se používá laser jako vytvrzovací jednotka a výrobek se postupně pohybuje na pohyblivé desce dolů, vždy poté, co se vytvrdí potřebná vrstva (průřez). U této metody, laserem, se postupně vykresluje průřez paprskem. Zde je vidět jedna z nevýhod této metody - volná hladina. Je nutné zajistit, aby hladina byla ustálená a zároveň nevznikla suchá místa na povrchu vyráběné součásti. To se nejčastěji řeší pomocí lišty, která přejede po hladině kapaliny a tím zajistí ustálení a rovnoměrné nanesení. [1]

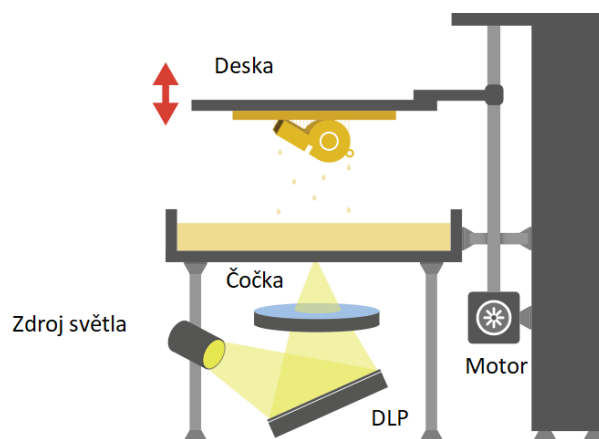
Druhý typ, kde se fotopolymer vytvrzuje zdola, používá DLP projektor. Hlavním rozdílem je to, že DLP projektor ozařuje celý průřez (celou vrstvu). Naopak, nevýhodou je to, že při ozařování zdola, skrze sklo, se může fotopolymer přilepovat (připékat). Řešením je speciální fólie, která se na sklo aplikuje. [2]

Mezi výhody této technologie patří dobrá přesnost (hodí se i na nějaké přesnější aplikace), dobré dokončení povrchu (drsnot, vzhled), velká škála používaných materiálů.

Mezi nevýhody této technologie patří nutnost podpor (vyžaduje další náklady, zvyšuje se strojní čas) a s tím také souvisí i nutnost jejich odstranění (další náklady a prodleva), a dále vytvrzování (již zmíněná negativa).



Obrázek 3 – Metoda SLA – vytvrzování laserem shora [1]



Obrázek 4 – Metoda SLA – DLP projektorem zdola [2]

### 2.2.2 Metoda FDM

Tato metoda je založena na postupném vrstvení roztaveného materiálu (plastu). Materiál se nejčastěji dodává ve formě struny namotané do cívky. Nataví se v komoře a poté se přes trysku vytlačí. Vytlačovaný materiál se nataví na předchozí vrstvu nebo na pracovní stůl a tím se vytvoří souvislý výrobek. Požadované geometrie a rozměrů se docílí buď pohybem trysky nebo stolu. Na obrázku 5 je ukázán princip.

Podložka (pracovní stůl) musí být vyhříván z důvodu kompenzace teplotní dilatace výrobku. Při tisku jsou často potřebné podpory. Podpory jsou nutné z toho důvodu, že během procesu tisku je požadována stabilita výrobku, jak z důvodu smršťování (chladnutí), tak i z důvodu gravitačního. Jsou potřebné tehdy, pokud je výrobek větších rozměrů do výšky od základny, nebo pokud se nebude výrobek prohřívát celý a teplotní podložka nebude schopna kompenzovat teplotní dilatace v celém objemu součásti.

Nejběžnějšími materiály jsou termoplasty PLA, ABS, HIPS, PC apod. Také lze použít i jiné materiály, které mají teplotu tavení do 300 °C, jako například cín. V potravinářském průmyslu by se jednalo o čokoládu, krém atd.

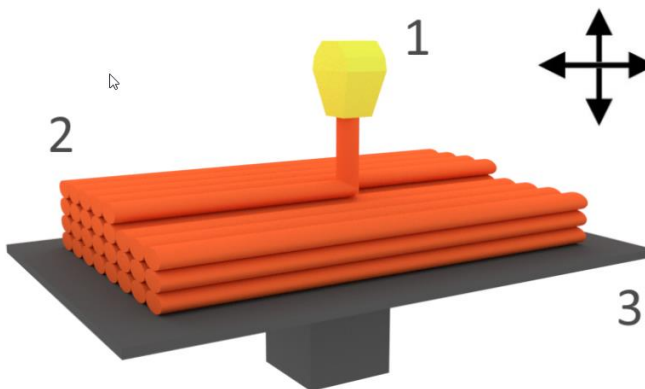
V dnešní době se 3D tiskárny využívají i k výrobě dortů nebo různých jedlých dáreků, kde lze dosáhnout nejrůznějších tvarů, popřípadě umožní cukráři vyrobít plastové formy pro vypékání složitých tvarů

Jedním z podstatných odvětví kde lze této technologii využít je biomedicína a obecně vše kolem lidského zdraví. V současné době využívají lékaři tištěných protéz, lékařských přípravků i pro chirurgické zákroky. V populárních článcích se psalo i o tom, že se vyvíjejí způsoby tisku orgánu a v jednom z posledních článků bylo zmíněné umělé srdce, které zatím sice žije pouze 10 minut, ale je to neuvěřitelný pokrok. [5]

Výhodou této technologie je poměrně dostupné rozmezí cen materiálu a samotných tiskáren a taky velké množství různých materiálů. Mezi další výhody patří výroba dílu s konečnými požadovanými rozměry, pevnosti a funkčností; minimální maření

materiálu (tato technologie je beztržisková a jediným odpadem jsou podpory); jednoduché odstranění podpor (buď se podpory odřezávají, nebo se vymývají ve speciální pračce, kam se přidává vodní roztok chemikálie, která podpory rozpustí).

Naopak mezi nevýhody spadá nižší přesnost, nižší rychlost ve srovnání s ostatními technologiemi a nepředpověditelné smršťování (současně ale již existují patenty na technologie, které pomáhají tomuto problému předcházet – více v kapitole 2.5.1).



Obrázek 5 – FDM Metoda [6]

1 – Tisková hlava

2 – Vrstvy polymeru

3 – Deska

### 2.2.3 Metoda SLS

Tato technologie je obdobná technologii SLA, ale s tím rozdílem, že se používá odlišný materiál, a to kovový prášek. Tím pádem jsou výrobky kovové a rozsah používaných kovů je od běžných práškových ocelí po titan a hliník.

Jinak princip se podobá technologii SLA s ozařováním shora (Obrázek 6). [4]

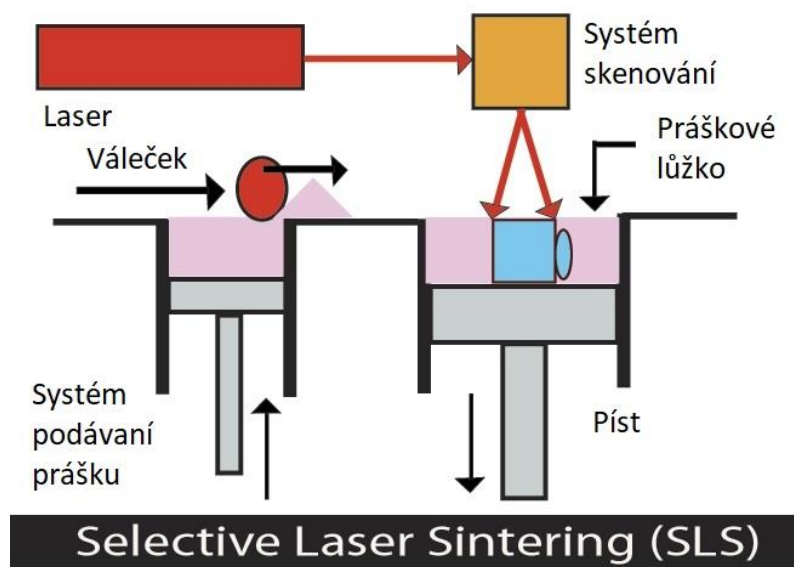
Laser spéká požadovaný tvar a geometrii a okolní, nedotčený materiál funguje jako podpora. Pro vytvoření další vrstvy se posuvná deska posune o tloušťku dolů a vrstva kovového prášku se nanese pomocí speciálního válečkového mechanismu.

Takovýmto cyklem se postupně vytvoří součást. Po dokončení se ještě často obrábí (nejčastěji třískové obrábění).

Tuto technologii lze v dnešní době uplatnit jak v prototypové tak i v sériové výrobě. Například firma GE Aviation Czech s.r.o. má v plánu použít tuto technologii, protože až 35% nového turbovrtulového motoru ATP má být vyrobeno právě tímto způsobem. Jedná se například o vstupní skříň (hliník), která se běžně odlévá. Tato technologie umožňuje docílit velmi složitých geometrických tvarů a čím tvary budou složitější, tím poroste i ekonomická efektivita.

Mezi výhody této technologie patří dobrá stabilita součásti (proces se odehrává v přísně sledovaném prostředí); nejsou potřebné podpěry (šetření času); součást si nevyžaduje vytvrzování (případně se obrobí na konečný tvar).

Mezi nevýhody této technologie spadá velká spotřeba elektrické energie (laserové spékání je energeticky velmi náročný proces); špatná kvalita povrchu (horší drsnost, případně i nedodržení určitých geometrických tolerancí povrchu).



Obrázek 6 – SLS Metoda [7]

## 2.3 Materiály, používané v technologii 3D tisku

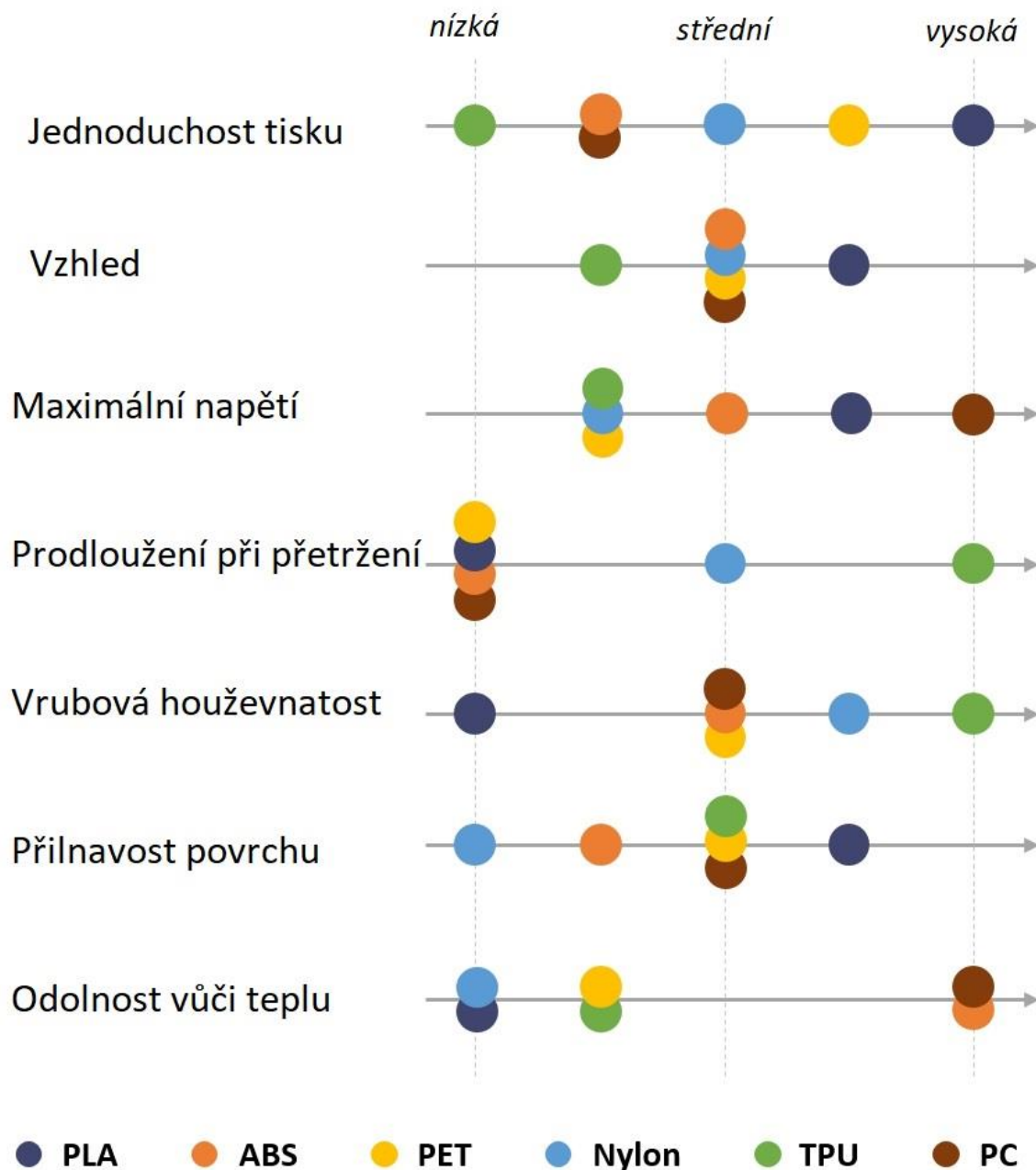
V této kapitole se budu zabývat hlavně materiály, které jsou používány v technologii FDM.

### 2.3.1 Obecné pojetí polymerních materiálů

Výběr materiálu má vliv na strukturu a kvalitu výrobku, ale zároveň může mít značný vliv na samotný proces. Na Obrázku 7 je znázorněno srovnání šesti nejvíce používaných materiálů. Mezi srovnávané vlastnosti patří: jednoduchost tisku, vnější vzhled, mez pevnosti, poměrné prodloužení, rázová houževnatost, přilnavost vrstev a tepelná odolnost. Pokud je řeč o plastech, tak jsou vždy ze skupiny termoplastů. Působením tepla měknou a naopak, při chlazení tuhnou. Jejich změny za různých teplot jsou vratné, na rozdíl od reaktoplastů, které se mění nevratně.

Samozřejmě lze u každého druhu materiálu vyvinout i jeho poddruh, přidáním nějaké přísady (obdoba legujících prvků u ocelí) a tím málo či výrazně ovlivnit jeho vlastnosti, jak chemické tak i mechanické.



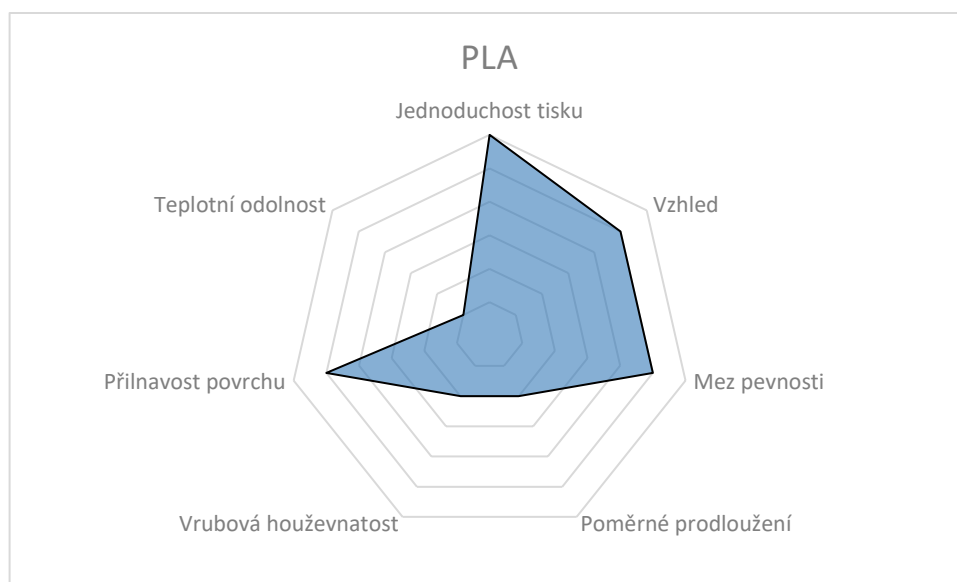


Obrázek 7 Srovnání materiálů [8]

Ty nejpoužívanější materiály, PLA, ABS a PC zároveň vykazují ten nejlepší průřez všemi vlastnostmi. Dále popíšu tyto tři materiály podrobněji. Při sepisování vlastností jednotlivých materiálů jsem čerpal z katalogů firem (například Stratasys), ve kterých jsou tyto vlastnosti uvedeny. Od každého materiálu je více druhů a tak vždy uvádím rozsah vlastností (například pevnost v tahu apod.). [9]

### 2.3.1.1 Materiál PLA

Jedná se o termoplastický bio-polymer, který se vyrábí z obnovitelných zdrojů, například z různých škrobů a tím pádem je i biologicky odbouratelný. Stejně jako většina materiálů pro 3D tisk se dodává jako drát, namotaný do cívky. Má široké uplatnění, a to od výroby textilních vláken po automobilový průmysl, výroby elektronických součástí apod. Tyto odvětví průmyslu si vyžadují vysokou životnost a zároveň i co nejmenší dopad na životní prostředí, což PLA v důsledku posledního vývoje v této oblasti umožňuje (Obrázek 8, 9).



Obrázek 8 – Diagram materiálu PLA [8]



Obrázek 9 – Příklad výrobku a cívka [10]

Tento materiál je tvárný (ohebný) přibližně od 60 °C a proces tisku probíhá za teplot od 180 do 230 °C. Běžné parametry jsou [11] ,[12]:

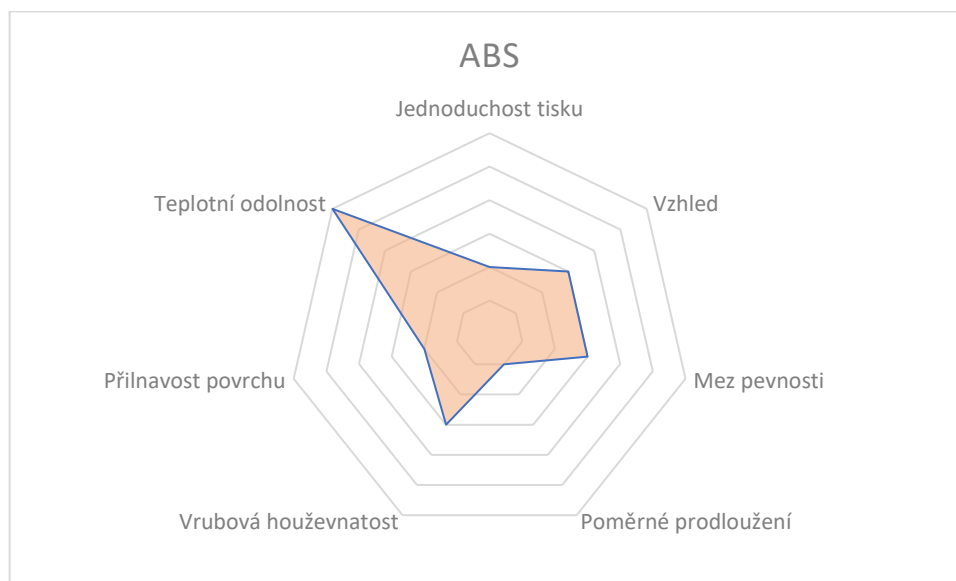
Hustota	$\rho = 1250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Rychlost tisku	$c = (20 \div 30) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Běžné dodávané průměry drátu jsou	1,75 mm a 2,85 mm.
Pevnost v tahu se pohybuje přibližně kolem	30 MPa.
Youngůva modul pružnosti	v dostupné literatuře nebyla hodnota nalezena

### 2.3.1.2 Materiál ABS

Jedná se též o termoplastický polymer, který se vyrábí z ropy. Opět se většinou dodává jako drát namotaný do cívky. Oproti PLA není ABS biologicky rozložitelný, ale na druhou stranu je pevnější, pružnější, má vyšší odolnost vůči vyšším teplotám. Nutnou podmínkou tisku je to, že tiskárna je vybavena vyhřívanou podložkou, která je schopna udržovat teplotu na přibližně 80 °C (Obrázek 10, 11).

Tento materiál je tvárný (ohebný) přibližně od 100 °C a proces tisku probíhá za teplot od 220 do 260 °C. Běžné parametry jsou [13]:

Hustota	$\rho = 1050 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Rychlost tisku	$c = (16 \div 20) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Běžné dodávané průměry drátu jsou	1,75 mm a 2,85 mm.
Pevnost v tahu se pohybuje přibližně kolem	45 MPa.
Youngův modul pružnosti přibližně	2200 MPa



Obrázek 10 – Diagram materiálu ABS [8]



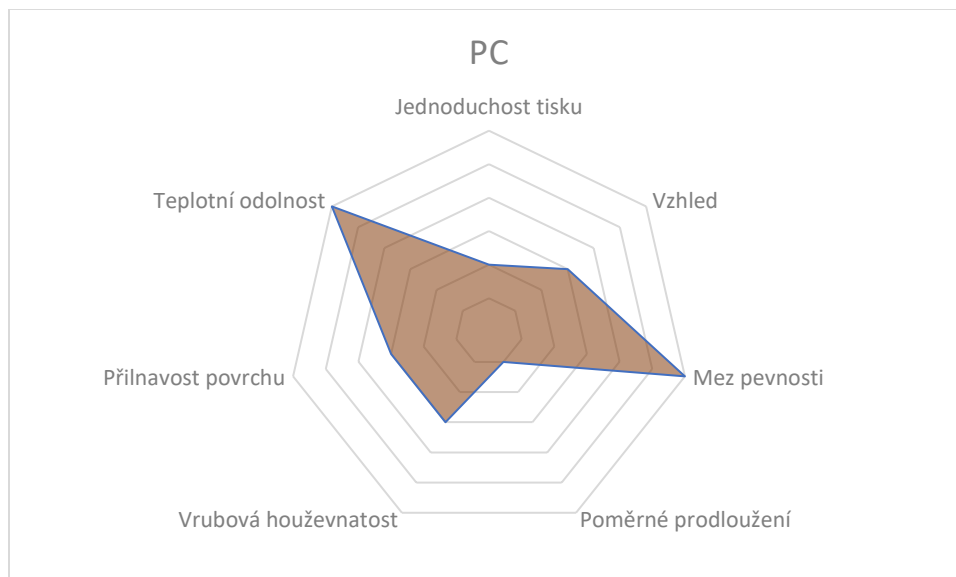
Obrázek 11 – Příklad výrobku z ABS [14]

### 2.3.1.3 Materiál PC

Polykarbonát (PC) je také termoplastem, široce používaným v automobilovém, kosmickém průmyslu, v medicíně a jinde. Jedná se o nejtvrďší termoplast v současnosti a zároveň i nejtvrďší, který dokážou FDM tiskárny používat (Obrázky 12 a 13).

Tento materiál je tvárný (ohebný) přibližně od 150 °C a proces tisku probíhá za teplot od 270 do 285 °C. Běžné parametry jsou [15]:

Hustota	$\rho = 1220 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Rychlost tisku (při 270 °C)	$c = (30 \div 60) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Běžné dodávané rozměry jsou	1,75 mm a 2,85 mm.
Pevnost v tahu dosahuje	110 MPa
Youngův modul přibližně	2300 MPa



Obrázek 12 – Diagram materiálu PC [8]



Obrázek 13 – Příklad výrobku z PC [15]

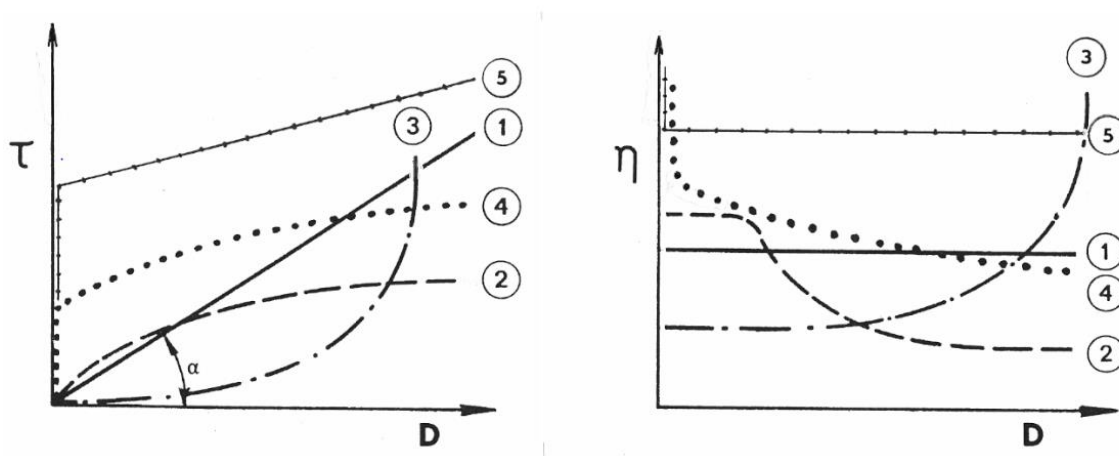
#### 2.4 Problematika tečení plastů – Reologie polymerů

V oblasti 3D tiskáren, hlavně při použití technologie FDM, je velmi důležité znát tokové vlastnosti roztavených a poté tištěných polymerů. Tím se zabývá vědní obor reologie.

### 2.4.1 Specifikum termoplastů

Jednou z hlavních charakteristik termoplastů v tekutém stavu je to, že vykazují pseudoplastické chování. Toto chování v kapalném stavu se popisuje veličinou, která se nazývá zdánlivá viskozita. Je parametrem neneutonských kapalin. Označuje se  $\eta$  a má jednotku  $[Pa \cdot s]$ . Tato viskozita, na rozdíl od newtonských kapalin, má tu vlastnost, že je závislá na gradientu rychlosti. Kapaliny jsou podle jejich chování rozděleny do 5 hlavních skupin dle Obrázku 12, které jsou:

- 1) Newtonská kapalina
- 2) Pseudoplastická kapalina
- 3) Dilatantní kapalina
- 4) Plastická kapalina (pseudoplastická s mezí toku)
- 5) Viskoplastická (Binghamská kapalina)



Obrázek 13 – Tokové a viskozí charakteristiky neneutonských kapalin [16]

V následujících kapitolách 2.4.2 až 2.4.3.3, je stručně popsáno 5 hlavních skupin včetně uvedení zástupců jednotlivých kapalin a jejich fyzikálních vlastností [2].

### 2.4.2 Newtonské kapaliny

Tyto kapaliny se řídí Newtonovým zákonem (1) – viz křivka číslo 1 na Obrázku 12. Jejich viskozita roste lineárně s rostoucím tenzorem rychlosti deformace, označuje

se  $\mu$  a má také jednotku  $[Pa \cdot s]$ , stejně jako zdánlivá viskozita. Newtonův zákon pro nestlačitelné tekutiny (1)

$$\vec{\tau} = 2\mu\vec{\Delta} \quad (1)$$

kde  $\vec{\tau}$  je tenzor dynamických napětí,  $\mu$  je dynamická viskozita a  $\vec{\Delta}$  tenzor rychlosti deformace.

Newtonův zákon pro stlačitelné tekutiny (2) se uvádí ve tvaru

$$\vec{\tau} = -\frac{2}{3}\mu\delta tr\vec{\Delta} + 2\mu\vec{\Delta} \quad (2)$$

Klasickým zástupcem Newtonské kapaliny je voda. Její hodnota dynamické viskozity při 20 °C činí  $10^{-3} Pa \cdot s$ . Závislost dynamické viskozity na teplotě lze popsat vztahem (3)

$$\mu = Ae^{\left(\frac{B}{T}\right)} \quad (3)$$

kde A, B jsou konstanty, které je nutné pro každou látku určit experimentálně [2].

### 2.4.3 Nenewtonské kapaliny

Pro všechny čistě viskózní nenewtonské látky platí závislost mezi napětím a rychlostí smykové deformace ve tvaru

$$\vec{\tau} = 2\eta\vec{\Delta} \quad (4)$$

kde  $\eta$  je zdánlivá viskozita, která závisí na rychlosti smykové deformace, přičemž průběh této závislosti odlišuje jednotlivé druhy nenewtonských látek, a  $\vec{\Delta}$  je tenzor rychlosti deformace [2].



### 2.4.3.1 Pseudoplastické (Strukturně viskózní kapalina)

Tyto kapaliny se chovají podle Ostwald de Waeleho modelu [17], kterému se též říká mocninový model, který se vyjadřuje vztahem (5). Tento vztah je nejjednodušším a nejčastěji používaným modelem pro popis chování čistě viskózních neneutonských kapalin. Jedná se o dvoukonstantový model,

$$\eta = K \left| \sqrt{2\vec{\Delta}:\vec{\Delta}} \right|^{n-1} \quad (5)$$

kde  $K$  je koeficient konsistence,  $\vec{\Delta}$  tenzor rychlosti deformace,  $n$  je index toku a  $\eta$  je výsledná zdánlivá viskozita. Koeficient konsistence  $K$  a index toku  $n$  jsou závislé na teplotě a je nutné je zjišťovat experimentálně. Pomocí tohoto modelu můžeme dále rozdělit kapaliny mocninové povahy na dva další typy. Prvním typem jsou kapaliny vykazující pseudoplastické chování, u kterých zdánlivá viskozita  $\eta$  klesá s rostoucím tenzorem rychlosti deformace  $\vec{\Delta}$ , tudíž se vyznačují nízkou hodnotou indexu toku, a to  $n < 1$ . Druhým typem jsou kapaliny dilatantní, které jsou opačné povahy – s rostoucím  $\vec{\Delta}$  tenzorem rychlosti deformace roste i zdánlivá viskozita  $\eta$ . Vyznačují se větší hodnotou indexu, a to  $n > 1$ . Kapaliny s indexem toku  $n=1$  jsou kapaliny newtonské, popsané v kapitole 2.4.2.

Daný model má ale jeden podstatný nedostatek – pomocí něj je možné popsat reologické chování pouze v omezeném rozsahu rychlosti deformace. Při velmi nízkých hodnotách tenzoru rychlosti deformace  $\vec{\Delta}$  se hodnota zdánlivé viskozity bude pro  $n < 1$  blížit nekonečnu. se bude hodnota zdánlivé viskozity blížit nekonečnu. Tato skutečnost odporuje realitě. Z tohoto důvodu se zavádí Hersche-Bulkleyho model, popsáný v kapitole 2.4.4.

Klasickými představiteli Ostwald de Waeleho modelu ze skupiny pseudoplastických látek jsou taveniny polymerů. Jedním z představitelů je polymer PA6 Silamid, který má při teplotě  $T = 230 \text{ }^\circ\text{C}$  index toku  $n = 0,91$  a koeficient konsistence  $K =$

275,11 Pa. s<sup>n</sup>. Příkladem dilatantní kapaliny je například látka PVC plastisol. Obecně se dilatantní povaha objevuje zředka [2].

#### 2.4.3.2 Plastická kapalina (pseudoplastičita s mezí toku)

Tato skupina kapalin je popsána Herschel-Bulkleyho modelem [17], který je de facto modifikací Ostwald de Waeleho modelu a eliminuje nedostatek v podobě nekonečné viskozity při nízkých smykových rychlostech, zmíněný v bodě 2.4.3, a je popsán vztahem (6). Jedná se o tříkonstatnový model

$$\eta = \frac{K \eta_0}{k + \eta_0 \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\Delta} : \dot{\Delta}}}^{1-n} \quad (6)$$

kde  $K$  je koeficient konsistence,  $\dot{\Delta}$  tenzor rychlosti deformace,  $n$  je index toku,  $\eta_0$  je konečná hodnota zdánlivé viskozity při nízkých rychlostech deformace a  $\eta$  je výsledná zdánlivá viskozita [2].

#### 2.4.3.3 Viskoplastické kapaliny (Binghamské)

Tato skupina kapalin je popsána Binghamským modelem. Jedná se o viskoplastické materiály, které se vyznačují tím, že při malém napětí se chovají jako pevné látky a teprve poté, co vzroste působící napětí na určitou hodnotu, která se nazývá mezí toku, se začnou chovat jako kapaliny. Jedná se o vztah (7)

$$\eta = \mu_p + \frac{\tau_0}{\sqrt{\frac{2}{3} \dot{\Delta} : \dot{\Delta}}} \text{ pro } \frac{1}{2} (\dot{\tau} : \dot{\tau}) > \tau_0^2 \quad (7)$$

kde  $\dot{\Delta}$  tenzor rychlosti deformace,  $\mu_p$  plastická viskozita,  $\tau_0$  je mez toku a  $\eta$  je výsledná zdánlivá viskozita. Při hodnotách napětí vyšších než  $\tau_0$  se předpokládá klesání zdánlivé viskozity  $\eta$  s rostoucí hodnotou  $\dot{\Delta}$  tenzoru rychlosti deformace až na hodnotu plastické viskozity  $\mu_p$  [2].

Běžnými představiteli této skupiny látek jsou koncentrované suspenze jemných částic, taveniny některých polymerů a nátěrové hmoty, ale i potraviny v tekutém stavu. Jedním z představitelů je čokoláda, jejíž mez toku se pohybuje v rozmezí od 70 do 140 Pa [18].

## 2.5 Zaměření na technologii FDM a její využití v procesní technice

### 2.5.1 Konstrukce FDM tiskárny

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2.2, základním principem této technologie je tavení drátu a následně dochází k jeho tuhnutí. Teď bych se zaměřil více na konstrukci takové tiskárny.

Konstrukce velmi závisí na požadovaném stupni přesnosti. Pokud se jedná o „domácí kutilství“, pak postačí rámová konstrukce z tyčí, závitových tyčí a dřevěných dílů, případně plastových dílů. V podstatě tak vypadala první tiskárna, vyvinuté firmou RepRap, s názvem „Darvin“. Projekt RepRap je ještě známý tím, že navržené tiskárny jsou schopny vyrobit díly pro další, stejnou tiskárnu [19]. Pokud se ale vyžaduje větší stupeň přesnosti, například průmyslové, mají ocelový rám a plastové či ocelové krytování.

Velmi podstatnou věcí u této metody je vyhřívání výrobku během procesu tištění. V současné době vlastní patent na vyhřívanou komoru společnost Stratasys. Tím se docílí toho, že se výrobek během tištění nebude smršťovat, a to v celém objemu! Obvykle se vyhřívá pouze podložka, aby se základ a podpory nekroutily [20]. Patentové řešení spočívá v tom, že se do komory vhání ohřátý vzduch na určité teplotní úrovni (závisí na materiálu) pomocí ventilátorů, umístěných v bočních stěnách stroje (řešení v případě stroje firmy Stratasys).

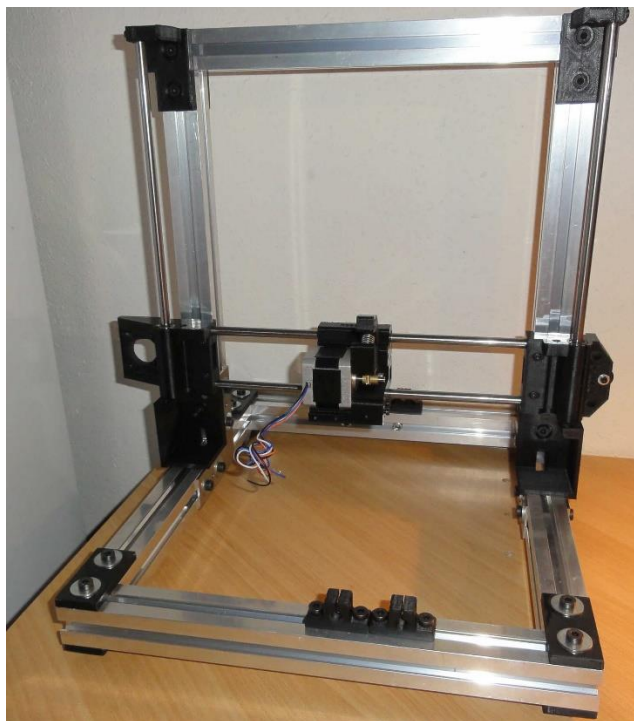
Co se týče rozměrů 3D tiskárny a využití v určité oblasti, tak tyto parametry jsou v podstatě bez limitů. Může se jednat jak o tisk velmi malých výrobků pro medicínu, tak i o tisk celých domů (Čína) [21].

Následující podkapitoly se již budou zabývat jednotlivými prvky, kterými jsou: pojezdy, motory vyhřívání a tryska. O rámu již bylo řečeno. Zvláštní část poté bude věnována elektronice a řídicím systémům, popřípadě CAD/CAM systémům.

### 2.5.2 Pojezdy

Tiskárna koná lineární pohyby v rovinách XY a podél svislé osy Z. U levnějších tiskáren se pohyb ve vodorovné ose koná na lineárních tyčích s lineárními ložisky. Na svislé ose se pak využívají závitové tyče nebo klasické metrické, případně trapézové matice. Příklad, jak mohou sestavené pojezdy vypadat, je znázorněn na obrázku 15 [22].

U dražších tiskáren se v rovině XY používají podepřené lineární tyče se zdvojenými lineárními ložisky nebo přesné lineární kolejnice s vozíčky. V ose Z se pak používají kuličkové šrouby. Poslední technologie zajišťují nejvyšší přesnost.



Obrázek 14 – Příklad pojezdů pro tiskárnu [22]

### 2.5.3 Vyhřívání

Vyhřívání je velmi podstatnou technologií při tisku. Jednak zabraňuje kroucení a smršťování podpor a hlavně samotného výrobku, ale také pomáhá docílit homogenity materiálu v celém jeho objemu. Vyhřívána podložka či komora také zlepšuje přilnavost jednotlivých vrstev. Taková podložka může být například hliníková, na které je tištěný plošný spoj, který využívá tepelného odporu (přímotop). Taková konstrukce je napájena 24V.

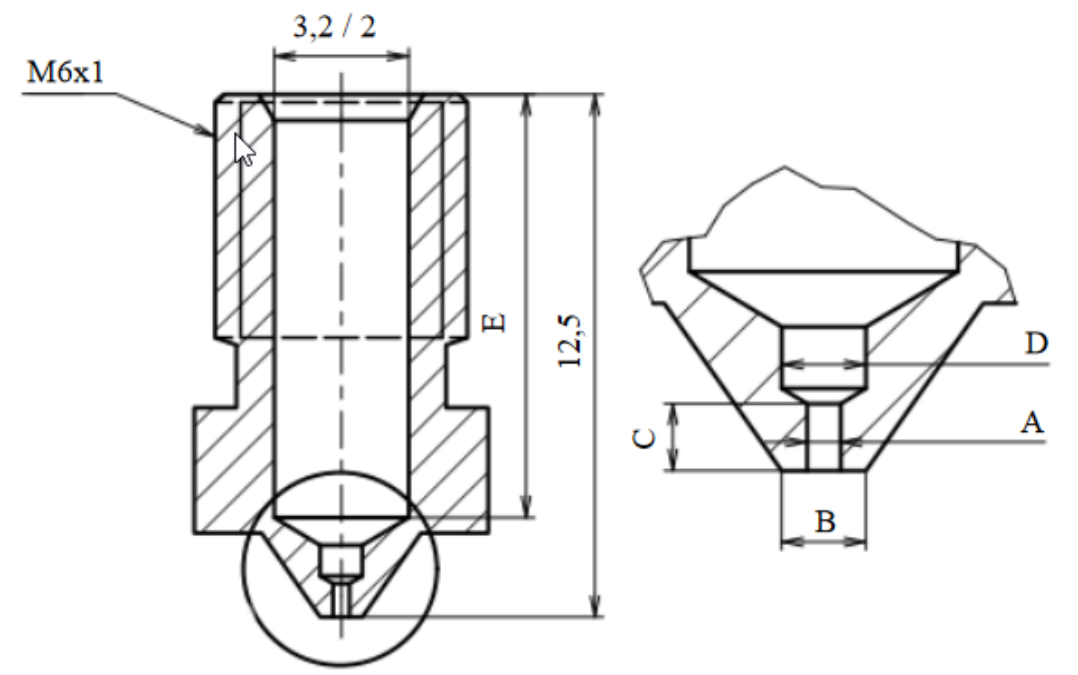
Nejdůležitějším vyhříváním prvkem je ale tavící tryska, kterou má každá tiskárna. Pro její vyhřívání se nejčastěji používají topné patrony, které jsou schopny vyhřát trysku až na 350 °C. Běžně najdeme patronu o výkonu 40W a napájecím napětím 24 V, stejně jako podložka. Dalšími možnostmi ohřevu jsou buď indukční ohřev nebo ohřev odporovým drátem, vyrobený z materiálu, který má vysokou rezistivitu, například Kanthal® [19].

### 2.5.4 Tryska

Tryska má přímý vliv na vzhled a kvalitu výrobku. Mezi hlavní parametry se řadí dobré tepelné vlastnosti (schopnost dobře vést teplo – řešení problému s tepelnou ztrátou) a také dobré kluzné vlastnosti, aby při toku taveniny vznikal co nejmenší odpor z důvodu neneutonského chování taveniny polymeru. Materiálem, který má vhodné vlastnosti, je mosaz. Lze využít i ocel nebo měď, ty ale můžou s taveninou termoplastu reagovat a proto je potřeba trysky povrchově upravovat.

Tloušťku vrstvy určuje výstupní průměr trysky. Běžně se vyrábějí trysky o průměru 0,2 – 0,5 mm. Většina zbylých rozměrů se poté navrhuje dle průměru.

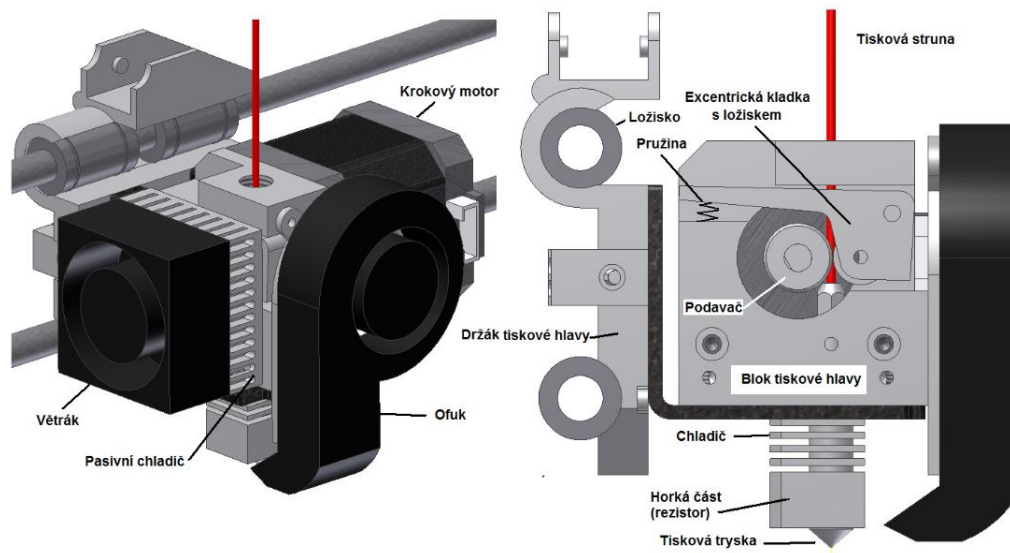
Společně s ostatními součástmi tvoří tryska (schématický výkres na Obrázku 16) horkou část tiskárny, kde dochází k tavení polymeru. Ostatními součástmi jsou ohřívací blok (Obrázek 15), tepelný most a chladič a to v případě, pokud se jedná o jednotku (sestavu) pod názvem J-head. Takto navržená sestava je celokovová a umožňuje dosahovat vyšších teplot. Nejběžnější rozměry trysky jsou uvedeny v tabulce 1 [23].



Obrázek 15 – Schématický výkres trysky [23]

Tabulka 1 Běžné rozměry trysky [23]

A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm] (tryska Ø1,75 mm)	D [mm] (tryska Ø3 mm)	E [mm]
0,25	0,63	0,50	1,00	1,00	10,10
0,30	0,75	0,60	1,00	1,00	10,10
0,35	0,88	0,70	1,00	1,00	10,10
0,40	1,00	0,80	1,50	1,50	10,10
0,60	1,50	1,20	3,20	2,00	N/A



Obrázek 16 – Schéma tryskové hlavy [24]

### 2.5.5 Motory

Pro pohon lineárních vedení se u 3D tiskáren používají krokové motory. U dražších verzí se používají krokové motory se zpětnou vazbou, která umožňuje ještě přesnější polohování s odezvou do 25 mikrosekund.

Co se týče parametrů běžně používaných, tak mají krokové motory rozsah kroků od  $0,9^\circ$  do  $1,8^\circ$  a maximální proudy se pohybují od 1 do 2 A. Krouticí momenty se pohybují v rozmezí od 0,5 Nm do 2,5 Nm [26].

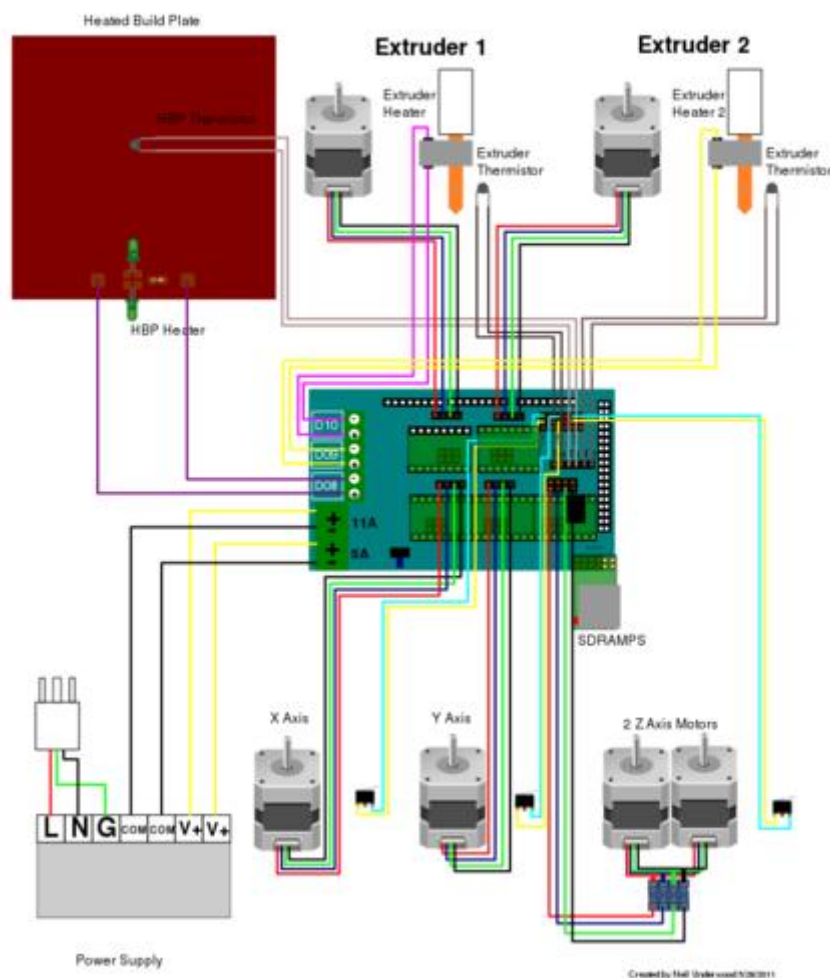
### 2.5.6 Elektronika a řídicí systém

Základem této části je CAD model tištěného výrobku, převedený do formátu STL. Software, který CAD model převádí do formátu STL, rozřeže model do vrstev, které jsou kolmé na osu z, a na základě pevnostního výpočtu (program samostatně provede optimalizační výpočet) vznikne cesta, po které bude jezdit vytlačovací hlava. Vzniklý soubor G-kódů se pošle do řídicí jednotky tiskárny. Mezi běžně používané softwary patří AutoCAD Inventor LT Suite, Autodesk 3D Max, Revit LT a samozřejmě Insight 3D Printing Software, který je jeden z nejvyvinutějších a nejvíce

optimalizovaných softwarů pro 3D tisk. Příklad zapojení řídicího systému je na obrázku 17 [25].

Vlastní firmware tiskárny pak zajišťuje krokování motorů, výpočet souřadnic, monitoruje teploty a dráhy pojezdů. Spojení s počítačem je běžně přes USB rozhraní, ale už se objevují na trhu i tiskárny s bezdrátovým připojením přes Wi-Fi nebo technologii Bluetooth.

### RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.4



Obrázek 17 Příklad zapojení elektroniky v plošném spoji pro 3D tiskárnu typu RepRap [25]



2.5.7 Konstrukční a výpočtové zásady a výhody a nevýhody různých konstrukčních návrhů  
Proces tisku začne vtlačení vlákna z extruderu do sestavy trysky, kde dojde k natavení drátu a následnému tištění. Zde již narazíme na několik konstrukčních a výpočtových zásad.

První z nich je dodržení stále teploty během procesu tisku. Pokud dojde k nějakému kolísání teplot v okolí extruderového systému, zejména v okolí trysky, tak potom hrozí nebezpečí ztuhnutí plastu na vnitřních površích a může dojít i k ucpání trysky. Naopak při převýšení určité meze teplot, stanovené pro daný materiál, se může stát to, že plast bude příliš tekutý a při tisku na vrstvu nebude držet tvar a rozteče se, anebo nedojde k dostatečnému přilnutí k předchozí vrstvě. Množství tepla, potřebné na roztavení plastu, se stanoví z tepelné kapacity polymeru. Především takovým problémům lze díky dobře navržené izolaci nebo tepelnému mostu a chladiči.

Dalším zásadou je pevnostní výpočet pevnosti nosné konstrukce. Ta by měla zajistit co největší stabilitu při tisku, protože krokové motory mohou způsobit pohyby, malé, ale přesto budou mít značný vliv na výslednou kvalitu výtisku. Zároveň by měla být lehká v případě domácích či stolních tiskáren.

2.5.8 Využití technologie FDM v oblasti procesní techniky

Zastoupení plastů je v procesní technice poměrně široké. Materiály, využívané v technologii FDM mají z hlediska procesní techniky zajímavé vlastnosti. Jedná se hlavně o chemickou odolnost a stálost, korozivzdorné vlastnosti, pevnost, houževnatost. V určitých případech by byli schopni zaměnit běžné materiály pro procesní techniku, jako jsou kovy. Kovové materiály mají jednu velkou nevýhodu – slabá odolnost proti korozi, v případě čistých kovů, a pokud upravují, například legováním nebo povrchovou úpravou, tak se zvýší jejich cena, která je oproti ceně plastů vysoká.

Další značnou výhodou 3D tiskáren jsou jejich malé rozměry. Mohou být umístěny i v kancelářích, protože nehrozí porušení předpisů pro bezpečnost práce, ale hlavně

mohou být umístěny v prostorách výrobního závodu. Tím se značně zkrátí čas dodávaných výrobků, protože je podnik schopný dodávat sám pro sebe určité díly.

Co se týče samotných výrobků, tak to mohou být jak nějaké do procesních kolon, tak i statické směšovače, míchadla, síta a jiné. Tiskárna umožňuje dosahovat daleko složitějších geometrických tvarů. Tak, například se mohou tisknout Pallovy kroužky do náplňových kolon (absorpční apod.) nebo i části patrových kolon (kloboučky apod.).

Dalším využitím je prototypová výroba míchadel, kde 3D tiskárna umožňuje dosahovat složitých geometrií lopatek míchadla. Po návrhu se míchadlo vytiskne a může se testovat. Tím konstruktéři takových to míchadel získávají nástroj, umožňující levné a rychlé testování míchadel, než kdyby byly nuceni čekat na výrobu kovových míchadel.

Obecně lze říct, že 3D tiskárny slouží hlavně pro rychlé testování (Rapid Prototyping) a ověření geometrie sestavy (v případě stroje). Také umožňují výrobu přípravků na zkoušky (například zkoušky těsností – tisk zátek). Tím se snižují náklady na vývoj výrobku a krátí se doba výroby. V oblasti procesní techniky jsou takové vlastnosti velmi žádané, protože hodně výrobků se vyrábějí zakázkově (kolony, míchadla apod.) a takové výrobky si vyžadují delší návrh, zkoušky, certifikaci apod. 3D tiskárna umožňuje uskutečnění podobného projektu zakázkové výroby zkrátit a snížit nežádoucí náklady. V oblasti sériové výroby mají tiskárny uplatnění zejména při výrobě náhradních dílů (Pallovy kroužky nebo jiné náplně) nebo spotřebního materiálu (přepravní krabice apod.).

### 3 Výpočtová část

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.5.3 existuje více způsobů tavení polymeru v tavicím pásmu. Způsob tavení topnou patronou je sice jeden z nejpoužívanějších, ale při výpočtu narazíme na několik obtížností, zejména nesymetrie úlohy. Výpočet by ale byl obdobný výpočtu provedenému v této práci. Zahrnoval by určité odhady, předpoklady, podobné kriteriální rovnice a podobností čísla, s tím rozdílem, že by byl složitější, případně by se řešil i numericky. Ve všech případech je výpočet komplikován nestacionární složkou, kterou v určitých případech lze zanedbat, jak je ukázáno v dalších kapitolách.

V této práci bude uveden postup pro výpočet potřebného proudu, který bude procházet odporovým drátem, navinutým kolem tavicího pásma nebo-li trysky, za předpokladů a odhadů uvedených v následující kapitole. Uvedený výpočet platí pro standardní velikost tiskové hlavy tiskárny FDM, kde zvoleným tištěným polymerem je ABS (kapitola 2.3.1.2). Rychlost tisku pro zvolený materiál je  $16 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$ . Jsou známé všechny rozměry trysky (vnitřní a vnější), teplota tavení polymeru, okolní podmínky (atmosférický tlak a teplota). V kapitole 3.2 se neuvažuje vliv sálání. Výpočet se sálavou složkou tepelného toku se uveden v kapitole 3.3.

#### 3.1 Předpoklady výpočtu a užití vztahy

Pro provedení výpočtu byly použity následující vztahy:

1. Newtonův vztah pro konvektivní přestup tepla:

$$\vec{q} \cdot \vec{n} = q_n = \alpha \cdot (T_f - T_s) \quad (8)$$

kde  $\vec{q}$  je hustota tepelného toku,  $\vec{n}$  je vektor normály,  $q_n$  je hustota tepelného toku ve směru normály,  $\alpha$  je součinitel přestupu (přenosu) tepla,  $T_f$  je teplota proudícího média a  $T_s$  je teplota stěny.

2. Joulovo teplo vznikající v odporovém drátě:

$$P = R \cdot I^2 \quad (9)$$

kde  $P$  je výkon,  $R$  je elektrický odpor a  $I$  je proud

3. Rovnice kontinuity toku polymeru ve tvaru:

$$u_1 S_1 = u_2 S_2 \quad (10)$$

kde  $u_i$  je rychlost proudění a  $S_i$  je průtočný průřez (v rámci této práce je jedním z průřezů i průřez polymerního drátu).

4. Rovnice pro nestacionární vedení tepla v tělesech se zanedbatelným vnitřním odporem ( $Bi \ll 1$ ).

$$t = \frac{\rho c_p}{\alpha S} \cdot \ln \frac{T_0 - T_f}{T - T_f} \quad (11)$$

kde  $t$  je čas,  $\rho$  je hustota materiálu,  $c_p$  je měrná tepelná kapacita materiálu,  $\alpha$  je součinitel přestupu (přenosu) tepla,  $S$  je průřez,  $T_0$  je počáteční teplota,  $T$  je požadovaná teplota a  $T_f$  je teplota v jádře proudícího média.

5. Kriteriační rovnice pro Nusseltovo číslo při volné konvekci:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (12)$$

kde  $Nu$  je podobnostní číslo Nusselta,  $Ra$  je podobnostní číslo Rayleighovo.

6. Nusseltovo číslo:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda_{fluid}} \quad (13)$$

kde  $Nu$  je Nusseltovo číslo,  $\alpha$  je součinitel přestupu (přenosu) tepla,  $L_{char}$  je charakteristický rozměr a  $\lambda_{fluid}$  je tepelná vodivost prostředí (tekutiny).

7. Biotovo číslo:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda_{tuh}} \quad (14)$$

kde  $Bi$  je Biotovo číslo,  $\alpha$  je součinitel přestupu (přenosu) tepla,  $L_{char}$  je charakteristický rozměr a  $\lambda_{tuh}$  je tepelná vodivost tuhého materiálu.

8. Prandtlovo číslo:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (15)$$

kde  $Pr$  je Prandtlovo číslo,  $a$  je součinitel teplotní vodivosti,  $\nu$  je kinematická viskozita prostředí (tekutiny).

9. Grashofovo číslo:

$$Gr = \frac{g \cdot \gamma \cdot L_{char}^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (16)$$

kde  $Gr$  je Grashofovo číslo,  $g$  je gravitační zrychlení,  $\gamma$  je teplotní součinitel objemové roztažnosti,  $L_{char}$  je charakteristický rozměr,  $\Delta T$  je rozdíl mezi povrchovou a průměrnou teplotami a  $\nu$  je kinematická viskozita prostředí (tekutiny).

10. Rayleighovo číslo

$$Ra = GrPr \quad (17)$$

kde  $Gr$  je Grashofovo číslo a  $Pr$  je Prandtlovo číslo.

11. Stefan-Boltzmannův zákon

$$\vec{q} \cdot \vec{n} = q_n = \sigma^{(s)} \cdot (T_{S_j}^4 - T_S^4) \quad (18)$$

kde  $\vec{q}$  je hustota tepelného toku,  $\vec{n}$  je vektor normály,  $q_n$  je hustota tepelného toku ve směru normály,  $\sigma^{(s)}$  je Stefan-Boltzmannova konstanta a  $T_S$  je teplota stěny.

Dále je nutné uvést předpoklady, které jsou nutné pro tento výpočet. Prvním předpokladem je povaha vzduchu jako ideálního plynu. To má vliv na rovnici (16), kde tímto lze říct, že teplotní součinitel objemové roztažnosti  $\gamma$  lze spočítat jako převrácenou hodnotu střední teploty

$$\gamma = \frac{1}{\frac{1}{2}(T_f + T_S)} \quad (19)$$

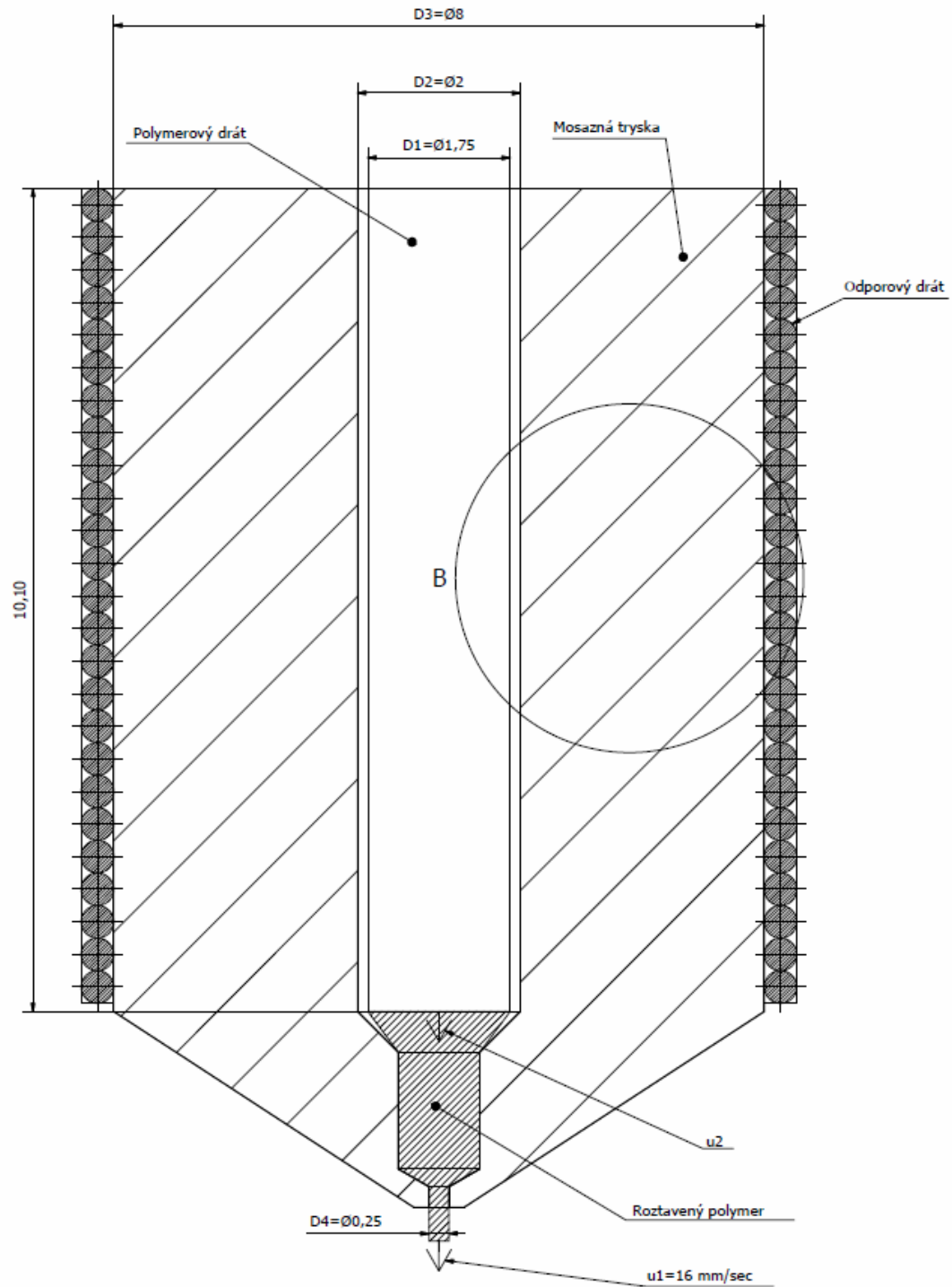
Dalším, nejdůležitějším předpokladem je nízká hodnota Biotova čísla, která musí být menší než 0,1 ( $Bi \ll 1$ ). Tento předpoklad bude ověřen ve výpočtu.

Dalším předpokladem je kvalitní izolace. To znamená, že žádné teplo, vzniklé v odporovém drátě, nebude unikat do okolního prostředí. S tímto je též spjatý další předpoklad – teplo se šíří pouze v jednom směru. Pro účely této práce se teplo šíří pouze v radiálním směru.

Posledním předpokladem je stálost určitých fyzikálních konstant, jako hustota a tepelná vodivost, jejichž hodnoty se mohou výrazně měnit v závislosti na změně teploty.

### 3.2 Postup výpočtu

Před započítím výpočtu je nutné si udělat grafickou představu úlohy, kterou lze vidět na obrázku 15. Z toho plyne že index „1“ platí pro průměr polymerního drátu, „2“ platí pro vnitřní průměr trysky, „3“ platí pro vnější průměr trysky a „4“ platí pro výstupní průměr trysky. Pro účely této práce jsem zvolil polymer ABS (kapitola 2.3.1.2). Rozměry a rychlosti jsou uvedené na obrázku 18.



Obrázek 18 Schéma úlohy

3.2.1.1 *Určení doby zdržení*

Prvním krokem je určení rychlosti pohybu drátu  $u_2$  v oblasti tavicího pásma. Po dosazení a úpravě rovnice (10) ve tvaru

$$u_1 = u_2 \frac{S_2}{S_1} = u_1 \frac{D_2}{D_1} = 16 \frac{0,25}{1,75} = 2,286 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} = \underline{2,29 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (20).$$

Z toho pak lze určit dobu zdržení drátu v oblasti tavicího pásma ze znalosti rychlosti a délky pásma

$$t = \frac{L}{u_2} = \frac{10,1}{2,286} = \underline{4,42 \text{ s}} \quad (21).$$

3.2.1.2 *Výpočet podobnostních čísel a stanovení součinitele přestupu (přenosu) tepla  $\alpha$* 

Pro výpočet podobnostních čísel a stanovení součinitele přestupu tepla je nutné předem odhadnout teplotu ve vzduchové mezeře v trysce, kterou odhadnu na  $T_f = 250^\circ\text{C}$  (teplota zvolena s ohledem na běžné teploty, kterých se v trysce dosahuje). Požadovaná teplota činí  $T = 220^\circ\text{C}$  (teplota tavení drátu). Dále pro střední teplotu je potřebné uvést hodnoty fyzikálních konstant. Je nutné dodat, že hodnota Prandtlova čísla pro vzduch v rozmezí teplot od  $-50$  do  $+500^\circ\text{C}$  je téměř neměnná. Přehled hodnot fyzikálních vlastností je uveden v tabulce 2. Pro střední hodnotu teploty, tedy

$$T_{STŘ} = \frac{1}{2}(T_f + T) = \frac{1}{2}(250 + 220) = \underline{235^\circ\text{C}} = \underline{508,15 \text{ K}} \quad (22).$$

Fyzikální konstanta	Popis	Hodnota	Jednotka
$\rho_{ABS}^{T_{STŘ}}$	Hustota polymeru ABS při střední teplotě	1400	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$g$	Gravitační zrychlení	9,814	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$Pr_{T_{STŘ}}$	Hodnota Prandtlova čísla	0,727	-
$\nu_{T_{STŘ}}$	Kinematická viskozita vzduchu při střední teplotě	$39,985 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



$\lambda_{T_{STR}}^{vzduch}$	Tepelná vodivost vzduchu při střední teplotě	$3,986 \cdot 10^{-2}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{T_{STR}}^{mosaz}$	Tepelná vodivost mosazi při střední teplotě	140	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{T_{STR}}^{ABS}$	Tepelná vodivost polymeru ABS při střední teplotě	0,170	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\rho^{(el)}_{Kanthal_{T_{STR}}}$	Rezistivita odporového drátu z materiálu Kanthal® při střední teplotě	$2,815 \cdot 10^{-6}$	$\Omega \cdot m$
$\gamma_{T_{STR}}$	teplotní součinitel objemové roztažnosti dle rovnice (17)	$19,679 \cdot 10^{-4}$	$\frac{1}{K}$
$\varepsilon_1$	Emisivita plastu	0,9	-
$\varepsilon_2$	Emisivita mosazi leštěné	0,05	-
$\sigma^{(s)}$	Stefan-Boltzmanova konstanta	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

Tabulka 2 Přehled fyzikálních vlastností materiálů při střední pracovní teplotě

Dalším krokem je stanovení hodnot podobnostních čísel. Prvním je Grashofovo číslo dle rovnice (16), kde charakteristickým rozměrem je délka tavicího pásma L.

$$Gr = \frac{g \cdot \gamma \cdot L_{char}^3 \Delta T}{\nu^2} = \frac{9,814 \cdot 19,676 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0101^3 \cdot (250 - 220)}{(39,985 \cdot 10^{-6})^2} = \underline{\underline{373,375}} \quad (23)$$

Po přenásobení Grashofova čísla a Prandtlova čísla dostaneme Rayleighovo dle rovnice (17)

$$Ra = GrPr = 373,375 \cdot 0,727 = 271,444 \quad (24)$$

Dosazením do kritériální rovnice (12) získáme Nusseltovo číslo, ze kterého následným dosazením do upravené (13) lze určit je součinitel přestupu (přenosu) tepla  $\alpha$ .

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 271,444^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{373,375} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = 2,703 \quad (26)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L_{char}}{\lambda_{fluid}} \rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{T_{STR}}^{vzduch}}{L} = \frac{2,703 \cdot 3,986 \cdot 10^{-2}}{0,0101} = 10,426 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (25).$$

Následně ověříme předpoklad z kapitoly 3.1, že Biotovo číslo je nižší než 0,1 ( $Bi \ll 1$ ). Dosazením do (15) vlastností obou materiálů a součinitele přestupu tepla, získaného v (24) provedeme ověření.

$$Bi_{mosaz} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_{mosaz}} = \frac{10,426 \cdot 0,0101}{140} = 0,00752 \ll 0,1 \quad (26)$$

$$Bi_{ABS} = \frac{\alpha \cdot D_1}{\lambda_{ABS}} = \frac{10,426 \cdot 0,00175}{0,18} = 0,0912 \ll 0,1 \quad (27)$$

Tímto výpočtem byl ověřen předpoklad z 3.1 a tím též dokazujeme možnost použití (11).

### 3.2.1.3 Stanovení teploty prostředí $T_f$ a hustoty tepelného toku

I přesto že teplota prostředí byla odhadnuta, máme k dispozici veškeré podklady pro výpočet této teploty z (11). Úpravou (11) získáme, že

$$t = \frac{\rho c_p}{\alpha S} \cdot \ln \frac{T_0 - T_f}{T - T_f} \rightarrow T_f = \frac{T \cdot e^{\frac{\alpha t S_2}{\rho c_p}} - T_0}{e^{\frac{\alpha t S_2}{\rho c_p}} - 1} = \frac{493,15 \cdot e^{\frac{10,426 \cdot 4,419 \cdot 5,553 \cdot 10^{-5}}{1040 \cdot 1400}} - 293,15}{e^{\frac{10,426 \cdot 4,419 \cdot 5,553 \cdot 10^{-5}}{1040 \cdot 1400}} - 1} =$$

$$519,475 \text{ K} = 245,97 \text{ °C} \quad (28)$$

Podle výsledku lze též usoudit, že odhad byl poměrně přesný. Hustotu tepelného toku získáme dosazením do (8). Hustota tepelného toku, za předpokladu zanedbatelného tepelného odporu taveného drátu a teploty  $T_1$  (teplota na povrchu drátu), rovné požadované teplotě  $T = 220 \text{ °C} = 493,15 \text{ K}$ , je tím pádem rovna

$$q_0 = \alpha \cdot (T_f - T_1) = 10,426 \cdot (519,475 - 493,15) = 274,460 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (29)$$

### 3.2.1.4 Stanovení teploty vnějšího pláště trysky $T_3$ a potřebného proudu

Při stanovení teploty teploty na vnějším povrchu trysky  $T_3$ , opět využijeme rovnice (8) opět za předpokladu zanedbatelného tepelného odporu a tím pádem rovnosti teplot v celé trysce  $T_2 = T_3$ , kde  $T_2$  je teplota na vnitřním plášti trysky (povrch trysky). Úpravou (8) získáme teplotu  $T_2$ , která činí

$$T_3 = T_2 = \frac{q_0}{\alpha} + T_f = \frac{274,46}{10,425} + 519,475 = 545,8 \text{ K} = 272,650 \text{ °C} \quad (32).$$

Tato teplota opět odpovídá běžným teplotám na povrchu trysky.

Pro stanovení potřebné proudu, který by měl protékat odporovým drátem, je nejdříve nutné vypočítat průřez drátu, počet vinutí, délku navinutého drátu, plochu a jeho odpor. Použitý průměr drátu – 0,4 mm.

Obsah průřezu vodiče, délka navinutého drátu a plocha drátu jsou tedy

$$S_{Průřez} = \frac{\pi \cdot d_{Kanthal}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1,26 \cdot 10^{-7} m^2 \quad (30),$$

$$n = \frac{a}{p} = \frac{L}{D_{drát}} = \frac{10,1}{0,4} = 25,25 \rightarrow \text{zaokrouhлено na 25} \quad (31),$$

$$L_{vinutí} = \pi \cdot \left( D_3 + \frac{1}{2} D_{drát} \right) \cdot n = \pi \cdot \left( 0,008 + \frac{1}{2} \cdot 0,0004 \right) \cdot 25 = 0,64 m \quad (32),$$

$$S_{vinutí} = L_{vinutí} \cdot \pi \cdot \left( D_3 + \frac{1}{2} D_{drát} \right) = 0,64 \cdot \pi \cdot \left( 0,008 + \frac{1}{2} \cdot 0,0004 \right) = 0,017 m \quad (32).$$

$$R_{vinutí} = \frac{\rho^{(el)}_{Kanthal_{STŘ}} \cdot L_{vinutí}}{S_{Průřez}} = \frac{2,815 \cdot 10^{-6} \cdot 0,64}{1,26 \cdot 10^{-7}} = 14,43 \Omega \quad (33).$$

Dále je důležité přepokládat, že výkon, spočítaný z (9), bude roven tepelnému toku, který jde do trysky, tedy

$$P = q_0 \cdot S_{vinutí} \quad (34).$$

Sloučením rovnic (9) a (36) dostaneme tedy

$$q_0 \cdot S_{vinutí} = R \cdot I^2 \rightarrow I = \sqrt{\frac{q_0 \cdot S_{vinutí}}{R}} = \sqrt{\frac{274,46 \cdot 0,017}{14,43}} = 0,56 A \quad (35).$$

Tato hodnota proudu je v mezi běžně používaných proudů, tedy  $I \in (0,4 \div 0,8) A$ . Takto provedený výpočet je na straně bezpečnosti z hlediska rychlosti natavování drátu.

### 3.3 Vliv sálání

Předchozí řešení neuvažovalo vliv přenosu tepla z trysky na drát mechanismem sálání, ale pouze konvekcí přes vzduchovou mezeru. Vzhledem ke komplikovanosti přímého řešení obou těchto mechanismů se proto nyní ověří, jaký má sálání vliv na výpočet.

Vliv sálání v této úloze se musí řešit pomocí rovnice (18) a následným porovnáním s celkovým tepelným tokem. Nejdříve ji upravíme do tvaru

$$q_{1,2} = \varepsilon_{1,2} \cdot \sigma^{(s)} (T_2^4 - T_1^4) \quad (36),$$

kde je nutno ještě dopočítat emisivitu  $\varepsilon_{1,2}$  dle (35)

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{1}{\frac{1}{0,9} + \frac{5,55 \cdot 10^{-5}}{6,35 \cdot 10^{-5}} \left( \frac{1}{0,05} - 1 \right)} = 0,0564 \quad (37).$$

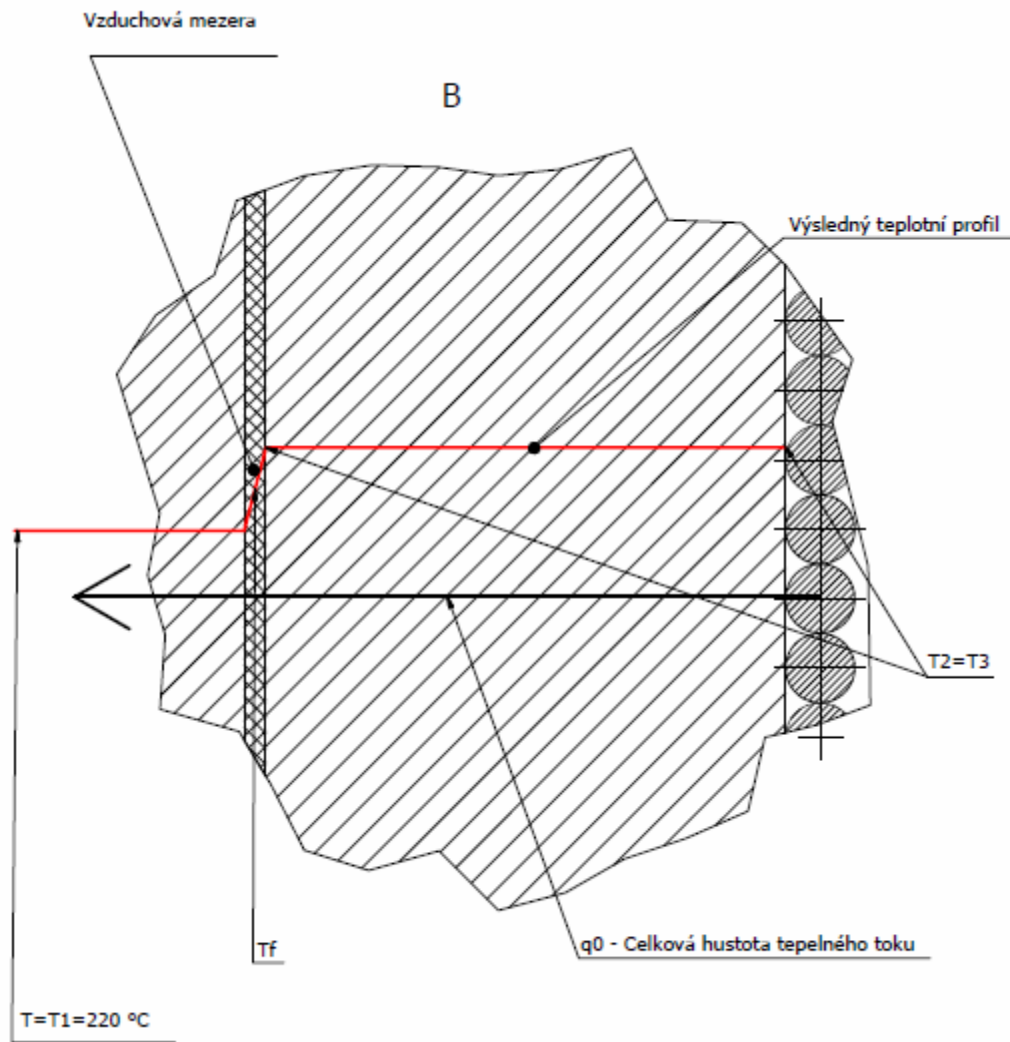
Dosazením výsledku z (35), teplot a Stefan-Boltzmanovy konstanty získáme, že

$$q_{1,2} = \varepsilon_{1,2} \cdot \sigma^{(s)} (T_2^4 - T_1^4) = 0,0564 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (545,8^4 - 473,15^4) = 123,48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad (38),$$

a následným srovnáním s výsledků z (31) a (36) zjistíme, že

$$\frac{q_{1,2}}{q_0} = \frac{123,48}{274,46} = 0,45 \quad (39).$$

Z posledního výpočtu plyne, že sálavý tok není zanedbatelný, a tedy drát se bude natavovat rychleji (resp. na vyšší teplotu), což je nežádoucí.



Obrázek 19 Výsledné schema úlohy

## 4 Závěr

První část této práce, teoretická, je věnována řešerši na téma technologie 3D tisku v procesní technice. Byly uvedeny současné metody aditivní výroby, jejich výhody a nevýhody. Dále byla práce zaměřena na metodu FDM, kde byly uvedeny používané materiály pro tuto metodu a následně byly popsány procesy, probíhající během tisku z fyzikálního hlediska, a také z reologického hlediska. Následně byla popsána konstrukce 3D tiskárny, její hlavní konstrukční prvky a případná konstrukční omezení. V závěru teoretické části byly uvedeny možnosti využití 3D tiskárny v oblasti procesní a zpracovatelské techniky.

Ve druhé části, výpočtové, byla práce věnována stanovení potřebného tepelné toku, potřebného k roztavení polymerního drátu metodou odporového drátu. Pro výpočet byla použita tryska, která se běžně používá a má známé rozměry. Jako tavený materiál byl zvolen plast ABS, výtokový průměr trysky je 0,4 mm a průměr trysky v tavicím pásmě byl roven 2 mm. Zvolená rychlost tisku činila  $16,0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tím byly stanoveny počáteční podmínky, které byly doplněny o předpoklady a rovnice, pomocí kterých byl výpočet proveden. Ve výsledku a při neuvažování sálání je hustota tepelého toku  $q_0 = 274,460 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a pro vyvinutí takového tepelného toku v navinutém drátě z materiálu Kanthal<sup>®</sup> o průměru 0,4 mm je třeba elektrického proudu  $I = 0,56 \text{ A}$ . V tomto případě bude povrchová teplota trysky na vnějším průměru (navinutého drátu) a v případě 100 % izolace  $T_3 = 272,650 \text{ °C}$ .

Hodnota sálavého toku  $q_0 = 123,48 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  není zanedbatelná a drát se tedy bude natavovat rychleji (resp. na vyšší teplotu), což je nežádoucí z hlediska degradace plastů. Teplotu lze ale regulovat změnou proudu nebo napětí (běžně 12 až 24V) a z tohoto hlediska představuje provedený výpočet bezpečné řešení, neboť snížit proud lze snadno.

## 5 Použitá literatura

- [1] CHUA, Chee Kai. a Kah Fai. LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte., 2014. ISBN 9789814571401.
- [2] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Dot. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-00957-2.
- [3] Princip strojů využívající SLS metodu a obrábění [vid. 13.8.2017]. Dostupné z: <http://us.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d>
- [4] SCHOULA, Šimon. Konstrukční návrh 3D tiskárny. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Fakulta Strojní. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/60765/2016\\_DP\\_Schoula\\_a\\_%C5%A0imon\\_145199.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/60765/2016_DP_Schoula_a_%C5%A0imon_145199.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [5] Swiss scientists just 3D printed an artificial heart that beats like the real thing [vid. 14.7.2017]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/3d-printed-silicone-heart/>
- [6] Антон Владимирович Белоусов. Параллельный FDM-принтер. Волгоград, 2016. Дипломная работа. Волгоградский государственный университет. [vid. 15.7.2017]. Dostupné z: <http://mp.jvolsu.com/index.php/en/component/attachments/download/579>
- [7] Types of 3D printer or 3D printing technologies overview. [vid. 29.5.2017] Dostupné z: <http://en.topmaxtech.net/reviews/2015/12/27/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/279.html>
- [8] What is the best type of plastic for my 3D printing application. [vid. 29.5.2017] Dostupné z: <http://my3dmatter.com/what-is-the-best-type-of-plastic-for-my-3d-printing-application/>
- [9] FDM Themoplastics. Katalog dostupných materiálů pro technologii FDM od firmy Stratasys. [vid. 30.4.2017] Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>

- [10] Příklad materiálu PLA. [vid. 29.5.2017] Dostupné z: [http://i00.i.aliimg.com/wsphoto/v1/2037861924\\_1/Royal-Bule-3D-Printer-Filaments-PLA-ABS-HIPS-1-75mm-3mm-1kg-Plastic-font-b-Rubber.jpg](http://i00.i.aliimg.com/wsphoto/v1/2037861924_1/Royal-Bule-3D-Printer-Filaments-PLA-ABS-HIPS-1-75mm-3mm-1kg-Plastic-font-b-Rubber.jpg)
- [11] Fyzikální vlastnosti materiálu PLA. [vid. 29.5.2017]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/pla/>
- [12] PLA Material Data Sheet. [vid. 29.5.2017]. Dostupné z: [http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material\\_Spec\\_Sheets/MSS\\_FDM\\_PLA\\_0117b\\_Web.pdf#\\_ga=2.79479900.930539940.1502616709-1330841675.1502616709](http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_PLA_0117b_Web.pdf#_ga=2.79479900.930539940.1502616709-1330841675.1502616709)
- [13] Acrylonitril/Butadien/Styren (ABS). Mechanické, elektrické a teplotní vlastnosti. [vid. 29.5.2017]. Dostupné z: <http://lpm.cz/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2110&lng=1>
- [14] Příklad materiálu ABS. [vid. 29.5.2017] Dostupné z: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/564x/8e/f5/6f/8ef56f236ab96e4cbc6a1ece2f3b31ae.jpg>
- [15] Příklad materiálu PC. PC (polycarbonate) Data Sheet. [vid. 29.5.2017]. Dostupné z: [http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material\\_Spec\\_Sheets/MSS\\_FDM\\_PC.pdf?v=635796567864296461](http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_PC.pdf?v=635796567864296461)
- [16] HOLUBOVÁ, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4178-8. Dostupné z: [http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady\\_reologie.pdf](http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady_reologie.pdf)
- [17] Non-newtonian Fluids: An Introduction. R.P. Chhabra. [vid. 17.7.2017]. Dostupné z: <http://www.physics.iitm.ac.in/~compflu/Lect-notes/chhabra.pdf>
- [18] Individuální. Intuitivní. Inteligentní. Reologie. Pragolab. [vid. 18.7.2017]. Dostupné z: [http://www.pragolab.cz/files/download/Viscotester\\_iQ\\_Klimovic.pdf](http://www.pragolab.cz/files/download/Viscotester_iQ_Klimovic.pdf)
- [19] Stránky projektu REPRAP. [vid. 20.6.2017]. Dostupné z: <http://reprap.org/>
- [20] Stratasys, Inc. High temperature modeling apparatus. Vynálezci: Swanson; William J.; Patrick W., Leavitt; Paul J., Karwoski; Peter J., LaBossiere; Joseph E., Skubic; Robert L. Spojené Státy Americké. Číslo publikace: US6722872 B1. 20.04.2004.



- [21] Chinese Construction Company 3D Prints an Entire Two-Story House On-Site in 45 Days. [vid. 13.8.2017]. Dostupné z: <https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/>
- [22] Obrázek s příkladem pojezdů pro tiskárnu REBEL II. [vid. 13.8.2017]. Dostupné z: <http://drupp.eu/stavba.html>
- [23] Schéma trysky s běžnými rozměry. [vid. 13.8.2017]. Dostupné z: <http://forums.reprap.org/read.php?252,452079>
- [24] Příklad tiskové hlavy v provedení Hotend. Převzato z: KRATOCHVÍL, Tomáš. 3D FDM Tiskárna REPRAP a parametry tisku. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Fakulta Strojní. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/39819/Tom%C3%A1%C5%A1\\_Kratochv%C3%ADl-3D\\_FDM\\_tisk%C3%A1rna\\_reprap\\_a\\_parametry\\_tisku-DP-2015.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/39819/Tom%C3%A1%C5%A1_Kratochv%C3%ADl-3D_FDM_tisk%C3%A1rna_reprap_a_parametry_tisku-DP-2015.pdf?sequence=1)
- [25] Stránky projektu REPRAP. Zapojení elektroniky. [vid. 13.8.2017]. Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/RAMPS\\_1.4](http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4)
- [26] Stepper motor. [vid. 13.8.2017]. Dostupné z: [http://reprap.org/wiki/Stepper\\_Motor](http://reprap.org/wiki/Stepper_Motor)

## 6 Seznam symbolů a značek

$A$	$[m]$	Výtokový průměr
$\alpha$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Součinitel teplotní vodivosti
$B$	$[m]$	Průměr čela trysky u výtoku
$Bi$	$[-]$	Biotovo číslo
$c_p$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita plastu
$C$	$[m]$	Délka výtokového otvoru
$D$	$[m]$	Průměr před výtokovým otvorem (zde pouze natavený plast)
$D_1$	$[m]$	Průměr polymerního drátu
$D_2$	$[m]$	Vnitřní průměr trysky v oblasti tavícího pásma
$D_3$	$[m]$	Vnější průměr trysky v oblasti tavícího pásma
$D_4$	$[m]$	Výtokový průměr trysky
$D_{průřez}$	$[m]$	Průměr odporového drátu
$E$	$[m]$	Délka tavícího pásma
$g$	$[m \cdot s^{-2}]$	Gravitační zrychlení
$Gr$	$[-]$	Grashofovo číslo
$I$	$[A]$	Elektrický proud
$K$	$[Pa \cdot s^n]$	Koeficient (součinitel) konzistence
$L$	$[m]$	Rozměry trysky – délka tavícího pásma
$L_{char}$	$[m]$	Charakteristický rozměr
$n$	$[-]$	Index toku
$Nu$	$[-]$	Nusseltovo číslo
$Pr$	$[-]$	Prandtlovo číslo
$\dot{q}_0$	$[W \cdot m^{-2}]$	Celková hustota tepelného toku
$\dot{q}_{1,2}$	$[W \cdot m^{-2}]$	Hustota sálavého tepelného toku
$q_{0\text{sálání}}$	$[W \cdot m^{-2}]$	Celková hustota tepelného toku při uvažování sálání
$\dot{Q}$	$[W]$	Tepelný tok

$Ra$	$[-]$	Rayleighovo číslo
$S_1$	$[m^2]$	Plocha pláště taveného drátu v oblasti tavícího pásma
$S_2$	$[m^2]$	Plocha vnitřního pláště trysky v oblasti tavícího pásma
$S_3$	$[m^2]$	Plocha vnějšího pláště trysky v oblasti tavícího pásma
$S_4$	$[m^2]$	Průřez výtokového otvoru
$S_{vinutí}$	$[m^2]$	Průřez odporového drátu
$T$	$[K]$	Teplota nutná k roztavení polymerního drátu
$T_{STŘ}$	$[K]$	Střední pracovní teplota
$T_f$	$[K]$	Teplota vrstvy vzduchu v trysce
$T_1$	$[K]$	Teplota nutná k roztavení polymerního drátu
$T_2$	$[K]$	Teplota vnitřní stěny trysky
$T_3$	$[K]$	Teplota vnější stěny trysky
$u_1$	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost pohybu drátu v oblasti tavícího pásma
$u_2$	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost výtoku
$\alpha$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel přestupu (přenosu) tepla
$\vec{\Delta}$	$[s^{-1}]$	Tenzor rychlosti deformace
$\varepsilon_1$	$[-]$	Emisivita plastu
$\varepsilon_2$	$[-]$	Emisivita mosazi leštěné
$\varepsilon_{1,2}$	$[-]$	Celková emisivita
$\gamma_{T_{STŘ}}$	$[K^{-1}]$	Teplotní součinitel objemové roztažnosti
$\eta$	$[Pa \cdot s]$	Zdánlivá viskozita
$\eta_0$	$[Pa \cdot s]$	Konečná hodnota zdánlivé viskozity při nízkých rychlostech deformace
$\lambda_{tuh}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Teplená vodivost tuhé látky
$\lambda_{fluid}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Teplená vodivost tekutiny
$\lambda_{T_{STŘ}}^{vzduch}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Teplená vodivost vzduchu při střední teplotě

$\lambda_{T_{STŘ}}^{mosaz}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Teplená vodivost mosaze při střední teplotě
$\lambda_{T_{STŘ}}^{ABS}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Teplená vodivost plastu ABS při střední teplotě
$\mu$	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita
$\mu_p$	$[Pa \cdot s]$	Plastická viskozita
$\nu$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita
$\nu_{T_{STŘ}}$	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita vzduchu při střední teplotě
$\rho$	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota
$\rho^{(el)}_{Kanthal}$	$[\Omega \cdot m]$	Rezistivita odporového drátu z materiálu Kanthal® při střední teplotě
$\sigma^{(s)}$	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$	Stefan-Boltzmanova konstanta