

**Univerzita Pardubice**

**Fakulta chemicko-technologická**

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

**Optimalizace kinetického profilu pohybu tiskové hlavy  
3D tiskárny**

Jakub Menci

Bakalářská práce

2023

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub Menci**  
Osobní číslo: **C20073**  
Studijní program: **B0531A130017 Polymerní materiály a kompozity**  
Téma práce: **Optimalizace kinetického profilu pohybu tiskové hlavy 3D tiskárny**  
Zadávací katedra: **Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek**

## Zásady pro vypracování

1. V literární rešerši přehledně popište různé technologie 3D tisku se zaměřením na FDM technologii. V popisu FDM technologie se zabývejte pokročilými funkcemi týkající se kinetického profilu.
2. V teoretické části se dále zaměřte na popis různých typů polymerů vhodných pro zpracování FDM technologií.
3. Charakterizujte vybrané materiály z hlediska zpracovatelských vlastností a připravte pomocí 3D tisku vzorky bez optimalizace kinetického profilu pohybu.
4. Proveďte optimalizaci a přehrajte firmware 3D tiskárny. Dále připravte vzorky s optimalizací kinetického profilu pohybu.
5. Porovnejte a diskutujte rozdíly vzorků připravených před optimalizací a po optimalizaci z hlediska zpracovatelských vlastností.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Prokůpek, Dr.**  
Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Datum zadání bakalářské práce: **23. prosince 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **30. června 2023**

**prof. Ing. Petr Němec, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**doc. Ing. David Veselý, Ph.D. v.r.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 22. února 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem Optimalizace kinetického profilu pohybu tiskové hlavy 3D tiskárny jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Jakub Menci v.r.

Poděkování patří Ing. Luboši Prokúpkovi, Dr. a Ing. Petru Reslovi za pomoc s realizací práce a měření a za četné rady a připomínky, které mi během práce poskytli. Velké díky patří také mé rodině za jejich podporu nejen během mého studia.

## Anotace

Cílem bakalářské práce je provedení optimalizace kinetického profilu tiskové hlavy 3D tiskárny technologie FDM/FFF kartézské konstrukce pomocí funkce Linear Advance obsažené ve firmwaru tiskárny.

Byly vybrány 3 materiály – termoplasty PETG (glykolem modifikovaný polyethylentereftalát), PVA (polyvinylalkohol) a HIPS (houževnatý polystyren). U těchto materiálů byly nejprve na tiskárně zjištěny optimální parametry tisku jako je teplota či rychlost retrakce a zjištěna K-hodnota pro funkci Linear Advance. Následně byl pro jednotlivé materiály stanoven MFI a modul pružnosti v tahu tiskové struny.

Z těchto 3 materiálů byly zhotoveny vzorky bez provedení optimalizace při dvou rychlostech tisku – 40 mm/s a 120 mm/s. Následně byl přehrán firmware tiskárny a povolena funkce Linear Advance. Poté byly zhotoveny vzorky s optimalizací za využití zjištěných K-hodnot a vzorky pro jednotlivé materiály a rychlosti byly porovnány.

Tisk probíhal na modifikované FDM/FFF tiskárně vycházející z tiskárny Flashforge Dreamer 2.

Klíčová slova: 3D tisk, FFF, firmware Marlin, Linear Advance, K-hodnota

## Annotation

Optimization of the kinetic profile of the movement of the 3D print head.

The aim of the bachelor thesis is to optimize the kinetic profile of the 3D print head using the Linear Advance function included in the firmware for Cartesian FDM/FFF technology. Three thermoplastics materials – PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified), PVA (Polyvinyl alcohol) and HIPS (High-Impact Polystyrene) were selected. The optimal printing parameters, such as temperature and retraction speed, were first determined for these materials on the printer and the K-value for the Linear Advance function was identified. The MFI and modulus of elasticity in tension were then determined for each material.

Samples without optimization were produced from these three materials at two printing speeds - 40 mm/s and 120 mm/s. The printer's firmware was then updated and the Linear Advance function was enabled. Samples were then produced with optimization using the identified K-values and the samples for each material and speed were compared.

The printing was carried out on a modified FDM/FFF printer based on commercially available Flashforge Dreamer 2.

Keywords: 3D printing, FFF, firmware Marlin, Linear Advance, K-Factor

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	9
SEZNAM TABULEK .....	11
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	12
ÚVOD .....	13
1. Teoretická část .....	14
1.1 Technologie 3D tisku .....	14
1.2 Využití aditivní výroby .....	15
1.3 Výhody a nevýhody aditivní výroby .....	18
1.4 Kategorizace technologií aditivní výroby .....	19
1.4.1 Vat Photopolymerization (Vaničková fotopolymerace) .....	19
1.4.2 Powder Bed Fusion .....	20
1.4.3 Binder Jetting .....	20
1.4.4 Direct Energy Deposition .....	21
1.4.5 Material Jetting .....	22
1.4.6 Sheet Lamination .....	22
1.4.7 Materiálová extruze .....	23
1.5 Technologie FDM/FFF .....	24
1.5.1 Typy FFF tiskáren .....	26
1.5.2 Popis částí FFF tiskárny .....	29
1.5.3 Proces tisku technologií FFF .....	33
1.6 Firmware Marlin .....	35
1.7 Funkce Linear Advance .....	36
1.8 Materiály pro technologii FFF .....	38
1.8.1 Houževnatý polystyren (HIPS) .....	38
1.8.2 Akrylonitril-butadien-styren (ABS) .....	39
1.8.3 Akrylonitril-styren-akrylát (ASA) .....	41
1.8.4 Kyselina polymléčná (PLA) .....	42
1.8.5 Polyvinylalkohol (PVA) .....	45
1.8.6 Polyethylentereftalát (PET) .....	47
1.8.7 Glykolem modifikovaný PET (PETG) .....	48
1.8.8 Polyamid (Nylon) .....	48

2. Praktická část.....	51
2.1 Základní charakteristika materiálů.....	51
2.2 FFF tiskárna.....	52
2.3 Aktivace funkce Linear Advance a přehrání firmwaru 3D tiskárny.....	54
2.4 Zkušební tělíska.....	55
2.5 Parametry tisku a tisk zkušebních tělísek.....	57
2.6 Stanovení K-hodnot.....	59
2.7 Metody testování.....	62
2.7.1 Stanovení indexu toku taveniny.....	62
2.7.2 Zkouška tahem.....	62
2.7.3 Mikroskop.....	63
3. Výsledky a diskuse.....	64
3.1 K-hodnoty.....	64
3.1.1 PETG.....	64
3.1.2 HIPS.....	65
3.1.3 PVA.....	66
3.2 Porovnání tělísek před optimalizací a po optimalizaci.....	68
3.2.1 PETG.....	68
3.2.2 HIPS.....	71
3.2.3 PVA.....	74
3.3 Index toku taveniny.....	78
3.4 Zkouška v tahu.....	79
4. ZÁVĚR.....	82
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	83



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Tisková farma společnosti PrusaResearch v Praze [4].....	14
Obrázek 2 – Náhradní díl pro lokomotivu zhotovený aditivní technologií [5] .....	15
Obrázek 3 – Rovnátko společnosti Invisalign [6] .....	16
Obrázek 4 – Kryt protézy zhotovený technologií FFF [9] .....	17
Obrázek 5 – Protéza zhotovená technologií FFF [10].....	17
Obrázek 6 – Model domu zhotovený podle architektonického návrhu [2] .....	17
Obrázek 7 – Technologie SLA a DLP [12] .....	19
Obrázek 8 – Technologie Powder Bed Fusion [13].....	20
Obrázek 9 – Technologie Binder Jetting [14].....	21
Obrázek 10 – Technologie DEP [15] .....	21
Obrázek 11 – Proces aditivní výroby technologií Material Jetting [17] .....	22
Obrázek 12 – Proces Sheet Lamination [18] .....	23
Obrázek 13 – Materiálová extruze [19].....	23
Obrázek 14 – Jednoduché schéma běžné FFF tiskárny [20] .....	24
Obrázek 15 – Warping [20].....	25
Obrázek 16 – Tiskárna kartézské konstrukce [22] .....	26
Obrázek 17 – Schéma coreXY konstrukce v osách X a Y [22] .....	27
Obrázek 18 – FFF tiskárna konstrukce coreXY [23] .....	27
Obrázek 19 – FDM tiskárna konstrukce Delta [22] .....	28
Obrázek 20 – FFF tiskárna konstrukce Polar [22].....	29
Obrázek 21 – Kartézská konstrukce typu XZ-hlava (a) a typu XY-hlava (b) [27].....	30
Obrázek 22 – Tisková podložka s práškovým PEI povrchem [30].....	30
Obrázek 23 – "Hotend" [33].....	31
Obrázek 24 – "Coldend" [34].....	32
Obrázek 25 – Různé druhy trysek [36] .....	32
Obrázek 26 – Prostředí programu Fusion 360 [2].....	33
Obrázek 27 – "Stringing" [37] .....	34
Obrázek 28 – Prostředí programu Cura verze 5.2.2 .....	35
Obrázek 29 – Porovnání očekávané vytištěné linky oproti realitě [43] .....	37
Obrázek 30 – Separace jednotlivých vrstev u objektu z ABS [47].....	41
Obrázek 31 – Monomery a dimery využívané pro výrobu PLA [49] .....	43
Obrázek 32 – Polykondenzace mléčné kyseliny za vzniku PLA [49].....	43
Obrázek 33 – Polymerace s otevřením kruhu za vzniku PLA [49].....	44
Obrázek 34 – Reesterifikace PVAC [44].....	45
Obrázek 35 – Podpory z PVA [52].....	46
Obrázek 36 – Struktura PETG [54].....	48
Obrázek 37 – Trysky pro stroje na výrobu sněhu [56].....	50
Obrázek 38 – FFF tiskárna .....	52
Obrázek 39 – Coldend .....	52
Obrázek 40 – Tisková hlava .....	53

Obrázek 41 – Schéma hotendu E3D v6 .....	53
Obrázek 42 – Chladič s hotbreakem, heatblock a tryska .....	54
Obrázek 43 – Povolení Linear Advance ve firmwaru Marlin.....	55
Obrázek 44 – Nákres zkušebního tělesa .....	55
Obrázek 45 – Profil rychlosti pohybu tiskové hlavy [58] .....	56
Obrázek 46 – Náhled zkušebního tělesa v programu Cura.....	57
Obrázek 47 – Vzor pro zjištění K-hodnot (rozmezí 0 – 1,9) pro materiál PETG .....	60
Obrázek 48 – Vzor pro zjištění K-hodnot (rozmezí 1,2 – 1,65) pro materiál PETG .....	61
Obrázek 49 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 (PETG).....	64
Obrázek 50 – Vzor v rozmezí K-hodnot 1,2 - 1,65 (PETG).....	65
Obrázek 51 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 (HIPS) .....	65
Obrázek 52 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0,4 - 1,25 (HIPS) .....	66
Obrázek 53 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 (PVA) .....	66
Obrázek 54 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 3,6 (PVA) .....	67
Obrázek 55 – Vzor v rozmezí K-hodnot 3,2 - 4,1 (PVA) .....	67
Obrázek 56 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, bez optimalizace (PETG).....	68
Obrázek 57 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, po optimalizaci (PETG).....	68
Obrázek 58 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PETG) .....	69
Obrázek 59 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PETG) .....	69
Obrázek 60 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PETG) .....	69
Obrázek 61 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, bez optimalizace (PETG).....	70
Obrázek 62 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, po optimalizaci (PETG).....	70
Obrázek 63 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (PETG) .....	70
Obrázek 64 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (PETG) .....	70
Obrázek 65 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (PETG) .....	71
Obrázek 66 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, bez optimalizace (HIPS) .....	71
Obrázek 67 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, po optimalizaci (HIPS) .....	71
Obrázek 68 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (HIPS).....	72
Obrázek 69 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (HIPS).....	72
Obrázek 70 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (HIPS).....	72
Obrázek 71 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, bez optimalizace (HIPS) .....	73
Obrázek 72 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, po optimalizaci (HIPS) .....	73
Obrázek 73 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (HIPS).....	73
Obrázek 74 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (HIPS).....	73
Obrázek 75 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (HIPS).....	74
Obrázek 76 – Stěna tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (HIPS).....	74
Obrázek 77 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, bez optimalizace (PVA) .....	74
Obrázek 78 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, po optimalizaci (PVA) .....	75
Obrázek 79 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PVA).....	75
Obrázek 80 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PVA).....	75
Obrázek 81 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PVA).....	75
Obrázek 82 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, bez optimalizace (PVA) .....	76

Obrázek 83 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, po optimalizaci (PVA) .....	76
Obrázek 84 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (PVA).....	76
Obrázek 85 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (PVA).....	77
Obrázek 86 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (PVA).....	77
Obrázek 87 – Stěna tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (PVA) .....	77
Obrázek 88 – Tahová zkouška PETG .....	79
Obrázek 89 – Tahová zkouška HIPS.....	80
Obrázek 90 – Tahová zkouška PVA.....	80
Obrázek 91 – Moduly pružnosti v tahu .....	81

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Charakteristika materiálu PETG Green Transparent .....	51
Tabulka 2 – Charakteristika materiálu HIPS Signal Red .....	51
Tabulka 3 – Charakteristika materiálu PVA .....	51
Tabulka 4 – Parametry tisku společné pro všechny materiály .....	57
Tabulka 5 – Parametry tisku pro dané materiály.....	58
Tabulka 6 – Hlavní nastavení společná pro všechny materiály.....	59
Tabulka 7 – K-hodnoty pro dané materiály .....	64
Tabulka 8 – Tokové vlastnosti materiálů.....	78
Tabulka 9 – Moduly pružnosti a míry elastické deformace materiálů .....	79

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ABS	Akrylonitril-butadien-styren	PA 6	Polyamid 6
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát	PA 66	Polyamid 6,6
BR	Butadienový kaučuk	PBF	Powder Bed Fusion
CAD	Computer Aided Design	PDLA	Poly D-mléčná kyselina
CNC	Computerized Numerical Control	PDLLA	Poly D- a L- mléčná kyselina
DEP	Direct Energy Deposition	PEI	Polyetherimid
DLA	Dimer D-mléčných kyselin	PET	Polyethyltereftalát
DLP	Digital Light Processing	PLA	Kyselina polymléčná
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory	PETG	Glykolem modifikovaný polyethyltereftalát
FDM	Fused Deposition Modeling	PLLA	Poly L-mléčná kyselina
FFF	Fused Filament Fabrication	PVA	Polyvinylalkohol
HIPS	Houževnatý polystyren	PVAC	Polyvinylacetát
LLA	Dimer L-mléčných kyselin	Reprap	Replication Rapid Prototyper
LOM	Laminated Object Manufacturing	SAN	Styren-akrylonitril
MFR	Hmotnostní index toku taveniny	SD	Secure Digital
MLA	Dimer L- a D- mléčných kyselin	SLA	Stereolithografie
MVR	Objemový index toku taveniny	SLM	Selective Laser Melting
NBR	Butadien-akrylonitrilový kaučuk	SLS	Selective Laser Sintering
		UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
		USB	Universal Serial Bus

## ÚVOD

3D tisk je moderní, neustále se rozvíjející technologie. Spadá pod technologii aditivní výroby a nachází uplatnění v mnoha různých oblastech. Tato technologie umožňuje vytvoření fyzických objektů z digitálních 3D modelů skládáním vrstev materiálů na sebe a spojením jednotlivých vrstev za pomoci zařízení nazývaných 3D tiskárny. Tento rozvoj se stal možným díky pokroku v oblasti počítačového modelování, materiálů a tiskových technologií, které procházejí neustále dalším vývojem.

Jednou z hlavních výhod 3D tisku je jeho schopnost vytvářet složité geometrické tvary obtížné, až téměř nemožné vyrobit jinými způsoby. Tato vlastnost umožňuje inovace v mnoha oblastech, které byly dříve limitovány standartními výrobními postupy. Aditivní výroba je také velmi flexibilní technologie, umožňující výrobu v malých sériích nebo dokonce v jednotlivých kusech, což výrazně snižuje náklady na výrobu a skladování a umožňuje i výrobu specifických, běžně nedostupných dílů, jejichž výroba standartními procesy by byla značně nákladná.

Stále větší uplatnění nachází aditivní metody v průmyslu, kde byl 3D tisk z počátku využíván zejména k rychlé tvorbě prototypů a testování nových návrhů. Nyní již aditivní procesy nachází své místo v běžné výrobě, například v leteckém či kosmickém průmyslu pro rychlou výrobu přesných dílů, či ve slévárenském průmyslu a šperkařství pro výrobu forem pro odlévání. Technologie 3D tisku nachází své uplatnění i v medicíně pro výrobu protéz a anatomicky přesných modelů pro přesnější diagnostiku.

Jak již bylo řečeno, technologie 3D tisku spadá pod aditivní metody výroby. Jedná se o rozsáhlou oblast, jejíž charakterizace je obsažena v této bakalářské práci. Tato práce bude zaměřena zejména na technologii FDM (Fused Deposition Modeling) patřící mezi nejrozšířenější technologie 3D tisku. Pojem FDM je však obchodním názvem společnosti Stratasys, proto bude v této práci využíván zejména pojem FFF (Fused Filament Fabrication). Za největší rozmach vděčí technologie FFF hnutí RepRap, vzniklém v roce 2005, které vedlo k vzestupu komerčně dostupných FFF tiskáren s cenou v řádu jednotek tisíců korun. Tato technologie využívá termoplastické materiály ve formě struny, tzv. filamenty, navinuté na cívce. U technologie FFF lze proces tisku optimalizovat řadou způsobů, jedním z nich je povolení funkce Linear Advance optimalizující vytlačování termoplastického materiálu, ve firmwaru Marlin a zjištění optimálních hodnot (tzv. K-hodnot), se kterými tato funkce pracuje, pro jednotlivé materiály.

# 1. Teoretická část

## 1.1 Technologie 3D tisku

Jako 3D tisk se rozumí automatizovaný proces, kdy se z digitální předlohy ve formě 3D modelu podle softwarového nastavení vytváří fyzický objekt. Zpravidla je to realizováno opakovaným nanášením vrstev materiálu na sebe do dosažení konečného výrobku. Jedná se o takzvanou aditivní výrobu, při které k výrobě produktu není potřeba blok materiálu, ale materiál je postupně dodáván. Velkou výhodou tohoto aditivního procesu je minimalizace odpadu. Podle toho, jaký je používán materiál a jakým způsobem se spojují jednotlivé vrstvy se aditivní procesy dělí do několika kategorií. Tyto technologie se liší jak cenou, tak i rychlostí tvorby výrobku i jeho kvalitou a následnými mechanickými vlastnostmi. Detailnější charakterizace jednotlivých kategorií aditivních procesů bude uvedena dále v kapitole 1.4. Jelikož je 3D tisk druh technologie aditivní výroby, bude v této práci používán zejména výraz „aditivní výroba“.

Aditivní výroba je poměrně rychlá a levná metoda, která se dřív používala k rychlému zhotovování prototypů, takzvaný Rapid Prototyping, jak byl i dříve označován samotný 3D tisk. Až do příchodu komerčně dostupných 3D tiskáren se 3D tisk používal výlučně k výše zmíněnému prototypingu kvůli vysoké ceně této technologie, která ji činila nedostupnou pro běžné uživatele. V současnosti je 3D tisk z velké části spojován s komunitou „kutilů“, k čemuž přispěl příchod cenově dostupných 3D tiskáren a materiálů po roce 2005, kdy vzniklo hnutí RepRap. Toto hnutí přišlo s návrhem tiskárny, která se dokáže z velké části sama replikovat, tzn. že je postavena z dílů, které jsou vytištěny na tiskárně stejného typu. Tato myšlenka vedla ke vzniku výrobců tiskáren jako Ultimaker nebo Průša Research. Druhá jmenovaná firma se sídlem v Praze tiskne plastové díly pro své tiskárny v tzv. tiskové farmě o velikosti několika stovek tiskáren (obr. 1). [1],[2],[3],[4]



Obrázek 1 – Tisková farma společnosti PrusaResearch v Praze [4]

## 1.2 Využití aditivní výroby

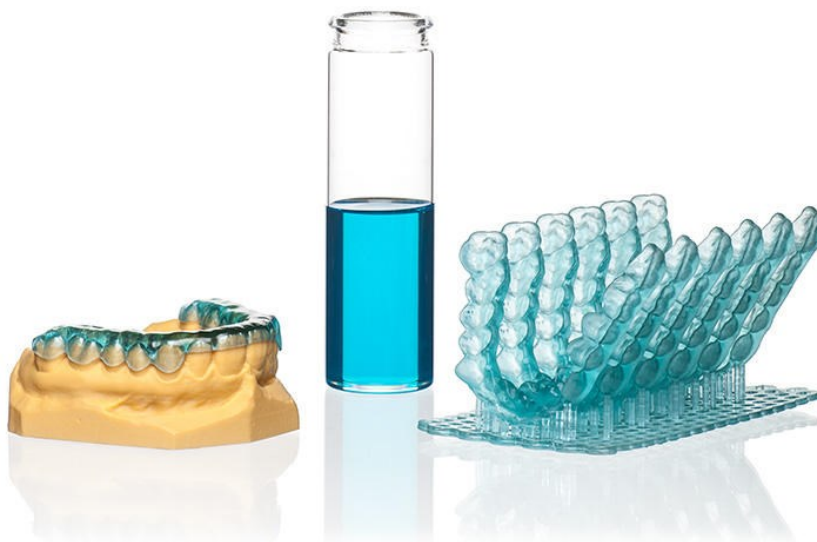
Aditivní výroba v současné době nachází využití v mnoha oblastech. Bývá používána jako nástroj k rychlé a levné výrobě prototypů, jak již bylo zmíněno, ale postupně pronikla s nástupem levnějších a dostupnějších tiskáren do mnoha odvětví. Za příklad je možné použít malosériovou výrobu. Tvorba konkrétního produktu v malém množství bývá často spojena s velkými náklady pro přípravu výroby, jako je třeba tvorba forem. U aditivní výroby formy nejsou potřeba a pokud zákazník v průběhu výroby potřebuje výrobek pozměnit, je možné změny provést relativně rychle a levně během sérií bez nutnosti vydávat vysoké náklady na úpravu či tvorbu formy pro novou verzi produktu. Stačí digitální 3D model výrobku pozměnit a dát tisknout novou sérii. Za tímto účelem vznikají tiskové farmy.

Dalším využitím aditivní výroby může být personalizovaná či zakázková výroba konkrétního produktu, kdy se může jednat o jednotlivý kus nebo malosériovou výrobu. Aditivní výrobou lze vyrobit i náhradní díly, což nachází uplatnění pro výrobu již nedostupných dílů například pro veterány či staré spotřebiče. Německý železniční dopravce Deutsche Bahn využívá technologii aditivní výroby ke zhotovování náhradních dílů pro své starší lokomotivy (obr. 2). Běžně se náhradní díly objednávají po velkých sériích, což vede k dlouhému čekání v případě chybějících dílů. Díky aditivní výrobě je možné zhotovit i jeden samostatný díl a doba čekání se tak podstatně zkracuje z několika týdnů či měsíců na několik hodin až dní. [1],[2],[3]



Obrázek 2 – Náhradní díl pro lokomotivu zhotovený aditivní technologií [5]

Stále více proniká aditivní výroba i do zdravotnictví. Pomocí technologie SLS, jedné z technologií aditivní výroby (viz. kapitola 1.4.2), jsou zhotovovány například lebeční či kyčelní implantáty. Na poli stomatologie může být aditivní výroba použita k výrobě zubních implantátů či k léčbě některých ortodontických vad, například za použití „neviditelných“ rovnátek vyrobených na základě digitálního 3D skenování chrupu pacienta. Tato rovnátka vyrábí společnost Invisalign (obr. 3). [6]



*Obrázek 3 – Rovnátka společnosti Invisalign [6]*

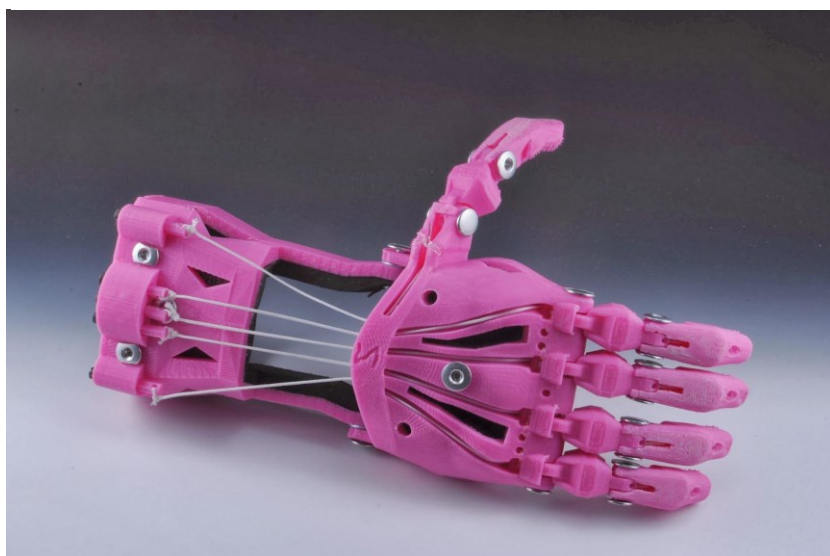
Velkým vývojem prochází výroba protéz nahrazujících lidskou končetinu pomocí aditivních metod. Často se jedná o umělou nohu, ale postupně se rozšiřuje i výroba protéz nahrazujících ruce či jen prsty. Výhodou je nižší cena a možnost navrhnout protézu pacientovi přímo na míru a dle jeho přání. Je i mnoho „ kutilů“, kteří navrhují protézy pro sebe či své blízké a proces dokumentují na internetu. Ukázka protéz zhotovených aditivními metodami je na obrázcích 4 a 5. [7],[8]

V poslední době dochází k využívání 3D tisku například i ve stavebnictví či architektuře. Architekt je schopen na počítači vytvořit 3D model domu, který je poté možné pomocí aditivních metod poměrně levně a rychle vyrobiť (v řádu hodin až dní) a umožnit tak klientovi lépe se orientovat v architektonickém návrhu (viz. obr 6). [2]





Obrázek 4 – Kryt protézy zhotovený technologií FFF [9]



Obrázek 5 – Protéza zhotovená technologií FFF [10]



Obrázek 6 – Model domu zhotovený podle architektonického návrhu [2]

### 1.3 Výhody a nevýhody aditivní výroby

Mezi největší výhody aditivní výroby patří minimalizace odpadu. Je to téměř bezodpadový proces, kdy je spotřebováno materiálu jen tolik, kolik je potřeba na zhotovení výrobku. Případný odpad je tvořen podporami, které je nutno přidat, jelikož 3D tiskárna neumí tisknout do volného prostoru, či nepovedenými výrobky. U FFF tiskáren je další odpad tvořen tzv. „skirtem“. Jako skirt se rozumí obtažení tištěného výrobku na podložce kolem dokola o výšce jedné vrstvy a šířce přibližně 2-3 linky. Skirt slouží k vytyčení tiskového prostoru a ověření optimální přilnavosti nanášeného materiálu k podložce. Skirt slouží také k ověření, zda je roztavený materiál dávkován z trysky na podložku správně a plynule a zda je tryska v ideální vzdálenosti od podložky.

Velkou výhodou je i možnost tisku více objektů najednou či střídání toho, jaké produkty jsou na tiskárně vyráběny. Jak již bylo zmíněno výše, u 3D tiskárny odpadá potřeba vyrábět formu, vše je řízeno softwarem. Stačí změnit digitální 3D model a dát tisknout. U 3D tisku, například u technologie SLA či SLS, je také možné zhotovit velice detailní objekty v rámci setin mm.

Existuje však i řada nevýhod spojených s touto technologií. Aditivní výroba je časově poměrně náročný proces. V závislosti na velikosti a požadované kvalitě zhotovovaného objektu může tisk trvat i několik desítek hodin. Dobu tisku je možné upravit rychlostí či tloušťkou nanášené vrstvy. Toto se však promítne na vzhledu objektu. Při vyšší výšce vrstvy budou jednotlivé vrstvy více zřetelné. U vyšší rychlosti zase může být problém s dávkováním materiálu. Tento nedostatek je v určitých případech možné částečně vyřešit optimalizací.

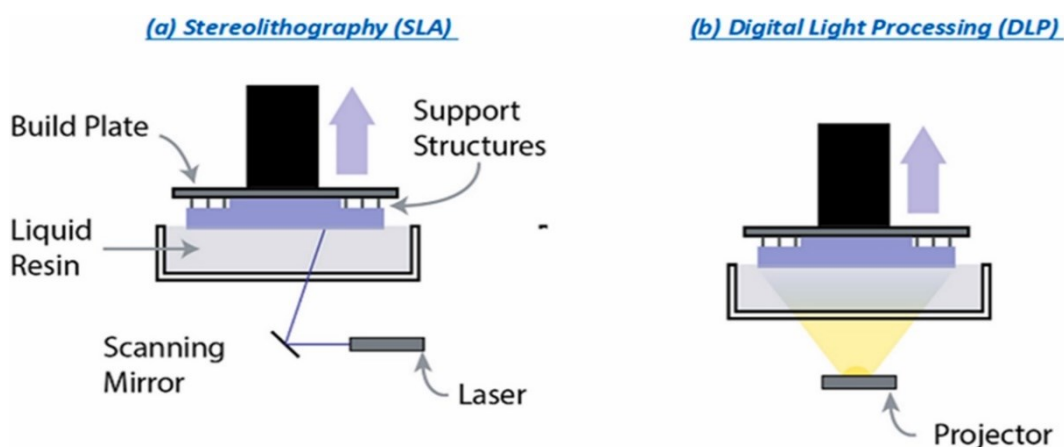
Dalším z velkých problémů aditivních metod výroby jsou převisy a tisk úhlů. Proces aditivní výroby je založen na vrstvách a 3D tiskárna tak nedokáže začít další vrstvu v prázdném prostoru. Každá vrstva musí mít nějaký podklad či podporu. Problém pro tiskárnu tvoří i úhly větší než 120°. Toto lze však vyřešit pomocí podpor v režimu support, které je možné vytvořit automaticky v programu pro přípravu tisku – sliceru. Tyto podpory podrží převis a po odejmutí dokončeného výrobku z tiskárny je možné je odstranit. Tím však vzniká odpad a místa, kde docházelo ke styku podpor s výrobkem, mohou mít estetické vady. Z tohoto důvodu je vhodné během přípravy tisku natočit objekt pomocí rotace tak, aby nevznikl převis či bylo třeba co nejmenší množství podpor. Případně lze digitální 3D model rozřezat na více dílů, které podpěry nepotřebují, a díly následně slepit. To však závisí na konkrétním výrobku a požadovaných vlastnostech. [1],[2]

## 1.4 Kategorizace technologií aditivní výroby

V současnosti existuje několik komerčně využívaných technologií aditivní výroby. Všechny fungují na stejném principu – postupném nanášení materiálu po vrstvách, liší se však vstupní materiál. Dle požadovaných vlastností konečného produktu je důležité správně zvolit metodu tisku. Neexistuje univerzální metoda, která by byla vhodná pro všechna použití, některé metody jsou vhodnější díky použitému materiálu, některé díky mechanickým vlastnostem konečného produktu vycházejících z výrobního procesu. Vždy záleží na aplikaci. Společnost ASTM International rozděluje metody aditivní výroby do následujících kategorií. [1],[11]

### 1.4.1 Vat Photopolymerization (Vaničková fotopolymerace)

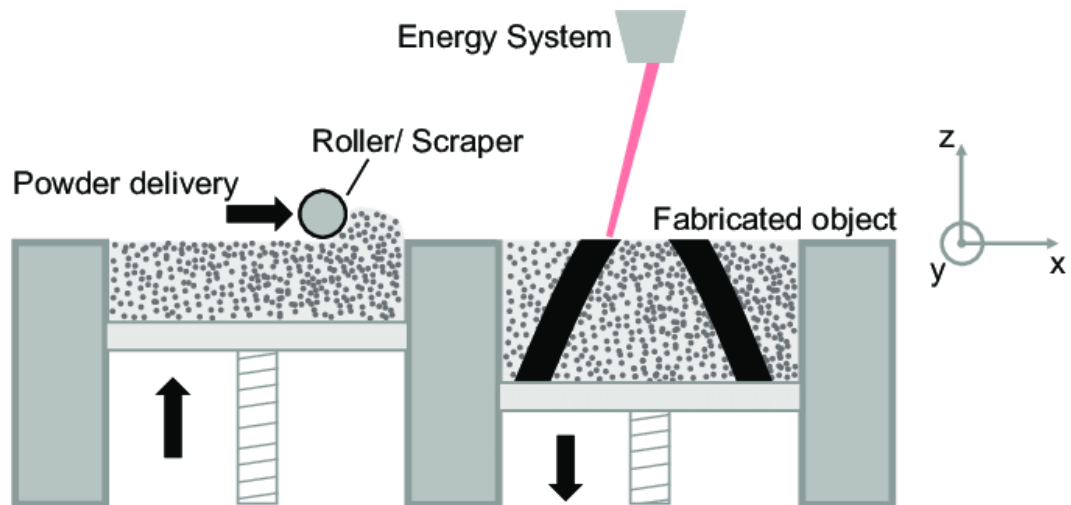
Jako Vat Photopolymerization jsou označovány technologie, které zahrnují stereolitografii a související procesy. Stereolitografie je proces fotopolymerace ve vaničce, kde je materiál v kapalném stavu vytvářen po vrstvách v předem definované oblasti, zpravidla pomocí světla. Podložka je během toho ponořena v kapalném materiálu a po vytvrzení vrstvy se posune o jednu vrstvu výše směrem z vaničky. Další vrstva je vytvrzena na předchozí a celý proces se opakuje. Průmysly používané v této technologii obsahují celou řadu reaktivních monomerů a oligomerů a dalších sloučenin, jako jsou různá aditiva a fotoiniciátory, které umožňují fotopolymeraci. Polymer musí při vytvrzení dostatečně zesíťovat, aby nedošlo k jeho opětovnému rozpuštění ve směsi kapalných monomerů. Mezi nejčastěji využívané technologie Vaničkové fotopolymerace patří technologie SLA, kdy dochází k fotopolymeraci materiálu za použití UV laseru, nebo technologie DLP využívající projektor, který promítne obrázek celé vrstvy najednou. Schéma těchto technologií je zobrazeno na obrázku 7. [1],[11],[12]



Obrázek 7 – Technologie SLA a DLP [12]

### 1.4.2 Powder Bed Fusion

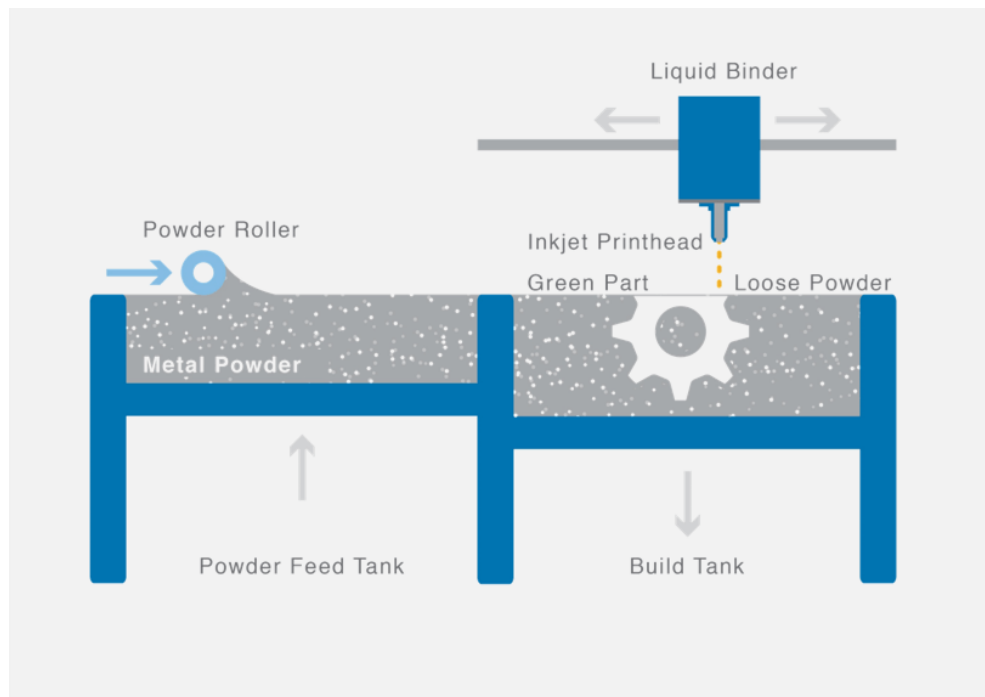
Technologie PBF (Powder Bed Fusion) je proces aditivní výroby, při kterém je využíván vysokoenergetický zdroj, jako je například laser či elektronový proud. Při tomto procesu je materiál ve formě monodisperzního prachu (plast či kov) částečně či zcela roztaven a částice prášku jsou spečeny dohromady. Následně je nanесena další vrstva prášku a celý proces se opakuje. Příkladem prvního procesu je technologie SLM (Selective Laser Melting). Druhý zmiňovaný proces je označován jako sintrování. Pod tuto metodu spadá například technologie SLS (Selective Laser Sintering). Schéma technologie PBF je znázorněno na obrázku 8. [1],[11],[13]



Obrázek 8 – Technologie Powder Bed Fusion [13]

### 1.4.3 Binder Jetting

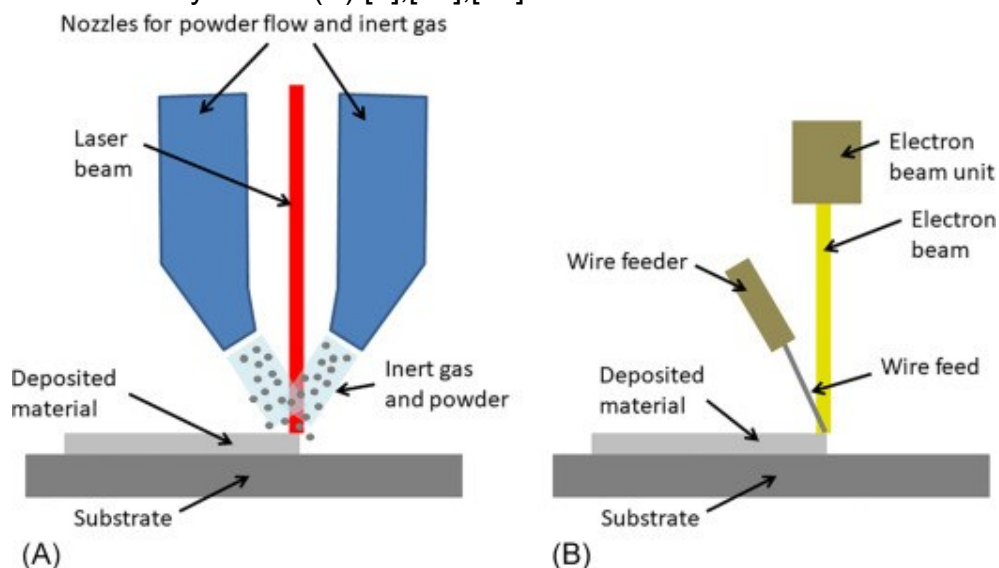
Další technologií pracující s práškovým materiálem je Binder Jetting. Schéma této technologie je znázorněno na obrázku 9. Technologie Binder Jetting je založena na procesu, kdy tisková hlava nanáší na tenkou vrstvu práškového materiálu spojovací přípravek, který slepí prášek do požadovaného tvaru. Podložka s práškem se po dokončení vrstvy posune o vrstvu dolů a na slepenou vrstvu je nanесena další vrstva prášku, na kterou je opět hlavou nanášen spojovací přípravek. Vrstvy jsou slepeny dohromady do vzniku 3D objektu. Po dokončení procesu je objekt očištěn a nespotebovaný prášek může být použit pro další tisk. Při tomto procesu není potřeba teplo, čímž se zásadně liší od ostatních procesů. Velkou výhodou je i absence nutnosti tisku podpor, neboť nespečený prášek slouží jako podpora, či vysoká rychlost tisku. Při této metodě lze zhotovit výrobek z kovu, písku, skla, keramiky či polymeru. [1],[11]



Obrázek 9 – Technologie Binder Jetting [14]

#### 1.4.4 Direct Energy Deposition

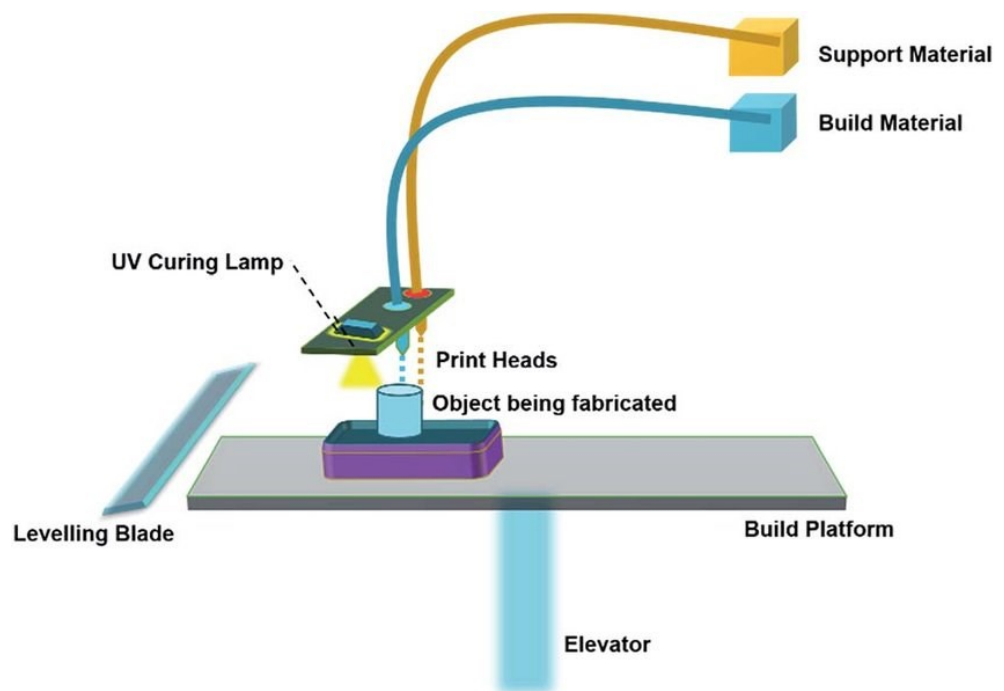
Jedná se o jednu z metod aditivní výroby, která je využívána zejména ke zpracování kovů. Při tomto procesu je využívána robotická ruka a tiskový aparát s tryskou a zdrojem energie. Jako zdroj energie lze použít laser s vysokým výkonem, elektronový paprsek či plazmový oblouk. Zvolený zdroj energie je zaměřen na kontinuální kovový drát či proud prášku, který je pomocí energie roztaven a nanášen na substrát. Na obrázku 10 je znázorněna technologie DEP využívající laser a proud prášku (A) a technologie DEP využívající elektronový paprsek a kovový drátek (B) [1],[11],[15]



Obrázek 10 – Technologie DEP [15]

#### 1.4.5 Material Jetting

Tento proces spočívá v tom, že tekutý materiál je aplikován ve formě kapiček skrz trysku o malém průměru na pracovní podložku. Aplikovaný materiál částečně změkčí dříve nanesený materiál a následně je ihned vytvrzen pomocí UV záření. Po aplikaci vrstvy materiálu je podložka posunuta o výšku jedné vrstvy níže a nová vrstva je aplikovaná na dříve nanesenou vrstvu. Tato technologie se vyznačuje vysokou rychlostí výroby a přesností zhotovovaných dílů, je však poměrně nákladná. Na obrázku 11 je zobrazen proces technologií Material Jetting. [1],[11],[16]

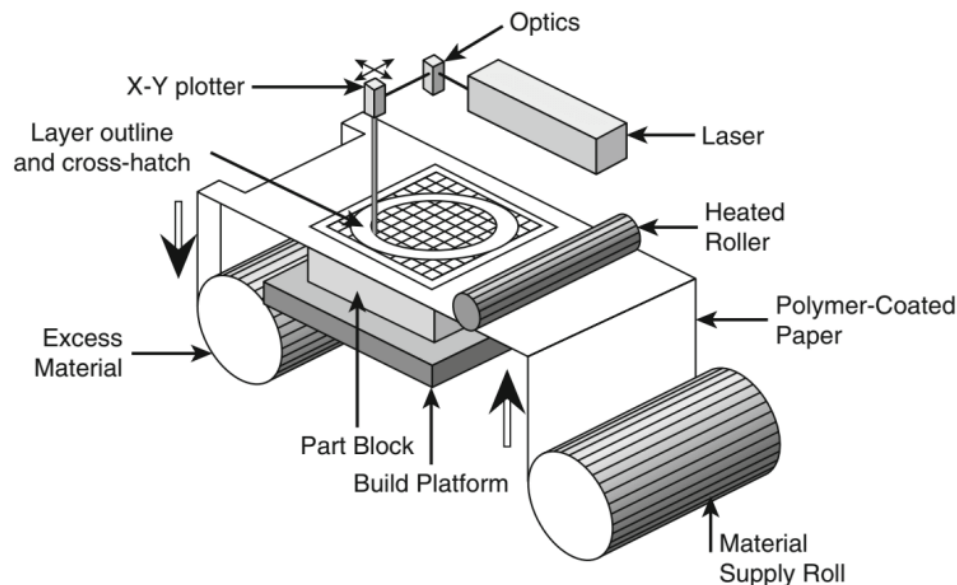


Obrázek 11 – Proces aditivní výroby technologií Material Jetting [17]

#### 1.4.6 Sheet Lamination

Procesy Sheet Lamination se nejčastěji dělí do dvou kategorií, a to Laminated Object Manufacturing (LOM) a Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM). Obecně Sheet Lamination spočívá v tom, že pláty materiálu jsou spojeny dohromady za využití vnější síly a z takto spojených plátů je následně vyřezán požadovaný výrobek. Každý z plátů může být při průřezu považován za jednu vrstvu. Při technologii LOM můžou být pláty spojeny pomocí lepení, tepelného spojení či pomocí upnutí svorkami. Pro UAM je charakteristické ultrasonické svařování plátů materiálu, zejména kovu, a opracovávání pomocí CNC frézy. Proces Sheet Lamination je zobrazen na obrázku 12. [1],[11],[18]

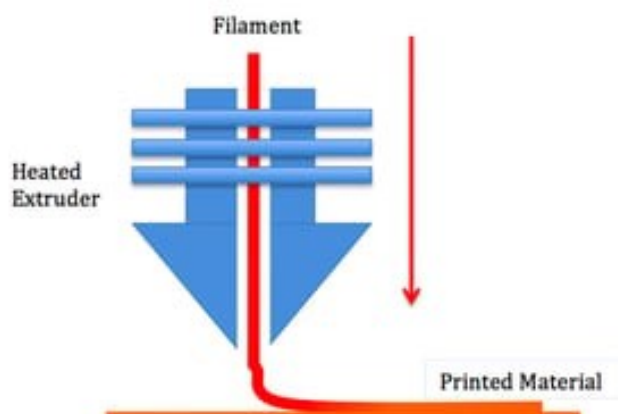




Obrázek 12 – Proces Sheet Lamination [18]

#### 1.4.7 Materiálová extruze

Jako materiálová extruze se označuje proces aditivní výroby, při kterém dochází k extruzi (vytlačování) materiálu skrz nahřátou tiskovou hlavu s tryskou. Po průchodu tryskou se vytlačovaný materiál usazuje na substrátu a zcela tuhne. Pro správný průběh výroby je nutné, aby se vytlačovaný materiál zcela spojil s předchozí vrstvou materiálu a vytvořil jednolitý kus a výrobek si tak zachoval svou soudržnost. V opačném případě hrozí oddělení jednotlivých vrstev, což může vést až k nepoužitelnosti zhotovovaného objektu. Pod tento proces aditivní výroby spadá velice rozšířená technologie 3D tisku, technologie FDM (Fused Deposition Modeling)/ FFF (Fused Filament Fabrication). Oba tyto názvy jsou synonyma, pojem FDM je však registrovaná obchodní značka firmy Stratasys. Technologie FFF je zobrazena na obrázku 13. [1],[3],[11]

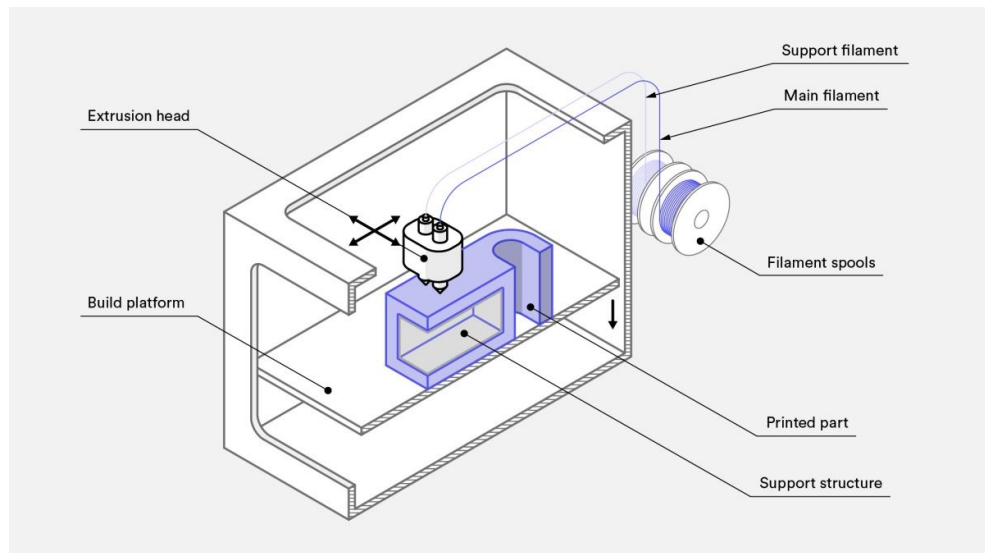


Obrázek 13 – Materiálová extruze [19]

Tato práce bude zaměřena na technologii FFF. Její princip a konstrukce FFF tiskáren bude více popsána dále.

## 1.5 Technologie FDM/FFF

FDM (Fused Deposition Modeling) nebo FFF (Fused Filament Fabrication) je metoda aditivní výroby, kdy je materiál protlačen skrz trysku a dávkován na podložku vrstvu po vrstvě za vzniku 3D objektu. Tato technologie využívá termoplastický materiál navinutý na cívce – takzvaný filament (tisková struna), mezi nejpoužívanější patří PLA, ABS či PETG o průměru 1,75 mm. Filament je tlačěn skrze nahřátou trysku, kde je roztaven a ve formě roztaveného plastu je po vrstvách dávkován na tiskovou podložku. Po dokončení vrstvy je další vrstva nanášena na již stávající (podložka se posune níže či tisková hlava výše o výšku jedné vrstvy) a vrstvy se následně spojují a tuhnou. Toto se opakuje až do vzniku konečného fyzického objektu. Na obrázku 14 je zobrazeno schéma běžné tiskárny technologie FFF.



Obrázek 14 – Jednoduché schéma běžné FFF tiskárny [20]

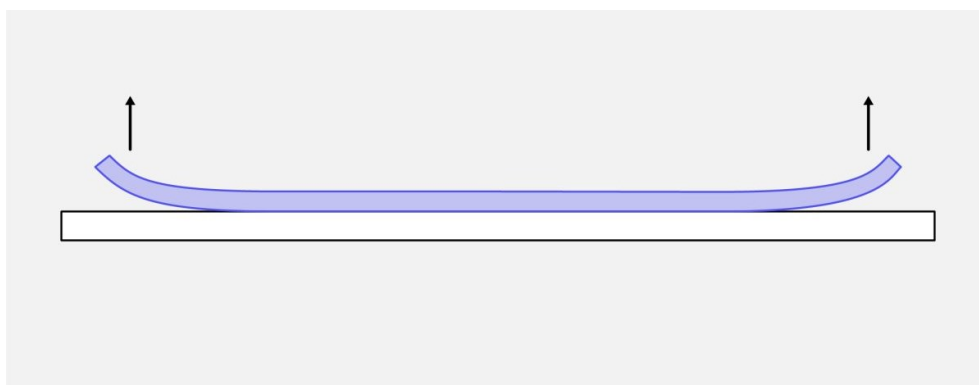
Tisková podložka a tryska jsou vyhřívány na teploty, které závisí na použitém termoplastickém materiálu. Je vhodné teplotu trysky zvolit větší než je teplota tečení  $T_f$  použitého termoplastu. Důvodem je snížení viskozity taveniny polymeru, což zjednodušuje dávkování plastu během tisku. Z důvodu dobrého přilnutí materiálu k tiskové podložce je teplota podložky nastavena přibližně na teplotu skelného přechodu  $T_g$  tiskovaného materiálu. Při nedostatečném přilnutí hrozí odlepení zhotovovaného objektu z podložky a následné selhání tisku. Pro materiály s nízkým koeficientem tepelné roztažnosti je vhodné používat chlazení vytlačovaného materiálu během tisku, které zaručuje přesnější tvar zhotoveného objektu díky rychlejšímu ztuhnutí taveného filamentu. Pokud však mají materiály



koeficient tepelné roztažnosti větší, zapříčiní rychlejší chlazení větší míru vnitřního pnutí. Toto pnutí může vést až k zdeformování tištěného výrobku.

Oproti technologiím využívajícím kapalný či práškový materiál je velkou výhodou technologie FFF využívající filament její bezpečnost a jednoduchost. Práce s filamentem je čistší a jednodušší, než práce s kapalinou či práškem, kdy je často potřeba neustále čistit zařízení i jeho okolí.

U technologie FFF se vyskytují problémy typické pro aditivní výrobu, jako je problém tisku převisů a nutnost podpěr. Tyto problémy byly popsány výše u charakterizace technologie aditivní výroby. U technologie FFF se však objevují další problémy, které souvisí s teplotní roztažností polymerů. Nejzásadnější z těchto problémů je označován jako „warping“ (obr. 15). Jde o to, že po vytlačení materiálu z trysky a následném chlazení dochází ke smršťování materiálu. Vlivem toho, že různé části tištěného objektu chladnou různou rychlostí, se jejich rozměry také mění různou rychlostí, nikoli konstantně. Kvůli těmto rozdílům dochází k vnitřnímu pnutí, které tlačí předcházející vrstvu směrem nahoru, čímž vzniká deformace zhotovovaného objektu. Nejvýraznější tato deformace bývá v rozích zhotovovaného výrobku, které se vlivem warpingu mohou odlepit od podložky. [1],[20],**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**[21]

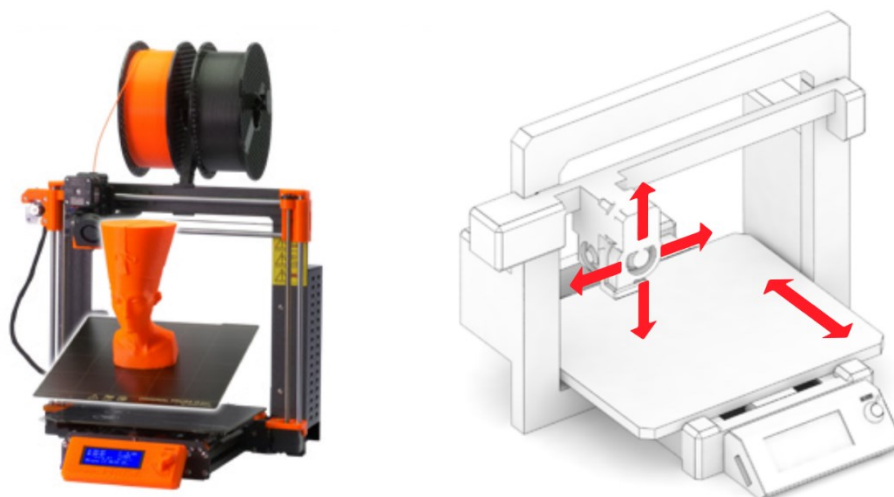


Obrázek 15 – Warping [20]

### 1.5.1 Typy FFF tiskáren

FFF tiskárny lze dle konstrukce dělit na kartézské, coreXY, Delta a Polar.

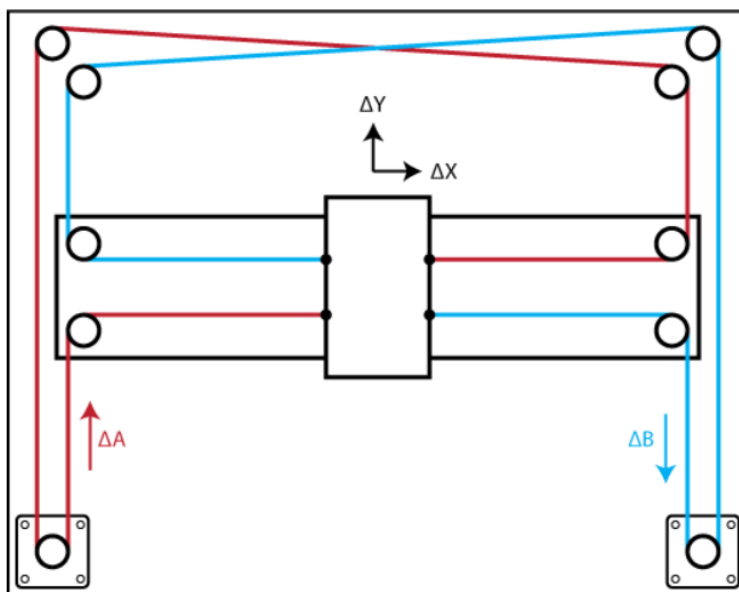
Pro kartézské tiskárny (obr. 16) je typické to, že mají alespoň 3 motory, které pohybují částmi tiskárny podle kartézského souřadnicového systému. Tedy osa Y je dopředu a dozadu a souvisí s pohybem tiskové podložky, osa X posouvá tiskovou hlavu doprava a doleva a osa Z nahoru a dolů. Osy X a Y tedy stanovují souřadnice pro tisk v jedné vrstvě tištěného objektu a osa Z zajišťuje po dokončení vrstvy následný posun o vrstvu výše. Pohyb jednotlivých os je na sobě vzájemně nezávislý. Tento systém je nejjednodušší a nejlevnější, proto je většina komerčně dostupnějších tiskáren tohoto typu. Mezi nevýhody kartézských tiskáren patří to, že kvůli větší hmotnosti os X a Y (u osy Y hmotnost ještě roste s průběhem tisku) se při vyšších rychlostech tisku snižuje tisková kvalita. Vlivem pohybu podložky dopředu a dozadu také potřebuje více prostoru během tisku než když netiskne. Tyto problémy řeší konstrukce coreXY.



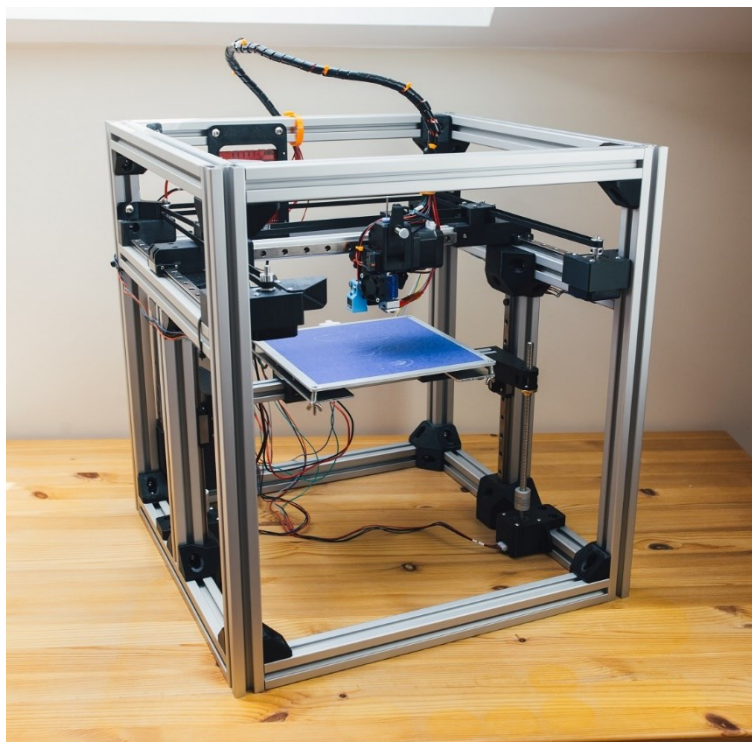
Obrázek 16 – Tiskárna kartézské konstrukce [22]

Tiskárny konstrukce coreXY mají stejně jako kartézské tiskárny osy X, Y a Z. Osa Z opět souvisí s posunem nahoru a dolů, osa X doprava a doleva a osa Y dopředu a dozadu. Rozdíl je však oproti kartézské konstrukce takový, že zde je pohyb os X a Y navzájem závislý a řídí pohyb tiskové hlavy. Toto je dáno charakteristickým designem řemenů os X a Y a jejich způsobem pohybu pro coreXY tiskárny. Dalším rozdílem oproti kartézské je i to, že při pohybu po ose Z se neposouvá hlava nahoru a dolů, ale samotná tisková podložka. Velkou výhodou coreXY tiskáren je rozložení hmotnosti tiskové hlavy na 2 osy X a Y, díky tomu není kvalita tisku tolik snížena s rostoucí rychlostí jako u kartézských tiskáren. Není také rozdíl v prostoru, který zabírá tiskárna během tisku a vypnutá tiskárna, jelikož tisková podložka se pohybuje nahoru a dolů a nikoliv dopředu a

dozadu. Kvůli designu os X a Y však musí být řemeny mnohem delší než u kartézských tiskáren, a s tím souvisí i náročnější konfigurace. Schéma designu os X a Y konstrukce coreXY je zobrazeno na obrázku 17. Složitější konstrukce ztěžuje případné opravy. Tisk je také více ovlivněn případnými vadami v konstrukci, rám musí být perfektně kolmý a poměrně hodně stabilní. Křivý či nestabilní rám by, zejména při vyšší rychlosti tisku, vedl k velkým vadám na zhotovovaném výrobku. Na obrázku 18 je zobrazena tiskárna konstrukce coreXY.

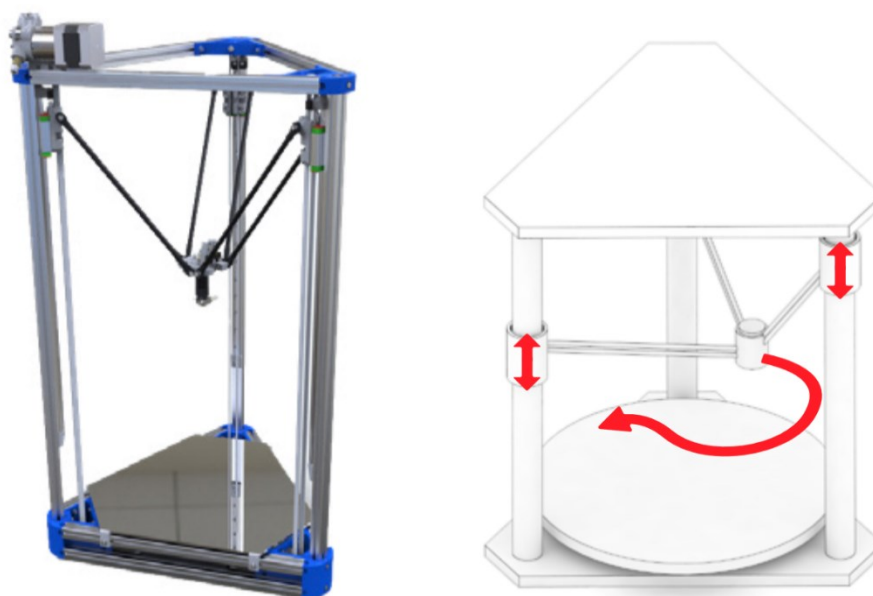


Obrázek 17 – Schéma coreXY konstrukce v osách X a Y [22]



Obrázek 18 – FFF tiskárna konstrukce coreXY [23]

Dalším typem FFF tiskáren jsou tiskárny konstrukce Delta (obr. 19). Tyto tiskárny se výrazně liší od kartézských tiskáren či coreXY. Tisková podložka se nepohybuje a pohyb v osách X, Y, Z je řízen 3 motory, které navzájem spolupracují. Každý z těchto motorů ovládá jedno rameno. Na každém sloupu je jedno rameno a tato ramena jsou navzájem spojena a dohromady pohybují tiskovou hlavou. Tato ramena držící hlavu jsou uspořádána do tvaru trojúhelníku, odkud pochází název samotného typu tiskárny – delta jako  $\Delta$ . Velkou výhodou těchto tiskáren je vysoká rychlost tisku, které je dosaženo díky nízké hmotnosti tiskové hlavy a 3 motorům, které s tiskovou hlavou pohybují. Pohyby v osách tiskárny této konstrukce jsou spojeny se složitými výpočty, což vedlo k osvojení 32-bitových systémů. S touto konstrukcí však souvisí i řada nevýhod. Tisková plocha delta tiskáren je poměrně malá a většinou kruhová, což omezuje možnou velikost tištěných dílů. Vysoká rychlost tisku je dána konstrukcí. Malý pohyb táhla způsobí velký pohyb tiskové hlavy. Vlivem složité konstrukce je náročnější údržba a případné opravy a náhradní díly jsou hůře dostupné a poměrně drahé.



Obrázek 19 – FDM tiskárna konstrukce Delta [22]

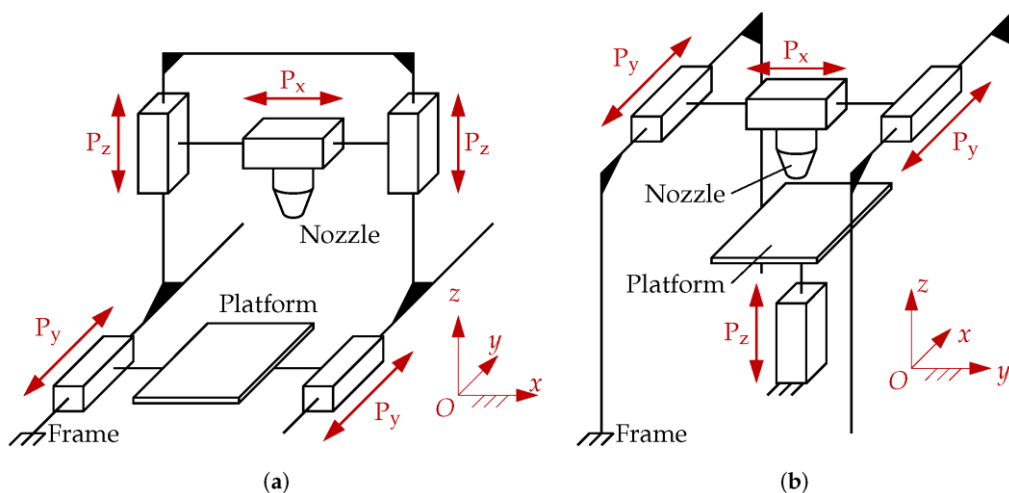
Posledním uvedeným typem je tiskárna konstrukce Polar (obr. 20). Tyto tiskárny nepoužívají kartézský systém souřadnic, ale polární systém souřadnic. V tomto systému jsou jednotlivé body určeny vzdáleností a úhlem vztažených k určenému centrálnímu bodu. Tisková podložka se může pohybovat do stran a rotovat, zatímco tisková hlava se pohybuje pouze nahoru a dolů. Výhodou těchto tiskáren je že v porovnání s velikostí tiskárny poskytují poměrně velkou tiskovou plochu. Jsou také ideální pro tisk kruhových objektů. Tento typ tiskáren je však stále ve vývoji a není moc rozšířený. [22],[24],[25]



Obrázek 20 – FFF tiskárna konstrukce Polar [22]

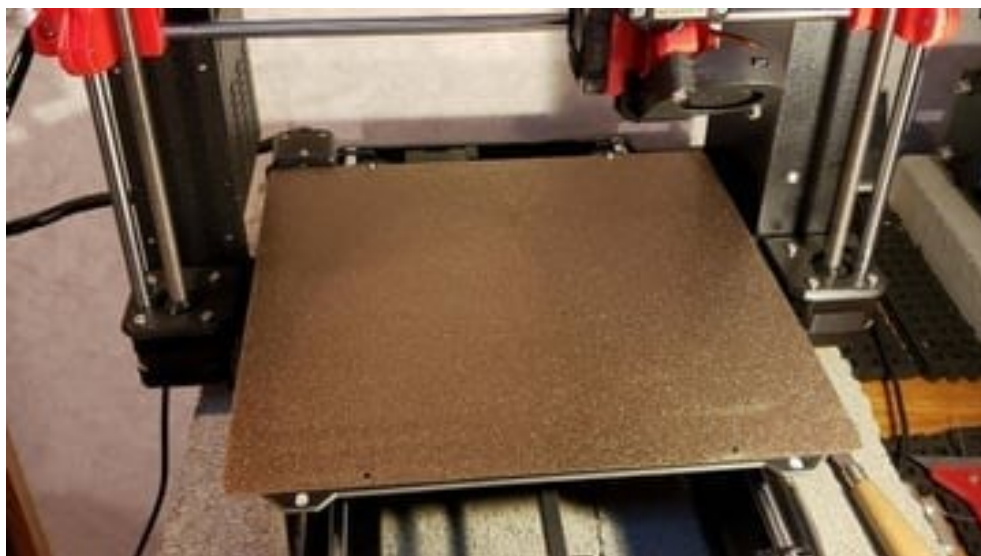
### 1.5.2 Popis částí FFF tiskárny

Základem FFF tiskáren je rám, který umožňuje podložce a tiskové hlavě pohyb v osách X, Y, Z nezávisle na sobě. Architektura kartézské konstrukce může být buď XZ-hlava či XY-hlava, podle způsobu pohybu jednotlivých os. U architektury typu XZ-hlava se tisková hlava pohybuje v ose X a Z a tisková podložka v ose Y, u konstrukce XY-hlava dochází k pohybu tiskové hlavy v osách X a Y a tisková podložka se pohybuje v ose Z. Rám u XZ-hlava architektury připomíná při pohledu ze strany obrácené písmeno T, rám pro XY-hlava architekturu bývá stylu kostky. Pohyb po jednotlivých osách může být zajištěn pomocí lineárního vedení či koleček a pomocí řemenů, po ose Z bývá zpravidla pohyb veden přes závitovou tyč. Jednotlivé rámy jsou zobrazeny na obrázku 21. FFF tiskárna, na které byla provedena optimalizace v rámci této bakalářské práce, je tiskárna kartézské konstrukce typu XY-hlava. Na obrázku 21 jsou znázorněny kartézské konstrukce typu XZ-hlava a typu XY-hlava. [26],[27],[28]



Obrázek 21 – Kartézská konstrukce typu XZ-hlava (a) a typu XY-hlava (b) [27]

Na rámu je uchycena tisková podložka, na kterou je vrstvu po vrstvě nanášen materiál za vzniku zvoleného objektu. Jako tiskový povrch bývá nejčastěji zvolena skleněná deska či plát s práškovým PEI povrchem (obr. 22). Pro zlepšení přilnutí tisknutého materiálu se na skleněnou podložku často aplikují různé adhezni přípravky. Tisková podložka je dále tvořena topným tělesem a termistorem. Tyto části udržují námi nastavenou teplotu podložky pro optimální tisk. [29],[30],[31]

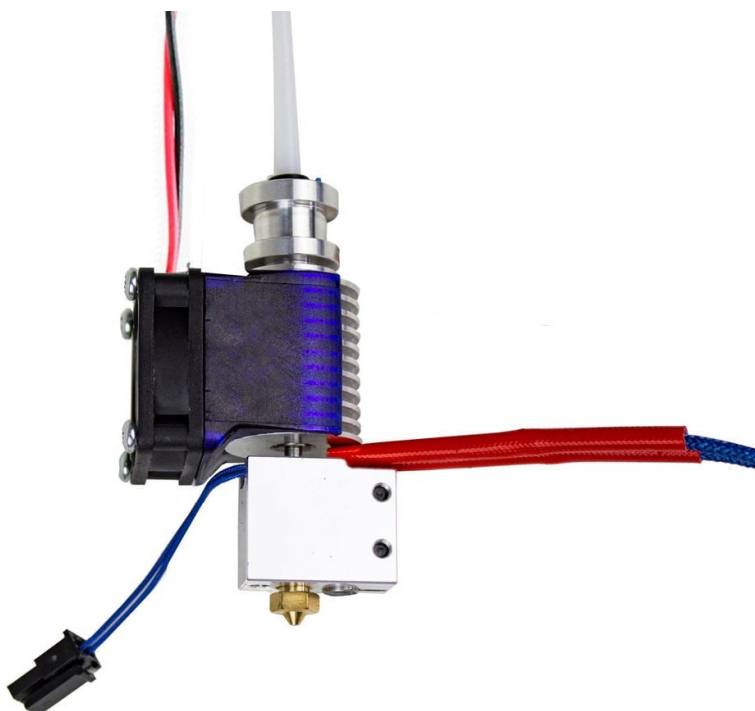


Obrázek 22 – Tisková podložka s práškovým PEI povrchem [30]

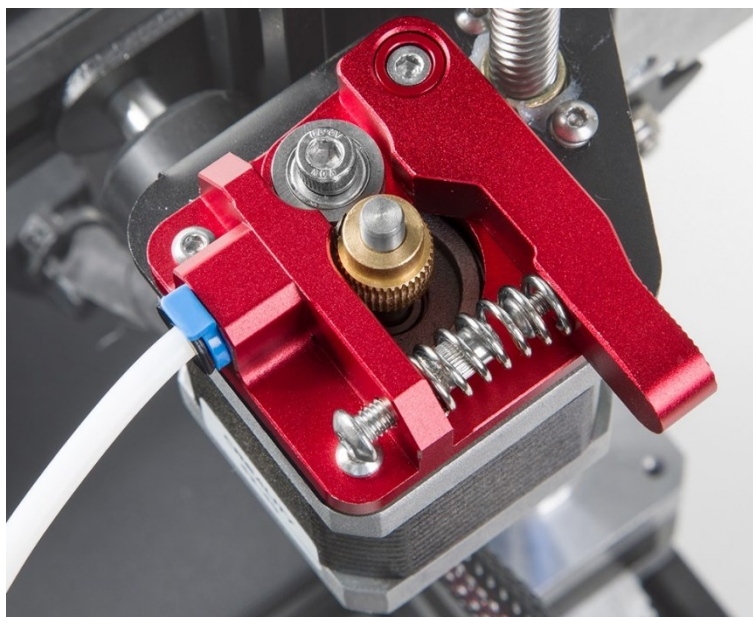
Materiál je na tiskovou podložku nanášen pomocí extruderu. Je to místo, kam je termoplastický materiál natlačen, roztaven a následně vytlačen na tiskovou podložku. Extruder se skládá ze dvou částí, tzv. „hotend“ a „coldend“. Jako hotend se označuje část extruderu, kde dochází k roztavení materiálu a následnému vytlačení tryskou. Pojmeme coldend se označuje ta část extruderu, která má na starosti dávkování materiálu do hotendu, čehož je dosahováno motorem s ozubeným kolečkem, který posouvá tiskovou strunu. Podle vzájemného umístění hotendu a coldendu existují dva typy extruderů, tzv. „direct extruder“ a „bowden



extruder“. Jako direct extruder se označuje takový extruder, kdy jsou hotend a coldend umístěny těsně u sebe. Tedy že materiál putuje skrz coldend přímo do hotendu. Naproti tomu u extruderu typu bowden jsou hotend a coldend umístěny dál od sebe a jsou propojeny teflonovou trubičkou. Tisková struna je tedy tlačena pomocí motoru coldendu skrz teflonovou trubičku do hotendu, kde je materiál roztaven a vytlačen skrz trysku. Výhodou extruderu typu bowden je nižší hmotnost tiskové hlavy, což umožňuje vyšší rychlosti pohybu. Oproti „direct“ provedení je dávkování materiálu u extruderu typu bowden méně přesné a poměrně problémové je použití flexibilních filamentů kvůli jejich deformaci uvnitř teflonové trubičky. Vyhřívání a udržování požadované teploty hotendu je zajištěno pomocí topného tělesa a termistoru obdobně jako u tiskové podložky. Na obrázku 23 je hotend osazený větrákem a s teflonovou trubičkou pro typ extruderu bowden. Obrázek 24 zobrazuje coldend s krokovým motorem. Jak tedy vyplývá, extrudery využívané technologií FFF se liší oproti průmyslovým extruderům určeným k vytlačování materiálů, které využívají šneky. [26],[27],[32]



Obrázek 23 – "Hotend" [33]



Obrázek 24 – "Coldend" [34]

Zásadní vliv na vzhled zhotovovaného objektu má tryska. Jedná se o vysoustružený kus kovu se závitem a malým otvorem na konci. Velikost otvoru určuje minimální a maximální výšku a také určuje šířku vrstvy, která bývá zpravidla stejná jako velikost otvoru trysky. Nejčastěji je používána tryska s otvorem 0,4 mm. Pro rychlejší tisk je možné zvolit trysku s větším otvorem, například 0,6 či 0,8 mm. Volba většího otvoru však vede ke ztrátě detailů na zhotovovaném výrobku oproti tryskám s nižším průměrem. Různé druhy trysek jsou zobrazeny na obrázku 25. Jedním z nejčastějších závad během tisku bývá ucpání trysky, ty s menším průměrem jsou k ucpání náchylnější než ty s větším průměrem. Při používání filamentů, které obsahují abrazivní částice, je trysku třeba častěji měnit, neboť dochází k rychlejšímu opotřebení a zvětšení průměru trysky. [35]



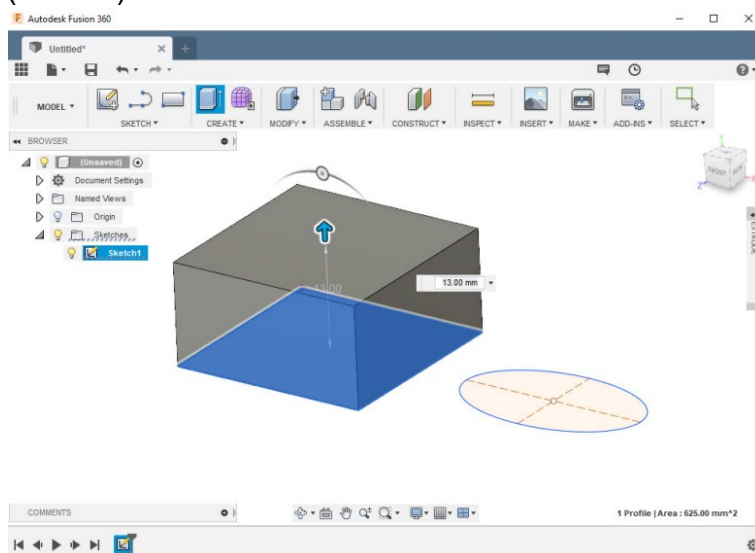
Obrázek 25 – Různé druhy trysek [36]



Samotný tiskový proces je řízen pomocí základní desky, na které běží firmware ovládající tiskárnu. U FFF tiskáren patří mezi nejpoužívanější firmware Marlin. Více bude rozebrán v kapitole 1.6. Tiskárna je tvořena mnoha dalšími součástkami, které zabezpečují správný a přesný chod či chlazení. Podrobnější rozbor konstrukce by však byl nad rámec této bakalářské práce. [26]

### 1.5.3 Proces tisku technologií FFF

Prvním krokem k tisku je 3D model objektu, který chceme vyrobit. Existuje několik způsobů, kterými lze model požadovaného objektu získat, nejběžnějším způsobem je jeho tvorba v grafických programech na počítači. Tyto programy jsou označovány jako CAD (Computer Aided Design) a je v nich možné tvořit 2D či 3D objekty. Lze vymodelovat jakýkoliv objekt, i objekty velice složitého tvaru. V současné době existuje mnoho programů, ať už registrovaných či open-source a mezi neznámější patří program Fusion 360 společnosti Autodesk, či open-source software Blender. Pro tuto práci byl použit výše zmíněný software Fusion 360 (obr. 26).



Obrázek 26 – Prostředí programu Fusion 360 [2]

Druhým způsobem tvorby digitálního modelu zahrnuje využití reverzibilního inženýrství nasnímáním již existujícího výrobku pomocí 3D skeneru. Při skenování je objekt nasnímán ze všech úhlů a data jsou následně složena dohromady v programu za vzniku 3D digitálního modelu. Tento model po skenování je však často nutné dopravit v programu, neboť se na něm mohou vyskytnout různé vady, způsobené nedokonalostí procesu skenování, které by se promítly do finálního vzhledu výrobku.

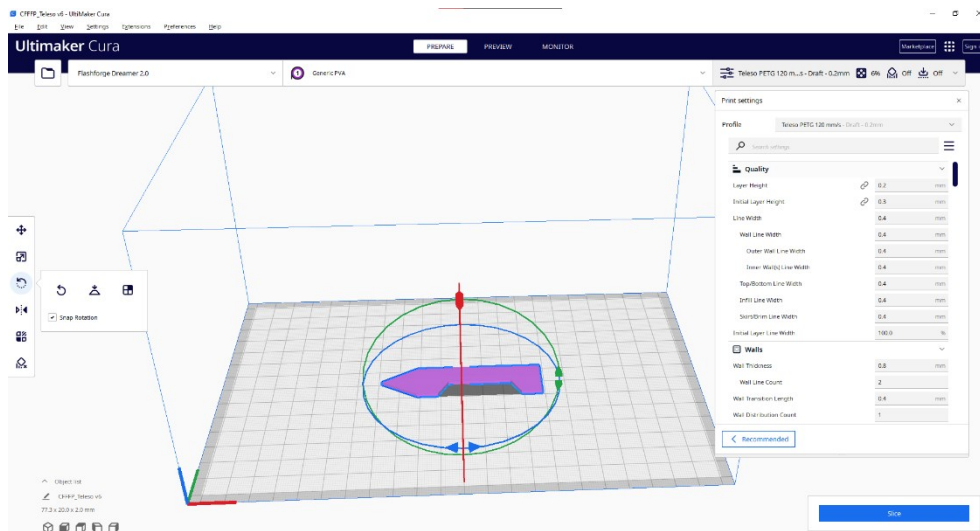
Následně je digitální 3D model možné převést na formát .STL, .OBJ nebo .3DP. Tyto formáty patří mezi nejpoužívanější zejména u technologie FFF, na kterou se zaměřuje tato práce. V tomto formátu je model vstupem pro program obecně

zvaný „slicer“. Název je odvozen z anglického slova „slice“ – tedy rozkrájet, což vystihuje funkci tohoto programu. Ve sliceru se nastavují parametry tisku, které ovlivňují kvalitu zhotovovaného dílu, rychlost samotného tisku a parametry, které souvisí přímo s použitým materiálem, jako je teplota tiskové hlavy, teplota podložky či rychlost retrakce (zpětné vtažení materiálu z důvodu zabránění vláknitých přetoků – „vlásků“ – tzv. „stringing“). Stringing je zobrazen na obrázku 27.



Obrázek 27 – "Stringing" [37]

Většina slicerů už obsahuje určitá přednastavení pro různé materiály a požadovanou kvalitu, takže není vždy nutné vše zadávat manuálně. Po zvolení námi požadovaných parametrů je možné vše potvrdit a slicer poté převede objekt, který do programu vstoupil ve formátu .STL, .OBJ nebo .3DP do formátu G-code. Tento převod spočívá, jak již název „slicer“ napovídá, v rozkrájení importovaného modelu na tenké vrstvy a převedení do souřadnicového kódu, který dokáže 3D tiskárna přečíst. V G-kódu jsou kromě souřadnicového kódu obsaženy i informace o požadovaném nastavení teplot, chlazení a další hodnoty. G-kód tiskárně vlastně říká, po jakých souřadnicích má tisková hlava dávkovat kolik materiálu v každé vrstvě, není to již 3D model, ale soubor po sobě jdoucích příkazů. Vygenerovaný soubor je specifický pro konkrétní typ 3D tiskárny a zpravidla nelze stejný G-kód použít pro dva různé typy tiskáren. Z toho důvodu jsou modely obecně šířeny ve formátu .STL (či .OBJ nebo .3DP) a uživatel si model „naslicuje“, tzn. zpracuje ve sliceru, sám podle svých potřeb v závislosti na použité tiskárně, materiálu a například požadované kvalitě výrobku či rychlosti tisku. Slicerů na trhu existuje velké množství, například Cura od společnosti Ultimaker, PrusaSlicer společnosti PrůšaResearch či slicer Simplify3D. První dva jmenované programy lze používat zdarma, pro používání sliceru Simplify3D je nutné si zakoupit licenci. Pro tuto práci byl použit slicer Cura verze 5.2.2 od společnosti Ultimaker (obr. 28). [2]



Obrázek 28 – Prostředí programu Cura verze 5.2.2

## 1.6 Firmware Marlin

Jako firmware se označuje vestavěný software (Embedded Software), který řídí hardware. Funguje jako link mezi softwarem a hardwarem. V případě 3D tiskáren je to zdrojový kód, který čte příkazy v G-kódu vygenerované slicerem a „překládá“ je do specifických kroků, které má tiskárna vykonat. Tyto příkazy říkají tiskárně po jakých bodech má dávkovat materiál, jak rychle se pohybovat, atd. Jako příklad lze použít příkaz v G-kódu „M109 S200“, který firmware tiskárny přečte tak, že má nahřát tiskovou hlavu na 200 °C a počkat na další příkazy. Tyto instrukce působí zdánlivě jednoduše, skrývá se za nimi však tisíce výpočtů a logických operací prováděných firmwarem. Ten určuje, jak přesně a precizně budou komponenty 3D tiskárny pracovat.

Většina tiskáren technologie FFF v současné době ke svému provozu využívá firmware Marlin. Tento firmware byl vytvořen v roce 2011 a velmi rychle se rozšířil. Díky své open-source povaze byl přijat širokou komunitou uživatelů a nadále vyvíjen. S tímto přístupem se z Marlinu stal vysoce univerzální firmware, který je kompatibilní s celou řadou 8bitových i 32bitových řídicích desek a typy konstrukcí 3D tiskáren jako je například kartézská, CoreXY či Delta. Umožňuje jak základní, tak i více pokročilé funkce a nastavení, jako je například více tiskových hlav či automatická kalibrace tiskové podložky. Marlin je také často využíván v CNC strojích, kde funguje obdobně jako u 3D tiskárny a řídí pohyb hlavy s nástrojem v ose souřadnic. Tato práce bude zaměřena na pokročilejší funkci Marlinu známou jako Linear Advance, která bude více popsána v kapitole 1.7.

Marlin je program psaný v jazyce C/C++ a skládá se z mnoha částí. Nejdůležitějšími částmi pro tuto bakalářskou práci jsou soubory „Configuration.h“ a „Configuration\_adv.h“. Soubor „Configuration.h“ obsahuje základní nastavení

pro hardware, jazyk a také nastavení pro nejběžnější komponenty a funkce. „Configuration\_adv.h“ zahrnuje pokročilejší nastavení a funkce a lze v něm najít i různá experimentální nastavení, která jsou zatím ve fázi testování. Tyto hlavičkové soubory .h obsahují všechna nastavení, která lze v Marlinu upravovat a konfigurovat ve formě tzv. „maker“. Makra jsou série příkazů a instrukcí seskupených dohromady do jednoho celku, které automaticky konají nějaký úkol. Používají se pro zjednodušení práce s daty a zrychlení úkonů. Soubory .h jsou tvořeny sérií maker tvaru „#define název funkce“ a nějaké hodnoty, která je po přepsání v makru přepsána i všude v .cpp souborech, ze kterých se skládá samotný zdrojový kód. Během kompilace – konvertování zdrojového kódu ze stavu, který jsme schopni číst (v případě Marlinu z jazyka C++) do stavu, který dokáže přečíst tiskárna (strojový kód tvořený čísly) vezme „compiler“ (program, který „překládá“ z programovacího jazyka do strojového kódu) hodnoty z .h a přepíše jimi hodnoty v .cpp souborech, kde jsou obsaženy funkce, které s hodnotami z maker .h souborů pracují. Výsledkem kompilace je binární soubor, který se nahraje do paměti řídicí desky 3D tiskárny. [38],[39],[40]

## 1.7 Funkce Linear Advance

Jak již bylo řečeno výše, Marlin obsahuje složku „Configuration\_adv.h“, ve které lze najít pokročilejší nastavení. Jedním z těchto pokročilejších nastavení je i funkce Linear Advance, která bude v této práci využita k optimalizaci kinetického profilu pohybu tiskové hlavy FFF tiskárny kartézské konstrukce. Pro Linear Advance bývá používáno i označení Linear Pressure Control, tedy „Lineární regulace tlaku“.

Jako Linear Advance se označuje funkce, která dokáže předvídat nárůst tlaku v trysce během tisku. Tlak v trysce není konstantní a může se během vytlačování nebo retrakce (vtahování materiálu zpět) zvyšovat nebo snižovat, což vede k nekonstantnímu toku materiálu. Toto je patrnější hlavně u vyšších rychlostí, kdy je materiál dávkován rychleji. To vede k větším problémům se správnou extruzí filamentu. Například při tisku linky je na začátku dávkováno materiálu málo kvůli malému tlaku v tiskové hlavě. Po chvíli se tlak ustálí a materiál je dávkován víceméně konstantně. Na konci linky však chvíli trvá, než tlak v trysce poklesne a materiálu je dávkováno více, než by mělo. Problémy s dávkováním materiálu se následně projevují různými vadami, které jsou na zhotoveném výrobku patrné i pouhým okem. Jelikož v tiskové hlavě není tlakový senzor a jeho implementace by vyžadovala složité úpravy tiskové hlavy, bývá posouzení optimalizace tlaku v tryskové hlavě prováděno experimentálně skrz vizuální posouzení dávkování materiálu.

Chyby, které se můžou projevit nedokonalým dávkováním tiskové struny, jsou patrné v rozích zhotovených výrobků, kdy je dávkováno víc materiálu, než je třeba a vzniká zde jakýsi výběžek. Dále mohou chyby vznikat uvnitř stěn tištěného objektu, kdy k sobě nemusí dokonale přilnout jednotlivé perimetry (jednotlivé tištěné linky při pohledu shora) správně. Funkce Linear Advance by tyto problémy měla vyřešit pomocí zoptimalizování dávkování materiálu v průběhu tisku. Na obrázku 29 je porovnání očekávané vytištěné linky oproti realitě. Nahoře je znázorněna teoretická linka, dole vytištěná. U skutečné linky se vlivem změn tlaku v tiskové hlavě vyskytují nedostatky v dávkování materiálu.

Optimalizace pomocí funkce Linear Advance se realizuje skrz takzvané K-hodnoty, které jsou typické pro daný materiál a lze je stanovit experimentálně pomocí tiskárny. Po nalezení optimální K-hodnoty lze tuto hodnotu vpravit do G-codu, odkud si ji následně vezme funkce Linear Advance ve firmwaru tiskárny a využije ji k vypočítávání správného dávkování materiálu během tisku. Základní K-hodnota, při které funkce Linear Advance neoptimalizuje dávkování materiálu, je 0. S rostoucí K-hodnotou dochází k větší míře úpravy dávkování. Pro většinu termoplastických materiálů používaných technologií FFF se jako horní mez K-hodnot bere hodnota 2. Hodnota je typicky vyšší pro extrudery typu bowden než pro extrudery typu direct. To je způsobeno flexibilitou tiskové struny uvnitř trubičky bowden extruderu. Aby mohla tato funkce správně pracovat, je ji však nutné nejprve ve firmwaru tiskárny aktivovat, jelikož se jedná o experimentální funkci a zpravidla je ve výchozím nastavení ve firmwaru vypnutá. Postup stanovení K-hodnot i přehrání firmwaru tiskárny pro povolení funkce Linear Advance bude dále popsáno v praktické části práce. [41],[42],[43]



Obrázek 29 – Porovnání očekávané vytištěné linky oproti realitě [43]

## 1.8 Materiály pro technologii FFF

Tato kapitola bude zaměřená na materiály používané technologií FFF. Jedná se o termoplastické materiály ve formě struny, tzv. filamentu. Tyto struny mají nejčastěji průměr 1,75 mm a bývají navinuty na cívce o hmotnosti 1 kg. Dříve se šlo setkat i se strunami o průměru 3 mm, v současnosti však téměř všechny tiskárny používají tloušťku 1,75 mm a jsou tomu přizpůsobeny jejich tiskové hlavy. Pro tuto práci byly využity filamenty o tloušťce 1,75 mm z materiálů PETG, HIPS a PVA. V této části však budou kromě materiálů použitých v praktické části charakterizovány i další nejpoužívanější termoplasty pro technologii FFF.

### 1.8.1 Houževnatý polystyren (HIPS)

Polystyrenové plasty patří spolu s polyolefiny a polyvinylchloridy mezi nejvíce vyráběné plasty. Existuje několik druhů polystyrenu, které se liší svými vlastnostmi a způsoby použití. Mezi tyto druhy se řadí standartní plasty (homopolymery styrenu), které jsou průzračné a lesklé, ale poměrně křehké. Dále zpěňovatelné plasty obsahující nadouvadlo, díky kterému je možné jejich vypěnění do různých tvarů ve formách za vzniku produktů o nízké hustotě. Tyto produkty dosahují vynikajících tepelně izolačních vlastností. Sníženou křehkostí oproti standartnímu polystyrenu se vyznačuje skupina houževnatých plastů, mezi které spadá houževnatý polystyren. Jsou však neprůhledné a nedosahují vysokého lesku.

Houževnatý polystyren (High-Impact Polystyren, HIPS), označován také jako rázuvzdorný polystyren, dosahuje oproti standartnímu polystyrenu zvýšené rázové houževnatosti a snížené křehkosti. Zlepšení těchto vlastností je dosaženo pomocí kopolymerace styrenu s akrylonitrilem, butadienem a methylmethakrylátem. Mísením s kaučuky lze dosáhnout ještě většího zlepšení těchto vlastností. Existují tři způsoby, kterými lze mísení s kaučuky realizovat. První způsob spočívá v polymeraci styrenu za přítomnosti butadienu. Tento způsob je nejčastější a poskytuje polystyren, roubovaný kopolymer a trojrozměrný gel. Lze ho provést v suspenzi, emulzi nebo v bloku. Druhým způsobem získání HIPS je společná koagulace polystyrenového latexu se směsí butadien-styrenového latexu. Třetí způsob je mechanické mísení polystyrenu s 5 - 15 % kaučuku. To je prováděno za podmínek vhodných pro roubování s přídavkem iniciátoru a monomeru v mixérech, extruderech či vyhřívaných válkách.

Houževnatý polystyren je heterogenní systém tvořený dvěma fázemi. Ve spojitě fázi, tvořené polystyrenem, je rozptýlena fáze polybutadienového kaučuku ve formě izolovaných částic, přičemž na polybutadienový kaučuk je naroubována i část styrenu. Často je používán polybutadien získaný z emulzní polymerace. Vlastnosti HIPS, jako jsou vysoká rázová houževnatost a nižší tvrdost než

u standardního polystyrenu, jsou podmíněny právě dvoufázovou strukturou houževnatého polystyrenu. Vysoká rázová houževnatost, která je u HIPS okolo 40 - 80 kJ.m<sup>-2</sup>, zatímco u polystyrenu jen okolo 20 kJ.m<sup>-2</sup>, je zachována i při teplotě pod 0 °C. S rostoucím množstvím kaučukovité fáze roste rázová houževnatost a klesá tvrdost, bod měknutí a tepelná odolnost. Množství kaučuku v HIPS bývá okolo 5 % a hodnota hmotnostně střední relativní molekulové hmotnosti  $M_w$  je nejčastěji 200 000 - 250 000.

Zpracování HIPS je možné všemi běžnými zpracovatelskými technikami. Nejčastěji se zpracovává vstřikováním při teplotách 170 - 240 °C. Další způsoby zpracování jsou vyfukování, vytlačování nebo vakuové tvarování. Nachází využití v oblasti obalových materiálů, používá se pro výrobu hraček, nábytku či elektrotechniky. V technologii FFF se používá zejména pro tisk větších předmětů potřebujících dobrou odolnost. V případě tiskárny s dvěma extrudery lze použít pro tisk podpěr pro modely z ABS, PETG nebo ASA. Podobně jako u polyvinylalkoholu (kapitola 1.8.5) lze následně podpory z HIPS rozpustit ve vhodném rozpouštědle (v tomto případě limonen) a tím efektivně odstranit podpory z objektu. Má dobrou přilnavost k tiskové podložce a teplota tisku bývá kolem 220 - 250 °C pro tiskovou hlavu a 90 - 110 °C pro podložku. Houževnatý polystyren nevykazuje velkou teplotní deformaci a není nutné používat vyhřívanou komoru. [44],[45]

### 1.8.2 Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

Jedním z prvních materiálů, které našly uplatnění pro technologii FFF, byl Akrylonitril-butadien-styren (ABS). Jedná se o termoplastický terpolymer založený na kombinaci monomerů akrylonitrilu, butadienu a styrenu s poměry jednotlivých složek pohybujících se v širokém rozmezí 10 - 30 % akrylonitrilu, 15 - 50 % butadienu a 45 - 70 % styrenu. ABS terpolymery jsou polystyrenové plasty a ve srovnání se standardním polystyrenem mají lepší chemickou odolnost, houževnatost a zachovávají si dostatečnou tuhost.

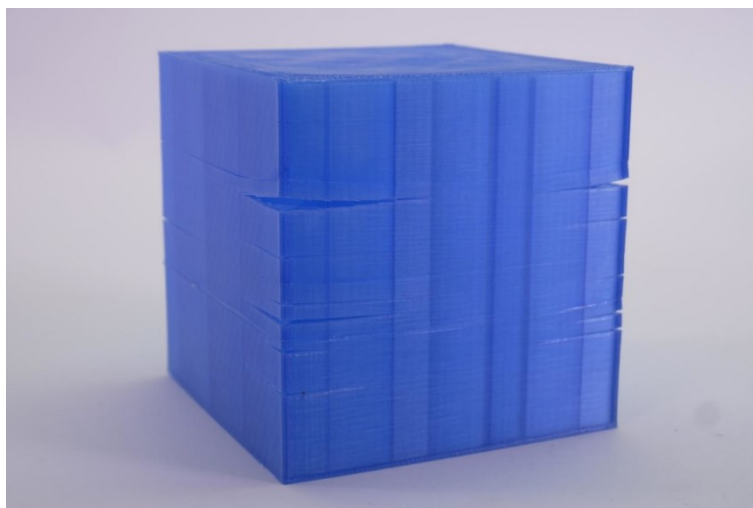
Základní podmínkou pro výrobu je oddělená příprava elastomeru s převahou butadienu (BR, NBR) a jeho dokonalá dispergace ve styren-akrylonitrilu (SAN). Výroba se poté dle způsobu dispergace dělí na dva základní postupy. První způsob spočívá v dispergaci butadien-akrylonitrilového kaučuku se styren-akrylonitrilovým monomerem pomocí mechanického mísení. To lze realizovat buď mísením v plastickém stavu ve hnětičích či vytlačovacích strojích nebo společnou kolagulací latexů. Druhý způsob je založen na roubování monomerů styrenu a akrylonitrilu na předem připravený elastomer do určitého stupně a následným smíšením s dostatečným množstvím kopolymeru styren-akrylonitril. Roubování lze provádět emulzní či suspenzní technikou, nejčastěji se však využívá suspenzní. Výrobky z roubovaných polymerů ABS získaných druhým postupem vykazují lepší

kvalitu, tepelnou stálost a vzhled než výrobky z ABS připraveného dle prvního postupu pouhým mechanickým mísením.

Polymery ABS jsou heterogenní materiály tvořené spojitou fází styren-akrylonitrilového kopolymeru, ve které jsou rozptýleny malé částice polybutadienu. Tyto polymery mají podobnou morfologickou strukturu jako houževnatý polystyren (HIPS) a představují v podstatě kaučukem modifikovaný SAN. Vlivem přítomnosti kaučuku však polymery ABS ztrácejí odolnost proti UV záření a povětrnosti. Je tedy nutné používat vyšší množství účinných antioxidantů (okolo 1 %), světelných stabilizátorů a absorbérů UV-záření. Při výrobě lze použít i elastomer, který neobsahuje větší množství dvojných vazeb za účelem zvýšení stálosti proti fotooxidačnímu stárnutí. Oproti těmto nedostatkům však mají polymery ABS dobré mechanické vlastnosti, vysokou houževnatost a dobrou zpracovatelnost. Disponují také odolností proti řadě chemikálií a dobrými elektrostatickými izolačními vlastnostmi. Vlivem heterogenní struktury jsou tyto polymery vždy neprůhledné. Teplota skelného přechodu  $T_g$  se pohybuje v rozmezí 80 - 105 °C a teplota tečení  $T_f$  se pohybuje okolo 240 °C.

ABS nachází díky svým dobrým zpracovatelským vlastnostem, které umožňují jeho zpracování všemi běžnými postupy u termoplastů, uplatnění v mnoha oblastech. Pomocí vstřikování jsou vyráběny vnitřní i vnější díly motorových vozidel (přístrojové desky či mřížky masek), domácí spotřebiče (vysavače, mixéry, sušičky, pračky,...), zavazadla, elektrotechnická zařízení (telefony, notebooky) a mnoho dalšího. Vytlačováním jsou vyráběny desky či profily. Jedná se o první materiál, který byl použitý technologií FFF. Teplota trysky během tisku se pohybuje kolem 255 °C. Vlivem velké objemové kontrakce během chladnutí však dochází během tisku k deformaci zhotovovaného objektu. Deformace může být v takové míře, že výrobek praská v jednotlivých vrstvách. Tato deformace je zobrazena na obrázku 30. Pro zabránění deformace je nutné vytápět tiskovou podložku až ke 100 °C a pokud je to možné, použít vytápěnou komoru. [44],[46]





Obrázek 30 – Separace jednotlivých vrstev u objektu z ABS [47]

### 1.8.3 Akrylonitril-styren-akrylát (ASA)

Ač byl ABS první a jednu dobu nejrozšířenější termoplast používaný pro FFF, postupně ho začal nahrazovat akrylonitril styren akrylát. Tento polymer je možné připravit obdobně jako ABS, při přípravě se však místo butadienového kaučuku použije akrylátový kaučuk na bázi ethylakrylátu a butylakrylátu. Tento kaučuk je dobře odolný vůči povětrnostním vlivům díky absenci dvojné vazby v hlavním řetězci.

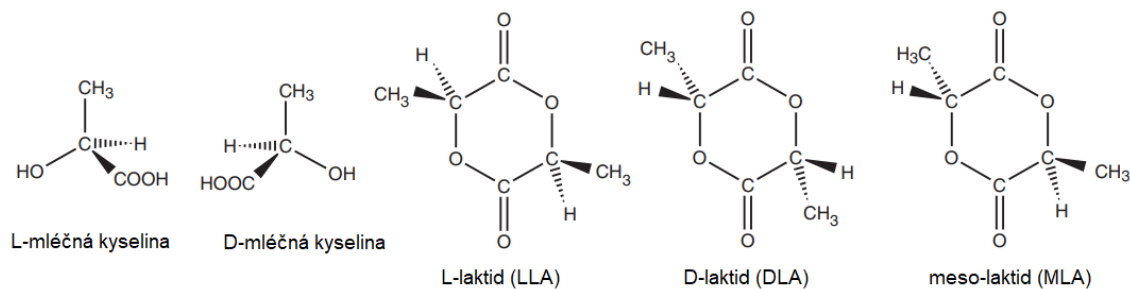
Polymer ASA je svými vlastnostmi velice podobný ABS, vyznačuje se však podstatě vyšší odolností vůči UV záření a povětrnostním vlivům. Ještě vyšší odolnosti vůči povětrnosti lze docílit pomocí vhodných světelných stabilizátorů. Zpracovatelské vlastnosti jsou stejné jako u ABS, ASA však poskytuje lepší tepelnou stálost a lepší chemickou odolnost. Teplota skelného přechodu  $T_g$  pro ASA se pohybuje okolo 100 °C.

Z hlediska využití v 3D tisku je nejdůležitější vlastností již výše zmíněná odolnost vůči UV záření a povětrnosti. Díly zhotovené z ABS při venkovním použití ztrácejí svou barvu (často žloutnou) a jsou ovlivněny i jejich mechanické vlastnosti. Na rozdíl od toho byl ASA přímo vyvinut pro povětrnostní odolnost. Zároveň se ASA vyznačuje větší odolností vůči vlhkosti. Tyto vlastnosti ho předurčují k využití v místech, které jsou vystaveny povětrnostním vlivům. Polymer ASA dosahuje i vyšší teplotní odolnosti než ABS, vyznačuje se však vyšší cenou. Obdobně jako ABS je ASA nutné tisknout s vyhřátou podložkou a ideálně vyhřívanou komorou, neboť je tento polymer také náchylný k deformaci vlivem chladnutí. [44],[48]

#### 1.8.4 Kyselina polymléčná (PLA)

V současné době nejpoužívanější filamenty pro technologii FFF jsou na bázi kyseliny polymléčné. Jedná se o polymer spadající do skupiny tzv. „bio-based“, tedy polymerů, které jsou získávány z biologických materiálů. Tato skupina v posledních desetiletích získala velkou pozornost z hlediska environmentálního, biomedicínského a farmaceutického. „Bio-based“ polymery jsou zajímavé i z hlediska toho, že by se do budoucna mohly stát ekologickou alternativou polymerů získávaných z nerostných surovin, zejména v oblasti obalového průmyslu. Základní surovinou pro výrobu kyseliny polymléčné je glukóza, která může být získávána z kukuřičného či bramborového škrobu, cukrové třtiny, řepy atd. Spálením, biodegradací či jiným „zničením“ kyseliny polymléčné nedochází ke zvýšení hladiny CO<sub>2</sub> v atmosféře, neboť uhlík v PLA je původem z atmosférického CO<sub>2</sub>, který se během fotosyntézy podílí na vzniku glukózy. Z tohoto důvodu je uhlíková stopa PLA nižší v porovnání s polymery získávaných z ropy. Kyselina polymléčná se vyznačuje biodegradabilitou jak v životním prostředí, tak v lidském těle. Produkty, které tímto procesem vznikají, jsou prakticky netoxické a PLA je tak použitelná i v medicíně či potravinářském průmyslu.

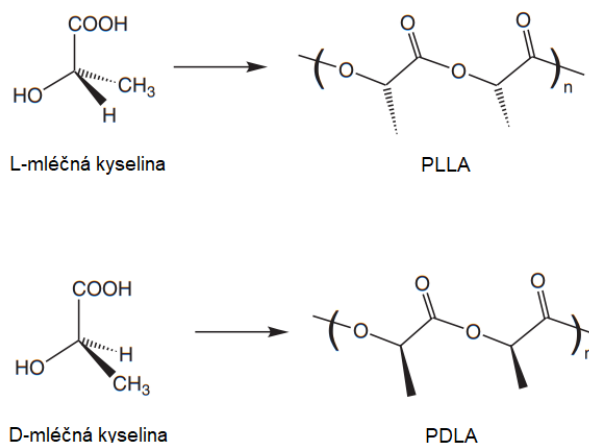
Kyselina mléčná (kyselina 2-hydroxypropanová) slouží jako monomer pro výrobu PLA. Tato kyselina je opticky aktivní a vyskytuje se ve dvou enantiomerech a to L- a D- (resp. S- a R-). Výrobu PLA lze realizovat buď přímou polykondenzací kyseliny mléčné nebo z cyklického dimeru této kyseliny - laktidu pomocí polymerace s otevřením kruhu. Laktid se vyskytuje celkem ve třech stereoisomerech a ty se označují dle toho, jaký optický izomer obsahují: D-laktid (DLA) skládající se ze dvou D-mléčných kyselin, L-laktid (LLA) je dimerem dvou L-mléčných kyselin a jako meso-laktid (MLA) je označován dimer L-mléčné kyseliny a D-mléčné kyseliny. Samotná kyselina polymléčná se dělí na tři typy kvůli výše zmíněným formám dimeru a to: PLLA, PDLA a PDLLA. Kyselina poly-L-mléčná (PLLA) je opticky aktivní a krystalinický polymer, stejně jako kyselina poly-D-mléčná (PDLA). Kyselina poly-DL-mléčná (PDLLA) je polymer opticky neaktivní a amorfní. Nejvyužívanější formou kyseliny polymléčné je právě PLLA, vzhledem k nízkým nákladům na výrobu. Nachází využití zejména v obalovém průmyslu, krytech na elektroniku a v dalším spotřebním zboží. Monomery a dimery využívané pro výrobu PLA jsou zobrazeny na obrázku 31.



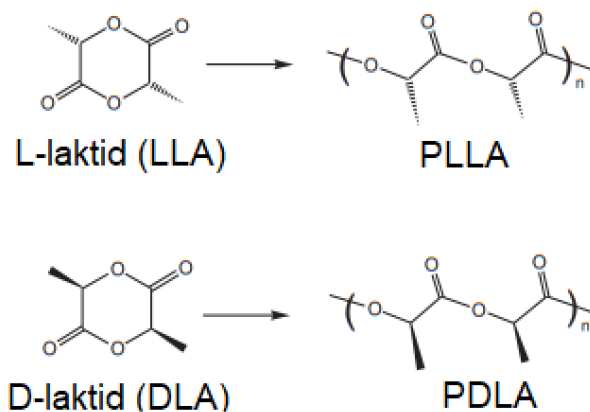
Obrázek 31 – Monomery a dimery využívané pro výrobu PLA [49]

Kyselina mléčná vzniká bakteriální fermentací sacharidů, zejména glukózy získávané z kukuřičného škrobu. Čistota a výtěžek produktu fermentace závisí na použitém druhu bakterie *Lactobacillus* a na podmínkách kvašení jako je teplota, pH, aerace a další. Případné nečistoty v produktu tvoří organické kyseliny, alkoholy, sacharidy, aminokyseliny a proteiny.

Syntézu PLA lze realizovat dvěma způsoby, a to buď polykondenzací kyseliny mléčné (obr. 32) nebo polymerací laktidu s otevřením kruhu (obr. 33). Tyto reakce probíhají za použití katalyzátorů na bázi cínu pro zvýšení molekulové hmotnosti PLA až k hodnotám  $10^5 - 10^6$  g/mol. Tyto katalyzátory také pomáhají zabránit transesterifikaci a vzniku racemické směsi. Polykondenzací lze dosáhnout vysoké konverze a tedy získat PLA o vysoké molekulové hmotnosti pouze, pokud je z polymerační směsi (tvořené vodou, kyselinou mléčnou, oligomery a PLA) odstraňována voda. Teplota reakce se pohybuje mezi 180 - 200 °C a reakce probíhá za sníženého tlaku cca 0,6 kPa s dlouhou reakční dobou v řádech několika hodin a za použití vhodných katalyzátorů. Polymerací s otevřením kruhu lze získat PLA o vyšší molekulové hmotnosti ( $> 10^6$  g/mol) než v případě PLA získané polyadící. V porovnání s polyadící probíhá polymerace s otevřením kruhu za nižší teploty ( $< 120$  °C) a přibližně stejné reakční době. Díky nižší teplotě lze dosáhnout PLA o vyšší optické čistotě.



Obrázek 32 – Polykondenzace mléčné kyseliny za vzniku PLA [49]



Obrázek 33 – Polymerace s otevřením kruhu za vzniku PLA [49]

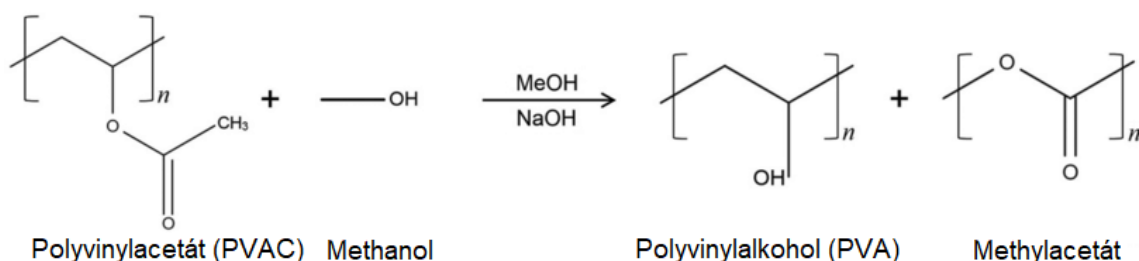
Kyselina polymléčná je bezbarvý semikrystalický polymer s termoplastickými vlastnostmi. Oproti ostatním termoplastům má PLA nižší rázovou houževnatost, což limituje její použití. Teplota skelného přechodu  $T_g$  se pohybuje okolo 55 - 60 °C. Teplota tečení  $T_f$  začíná od cca 170 - 180 °C. Tyto teploty se mírně liší pro jednotlivé typy PLA (PLLA, PDLA a PDLLA). PLA má poměrně nízký koeficient tepelné roztažnosti, díky čemuž vlivem chladnutí nedochází k významné deformaci (na rozdíl od ABS). Při teplotě tiskové podložky okolo 50 °C lze tisknout na samotnou podložku bez použití přípravků na zvýšení adheze, v případě jejich použití není nutné podložku vyhřívat. Tyto vlastnosti z PLA dělají ideální materiál pro technologii FFF, kde se kyselina polymléčná stala jedním z nejvyužívanějších materiálů. Nevýhodou je však nízká teplotní odolnost PLA, takže pro díly, které budou vystavovány vyšším teplotám, je lepší zvolit jiné materiály, jako například ABS či PETG.

Mimo aditivní technologie nachází PLA využití jako náhrada polymerů získávaných z ropy v určitých oblastech, zejména v obalových materiálech. Dále se kyselina polymléčná využívá v automobilovém průmyslu (kryty náhradních pneumatik, autokoberce) či v elektrotechnice na kryty počítačů, laptopů a mobilních telefonů. Díky biodegradabilitě a schopnosti vstřebat se do tkáně našla PLA uplatnění i v medicíně na výrobu kostních implantátů a fixací, které se po zhojení v tkáni či kosti rozloží. Vývojem prochází použití PLA jako nosiče léků. [49], [50], [51]

### 1.8.5 Polyvinylalkohol (PVA)

Velká část polymerů se připravuje polymerací svého monomeru, vinylalkohol je však nestabilní sloučenina a proto je nutné polyvinylalkohol získávat z polyvinylacetátu (PVAC). Z tohoto důvodu obsahuje připravený polyvinylalkohol vždy nějaké množství acetylových skupin, které závisí na stupni přeměny. Jako polyvinylalkohol se označují ty produkty, které obsahují tolik volných hydroxylových skupin, že se rozpouští i ve studené vodě. Lépe se však PVA rozpouští v teplé vodě.

Příprava z polyvinylacetátu spočívá ve zmýdelnění či reesterifikaci. Zmýdelňovat PVAC lze ve vodném prostředí či v prostředí alkoholů pomocí alkálií nebo kyselin. Výroba je prováděna kontinuálně i diskontinuálně. Nejúčinnější způsob získání PVA je však reesterifikace roztoku polyvinylacetátu v methanolu v kyselém nebo alkalickém prostředí. Při reesterifikaci v alkalickém prostředí (obr. 34) je PVAC rozpouštěn v methanolu za vzniku 25% až 30% roztoku. Reakce za normální teploty probíhá, pokud je použito méně než 1 %  $\text{CH}_3\text{ONa}$ . Za intenzivního hnětení či míchání s pokračující reesterifikací vznikne nejprve zbotnalý gel. Ten ke konci reakce vychází z roztoku ve formě práškové suspenze v methanolu a methylacetátu. Výsledný produkt je následně promyt methanolem a vysušen. Pro sušení je ideální bezkyslíkaté prostředí.



Obrázek 34 – Reesterifikace PVAC [44]

Z hlediska vlastností je PVA bílý krystalický prášek a jeho fyzikální vlastnosti jsou nejvíce ovlivněny polymeračním stupněm a stupněm hydrolyzy, resp. reesterifikace. Komerčně dostupné jsou hlavně dva typy PVA: se stupněm hydrolyzy 87 - 89 mol. % a se stupněm hydrolyzy 98 mol. %. V těchto dvou skupinách jsou zahrnuty PVA se stupněm polymerace 500 - 2500. Bod tání plně hydrolyzovaného polyvinylalkoholu je 228 °C a teplota skelného přechodu  $T_g$  je 85 °C. S rostoucím polymeračním stupněm klesá rozpustnost PVA a rozpustnost je dále ovlivněna také stupněm hydrolyzy (resp. reesterifikace). PVA, který byl plně hydrolyzovaný, tvoří za stejného polymeračního stupně roztoky o vyšší viskozitě, než poskytne PVA pouze částečně hydrolyzovaný. Viskozita roste stáním u roztoků PVA s vysokým stupněm hydrolyzy při vyšších koncentracích, zahřátím

Ize viskozitu opět snížit. U vodných roztoků PVA lze dosáhnout zvýšení viskozity pomocí přídavku malého množství ethanolu, methanolu nebo solí. PVA je rozpustný ve vodě, triethylenglykolu a glycerolu, zejména za tepla. Botná v alkoholech a v nepolárních rozpouštědlech a olejích je nerozpustný i za zvýšené teploty. Polyvinylalkohol odolává dobře organickým kyselinám, neodolává vodným roztokům anorganických kyselin a alkalických hydroxidů. Použitelnost PVA se pohybuje v rozmezí -50 až 130 °C. Jedná se o málo termoplastický materiál, k jehož rozkladu dochází nad teplotou 220 °C.

PVA se využívá k přípravě lepidel, a to buď samotný nebo v kombinaci se škrobem a polymerními disperzemi, nebo jako zahušťovadlo inkoustů či pro impregnaci papíru. Jeho hlavní využití je jako ochranný koloid, který zajišťuje stabilitu disperzí polymerů díky své rozpustnosti ve vodě a tím, že jeho vodné roztoky jsou vysoce viskózní. Polyvinylalkohol lze použít pro výrobu fólií rozpustných ve vodě pro speciální účely. Tyto fólie odolávají rozpouštědlům a nacházejí své využití jako obalový materiál, který se současně s obsahem rozpustí ve vodě.

Z hlediska technologie FFF se PVA používá hlavně jako materiál pro zhotovování podpor. FFF tiskárny vybavené dvěma extrudery dokáží při tisku objektu použít více materiálů a zhotovit tak vícebarevný objekt nebo jako v tomto případě použít filament na bázi PVA pro tisk podpor. Je tak možné zhotovit objekt z materiálu, který není ve vodě rozpustný a podpory z ve vodě rozpustného materiálu. Ponořením objektu s podporami do vody se podpory rozpustí a objekt nikoliv (obr. 35). Jedná se tak o efektivní a rychlé odstranění podpor, které je běžně třeba pracně odstraňovat. [44],[51]



Obrázek 35 – Podpory z PVA [52]

### 1.8.6 Polyethylentereftalát (PET)

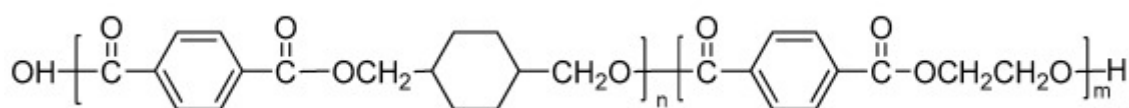
Jako polyethylentereftalát (PET) se označuje lineární polyester kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. Při výrobě se však častěji než samotná kyselina tereftalová využívá její dimethylester, neboť kyselina tereftalová je špatně čistitelná a vlivem své nízké rozpustnosti způsobuje potíže během esterifikace. PET vzniká polykondenzací a výroba je realizována ve dvou stupních za použití acidobazických katalyzátorů pro urychlení reakce. V prvním stupni je přímou esterifikací kyseliny tereftalové (ethylenoxidem či ethylenglykolem) nebo přeesterifikací dimethyltereftalátu získáván bis(2-hydroxyethyl)tereftalát při teplotě 190 - 195 °C. Jako nízkomolekulární produkt je oddestilován methanol, podle jehož množství je sledován průběh reakce. Během tohoto stupně je důležité dobré promíchávání reakční směsi. Druhý stupeň navazuje přímo na stupeň první zvýšením reakční teploty. V tomto stupni probíhá polyesterifikace při teplotě 265 - 280 °C a jako nízkomolekulární produkt je odstěpován ethylenglykol a získává se viskózní tavenina PET. Reakce je realizována v inertní atmosféře CO<sub>2</sub> nebo dusíku kvůli zamezení oxidace produktu. Vzniklá tavenina je následně vytlačena ve formě pásků a granulována.

PET je čirý semikrystalický termoplast. Teplota skelného přechodu  $T_g$  se pohybuje kolem 80 °C a teplota tání je 260 - 265 °C. Nachází využití zejména pro výrobu syntetických vláken díky dobré vláknotvornosti a v menší míře jako obalový materiál (lahve, fólie). Vlákno z polyesteru je málo navlhavé a poměrně rychle schne. Vyznačuje se dobrou odolností vůči zředěným kyselinám a hydroxidům, neodolává ale koncentrovanému amoniaku. Dosahuje dobré stálosti na světle a při zahřívání na vzduchu. PET vlákno nebotná ve vodě a hůře přijímá barviva, je proto obtížně barvitelné a stálost vybarvení je poměrně nízká.

Vytlačováním a následnou orientací za tepla jsou z PET získávány číré fólie s velkou mechanickou pevností a dobrou rozměrovou stálostí. Tyto fólie mají výborné elektroizolační vlastnosti a tepelnou odolnost. Nachází své uplatnění zejména v elektrotechnickém průmyslu. Pomocí vstřikování jsou z PET zhotovovány mechanicky namáhané výrobky, kde je třeba vysoká pevnost a rozměrová stálost. Pro tyto výrobky je využíván PET o krystalinitě 30 - 40 % a číselně střední relativní molekulové hmotnosti  $M_n = 30\,000$  a větší. Ve velké míře se PET využívá na výrobu lahví na nápoje. Pomocí vstřikování je vyrobena preforma, která je následně vyfouknuta až do požadovaného tvaru. Výhodou je poměrně nízká cena. Pro materiálovou extruzi technologií FFF je PET využíván v menší míře kvůli problémům, které vznikají při zahřívání tiskové struny z PET. Během přehřátí se mění jeho vlastnosti a stává se křehkým a zakaleným. Z toho důvodu se pro využití v 3D tisku PET modifikuje. [44]

### 1.8.7 Glykolem modifikovaný PET (PETG)

Ač je PET jedním z nejrozšířenějších termoplastů, pro technologii FFF je častěji využíván PET modifikovaný glykolem – proto zkratka PETG. Jako modifikující glykol je využíván 1,4-cyklohexandimethanol, který je přidáván do směsi během polymerace. Vzniká tak kopolymer kyseliny tereftalové, ethylenglykolu a cyklohexandimethanolu s odlišnými vlastnostmi než samotný PET – snižuje se krystalinita, křehkost a teplota tečení a zvyšuje se rázová odolnost a houževnatost. Vykazuje také dobrou chemickou odolnost vůči kyselinám a zásadám. Na obrázku 36 je znázorněna struktura PETG.



Obrázek 36 – Struktura PETG [54]

Tisk probíhá při teplotách tiskové hlavy 210 - 260 °C a tiskové podložky 60 – 80 °C. PETG se svými vlastnostmi blíží ABS (zejména mechanickou a teplotní odolností), tisk je však podstatně jednodušší a díky malé teplotní roztažnosti nedochází během tisku k deformaci zhotovovaného objektu. Tento materiál vykazuje dobrou přilnavost k tiskové podložce, není proto třeba použití adhezivních přípravků. Využíván bývá hlavně pro různé mechanické díly, držáky či jiné mechanicky namáhané výrobky, u kterých je potřeba dobrá odolnost. Nevýhodou PETG z hlediska tisku je však jeho vláknovitost. Během tisku s PETG dochází k takzvanému „nitkování“ (stringing), kdy na tvořeném objektu vznikají různá vlákna vlivem odkapávání filamentu z trysky během pohybu z jednoho místa do druhého. Objekt pak vypadá, jakoby byl obalen v tenkých plastových nitkách a kromě estetiky může být negativně ovlivněna i jeho vnitřní struktura. U PETG je proto nutné nastavit správně retrakce (natahování materiálu zpět při přesunu tiskové hlavy po podložce) a teplotu pro tisk. [53],[54],[55]

### 1.8.8 Polyamid (Nylon)

Jako polyamid se označuje polymer, který ve hlavním řetězci obsahuje amidové skupiny. Pro polyamid se lze setkat i s označením „nylon“, které je obchodním názvem společnosti DuPont. Nejrozšířenější skupinou polyamidů jsou alifatické polyamidy, které se připravují zejména polymerací cyklických laktamů, polykondenzací dikarboxylových kyselin a diaminů nebo polykondenzací  $\omega$ -aminokarboxylových kyselin. Alifatické polyamidy jsou pak označovány podle toho, jaký je počet uhlíků ve stavebních jednotkách řetězce. Číselně se značí počet uhlíků příslušného diaminu a počet uhlíků v dikarboxylové kyselině nebo počet



uhlíků aminokyseliny či laktamu. Z polyamidů jsou pro tiskové struny FFF tiskáren nejčastěji využívány alifatické polyamidy - polyamid 6 a polyamid 66.

Polyamid 6 (PA 6) se získává stupňovitou hydrolytickou polymerací  $\epsilon$ -kaprolaktamu přes stupeň 6-aminokapronové kyseliny nebo alkalickou polymerací  $\epsilon$ -kaprolaktamu. Hydrolytická polymerace je prováděna zpravidla kontinuálně ve válcových reaktorech při teplotě 240 - 260 °C o konverzi  $\epsilon$ -kaprolaktamu na polyamid přibližně 90 %. PA 6 je získáván ve formě pásků, které jsou po ochlazení granulovány. Alkalická (aniontová) polymerace probíhá při teplotě nad 150 °C. Tato reakce je značně citlivá na přítomnost vody a dalších inhibičně působících nečistot.

Polyamid 66 (PA 66) je získáván polykondenzací hexamethyldiaminu a kyseliny adipové. V první stupni vzniká z ekvimolárního množství výchozích surovin, tzv. nylonová sůl. Jejím zahříváním pod inertní atmosférou při počáteční teplotě okolo 230 °C a tlaku 1,7 MPa dochází v druhém stupni k polykondenzaci. Reakční teplota je postupně zvyšována až k 280 °C. Vzniklý polyamid je získáván ve formě pásky a následně granulován a sušen. PA 66 má vysoký bod tání a vyznačuje se vyšší pevností a nižší navlhavostí než PA 6.

Vlastnosti těchto polymerů vycházejí z výchozích monomerů. Mezi amidovými skupinami vznikají vodíkové vazby a řetězce jsou propojovány navzájem. Množství vodíkových můstků ovlivňuje bod tání krystalů, teplotu skelného přechodu, krystalinitu a mnoho dalších vlastností. Oproti ostatním termoplastům mají polyamidy nižší tavnou viskozitu. Běžné polyamidy jsou krystalické polymery s mírou krystalinity 30 - 50 %. Vykazují vysokou tvrdost, houževnatost a odolnost proti oděru a také dobré elektroizolační vlastnosti. Jsou však značně navlhavé vlivem vysoké polarit polymerů. Polarita ale zároveň usnadňuje snášenlivost s plnivý, jako jsou skleněná vlákna či křída. Polyamidy jsou odolné vůči mnoha technickým rozpouštědlům a pohonným hmotám a olejům. Odolávají dobře alkáliím, nikoli však kyselinám, zejména koncentrovaným, které polyamidy rozpouští až dokonce štěpí.

Zpracování alifatických polyamidů lze provádět všemi postupy běžnými pro termoplasty, jako je nejčastěji vstřikování a vytlačování na fólie nebo zvláknování z taveniny. Tyto polymery lze snadno svařovat a lepit a také provádět povrchové úpravy jako je potisk a pokovování.

Pro tiskové struny jsou nejčastěji používány PA 6 a PA 66. Tyto filamenty se vyznačují vynikající odolností a nachází své uplatnění pro zhotovování technických dílů vyžadujících vysokou teplotní a mechanickou odolnost. Odolávají abrazi a mají vynikající přilnavost jednotlivých vrstev. Jedná se o materiály poměrně náročné na tisk se špatnou přilnavostí k tiskové podložce. Teplota tiskové hlavy se pohybuje kolem 240 - 290 °C a teplota tiskové podložky je okolo 110 °C. Z důvodu vysokých teplot lze tyto materiály tisknout jen na FFF tiskárnách vybavených celokovovou hlavou, u které se teflonová trubička nedotýká topné zóny, neboť teflonová trubička nad 260 °C začíná degradovat. Tyto materiály jsou velmi hygroskopické a v rámci několika hodin dokáží pohltit velké množství vlhkosti (až 10 % své hmotnosti), je proto nutné je skladovat ve vzduchotěsných nádobách s pohlcovači vlhkosti a před tiskem je dobré tiskovou strunu vysušit. Na obrázku 37 je příklad využití tisku polyamidů – trysky pro stroje na výrobu sněhu zhotovené z polyamidu technologií FFF. [44],[56],[57]



Obrázek 37 – Trysky pro stroje na výrobu sněhu [56]

## 2. Praktická část

### 2.1 Základní charakteristika materiálů

V tabulce 1 je uvedena základní charakteristika materiálů z hlediska parametrů důležitých pro tuto práci.

*Tabulka 1 – Charakteristika materiálu PETG Green Transparent*

PETG zelená transparentní, 1 kg, 1,75 mm ± 0,05 mm	
Zpracovatel	Verbatim
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,27
Index toku taveniny MFR [g/10 min]	17,7 ± 1,2
Index toku taveniny MVR [cm <sup>3</sup> /10 min]	18,7 ± 1,3
Teplota tisku [°C]	240 ± 10
Modul pružnosti [MPa]	1206 ± 72
Míra elastické deformace [%]	1,5

*Tabulka 2 – Charakteristika materiálu HIPS Signal Red*

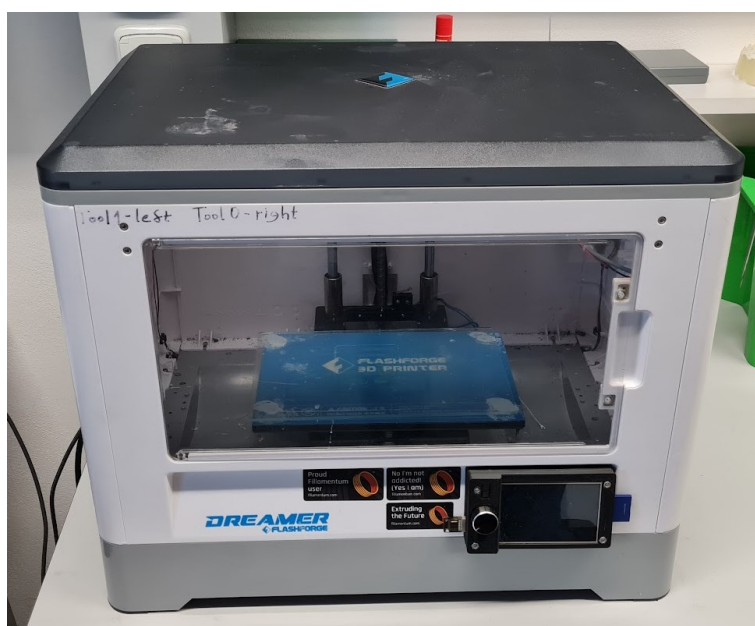
HIPS Signal Red, 750 g, 1,75 mm ± 0,05 mm	
Zpracovatel	Fillamentum
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,05
Index toku taveniny MFR [g/10 min]	26,5 ± 0,8
Index toku taveniny MVR [cm <sup>3</sup> /10 min]	28,7 ± 0,8
Teplota tisku [°C]	230 - 250
Modul pružnosti [MPa]	924 ± 156
Míra elastické deformace [%]	0,6

*Tabulka 3 – Charakteristika materiálu PVA*

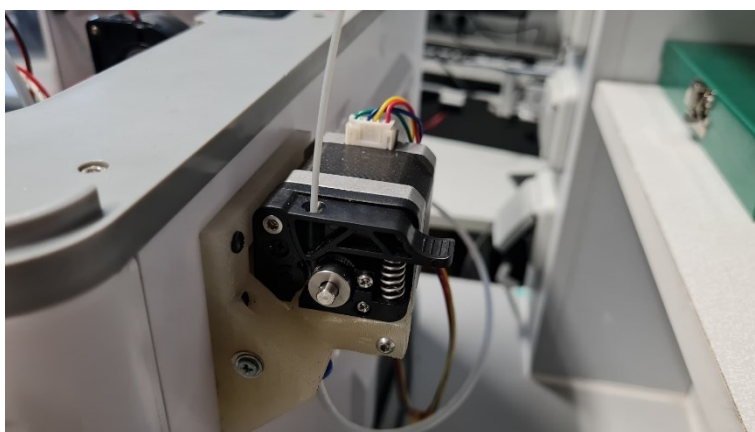
PVA, 600 g, 1,75 mm ± 0,05 mm	
Zpracovatel	XYZprinting
Index toku taveniny MFR [g/10 min]	8,3 ± 0,4
Index toku taveniny MVR [cm <sup>3</sup> /10 min]	8,5 ± 0,7
Teplota tisku [°C]	190
Modul pružnosti [MPa]	75 ± 5
Míra elastické deformace [%]	2,2

## 2.2 FFF tiskárna

V této práci byla použita modifikovaná tiskárna technologie FFF vycházející z komerčně dostupné tiskárny Flashforge Dreamer 2 (obr. 38). Tato tiskárna je vybavena zakrytým tiskovým prostorem, vyhřívanou podložkou a extruderem E3D v6 typu bowden se standardní tryskou o průměru 0,4 mm. Ve výchozím provedení disponuje tato tiskárna dvěma extrudery typu direct. Během postupných úprav byly tyto extrudery odmontovány a motor jednoho z nich byl použit pro coldend extruderu typu bowden. Tato část byla přimontována zvenčí plastového boxu pomocí vytištěného dílu (obr. 39).

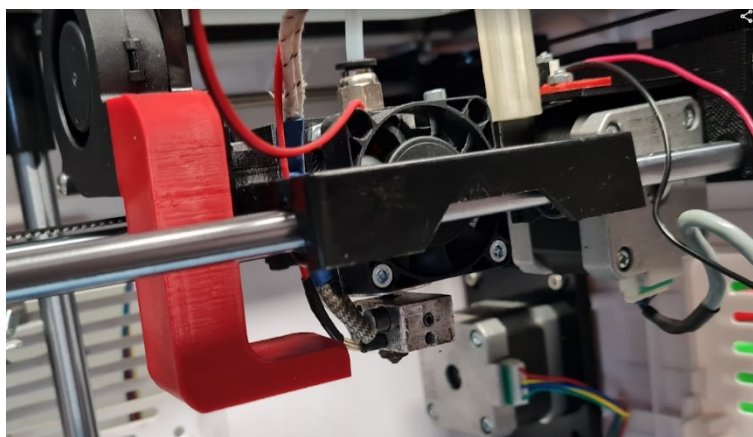


Obrázek 38 – FFF tiskárna

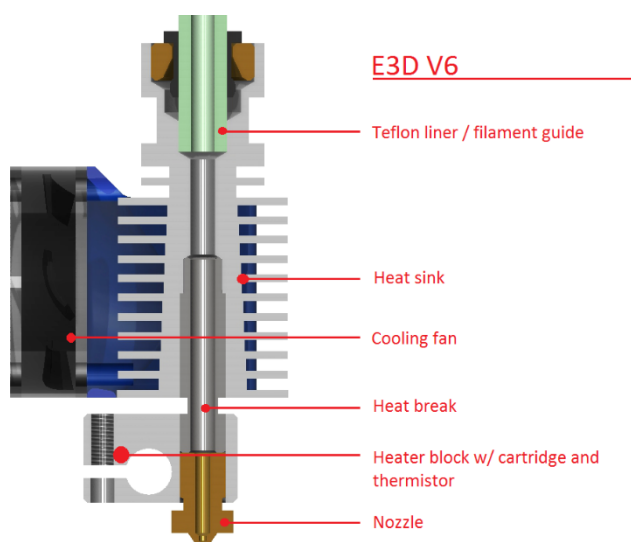


Obrázek 39 – Coldend

Celokovový hotend E3D v6 byl uchycen na místo původních extruderů pomocí vytištěného dílu a za pomoci teflonové trubičky o vnitřním průměru okolo 2 mm propojen s coldendem. Na obrázku 40 je zobrazena tisková hlava. Tento celokovový hotend umožňuje tisk při vyšších teplotách než je 260 °C, jelikož nedochází ke kontaktu teflonové trubičky s rozžhavenou tryskou a nehrozí tak roztavení materiálu uvnitř trubičky či její degradace. Samotný hotend je tvořen chladičem zajišťujícím regulaci teploty, „heatblockem“ (v něm je upevněna tryska, topné těleso a termistor, viz. obrázek 41) a „heatbreakem“, který propojuje chladič s heatblockem a je skrz něj veden materiál do trysky. Teflonová trubička končí v chladiči a přechází v heatbreak. Nejdůležitější části hotendu jsou na obrázku 42. Maximální teplota, kterou může dosáhnout tisková podložka je 130 °C a maximální teplota trysky je 270 °C, po úpravě firmwaru je možno tisknout až při teplotě trysky 300 °C.



Obrázek 40 – Tisková hlava



Obrázek 41 – Schéma hotendu E3D v6



Obrázek 42 – Chladič s hotbreakem, heatblock a tryska

Na tiskové hlavě jsou umístěny dva ventilátory, jeden chladí přímo extruder a druhý je radiální ventilátor určený k ochlazování materiálu vytlačovaného z trysky. Samotná tiskárna je kartézské konstrukce typu XY-hlava, tedy tisková podložka je osa Z a během tisku se posouvá směrem dolů, zatímco tisková hlava se pohybuje do stran v osách X (doprava a doleva) a Y (dopředu a dozadu). Tiskový prostor je přibližně 230 x 150 x 140 mm. Konstrukce je umístěna v plastovém boxu.

Data pro tisk byla do tiskárny vložena na SD kartě, tato tiskárna však umožňuje i připojení k počítači přes USB a poslat data do tiskárny přímo ze sliceru. Tělíška pro tuto práci byla vytvořena v programu Fusion 360 a následně připravena k tisku ve sliceru Cura 5.2.2, který umožňuje v rámci experimentálních funkcí přímé zadávání K-hodnot spolu s ostatními parametry tisku.

### 2.3 Aktivace funkce Linear Advance a přehrání firmwaru 3D tiskárny

Pro optimalizaci pomocí funkce Linear Advance obsažené ve firmwaru Marlin bylo nejprve nutné tuto funkci povolit, neboť ve výchozím nastavení je vypnutá. Funkce byla aktivována otevřením firmwaru Marlin v editoru zdrojového kódu Visual Studio Code a odkomentováním (odstraněním) „//“ na řádku „//#define LINEAR\_ADVANCE“ v souboru „Configuration\_adv.h“. Následně byl řádek „#define LIN\_ADVANCE\_K“ nastaven na hodnotu 0, tedy řádek pak vypadal takto: „#define LIN\_ADVANCE\_K 0“ (viz. obrázek 43). Nastavení této hodnoty na „0“ umožňuje měnit K-hodnotu pro funkci Linear Advance pomocí G-kódu a není tak nutné přehrávat firmware s každou změnou K-hodnoty. Pomocí sliceru Cura 5.2.2 s volně dostupným rozšířením „Linear Advance Settings“ lze K-hodnotu měnit přímo v parametrech tisku.





Minimální délka stěn byla zvolena tak, aby během tisku při vyšší rychlosti byly jednotlivé úseky uvnitř tělíska dostatečně dlouhé pro dosažení maximální rychlosti tisku. Při moc krátkém úseku by tisková hlava nemusela na zhotovovaném úseku dosáhnout námi požadované rychlosti. Tato vzdálenost byla vypočítána pomocí kalkulačky dostupné z [58], kde po zadání požadované rychlosti, hodnoty zrychlení tiskárny a délky úseku je z grafu možné vyčíst, zda tato vzdálenost stačí při daném zrychlení na dosažení požadované rychlosti. Na obrázku 45 je zobrazen profil rychlosti pohybu tiskové hlavy, který byl dle parametrů vygenerován skrz nástroj dostupný z [58].



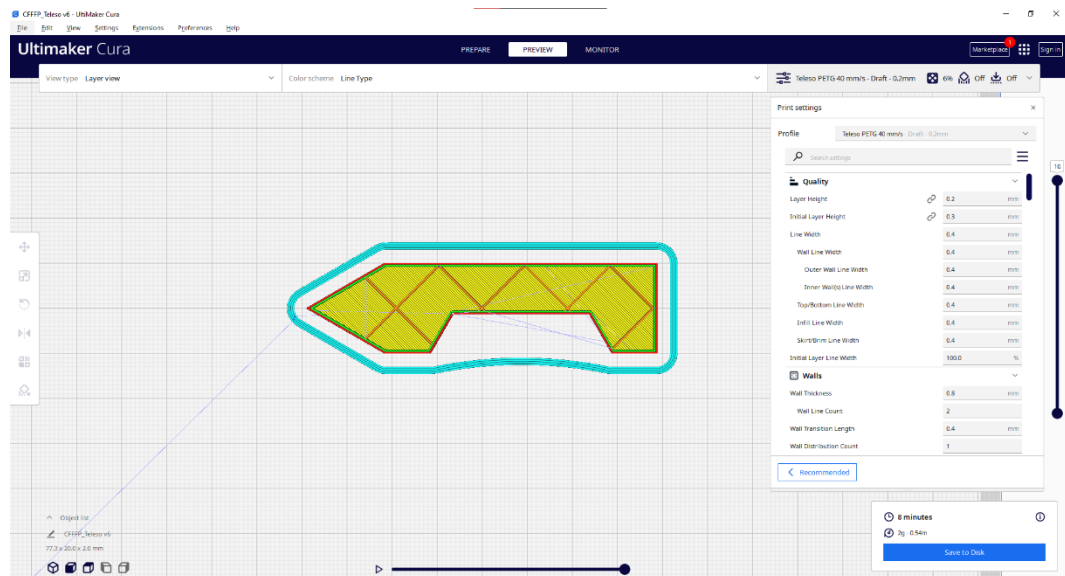
Obrázek 45 – Profil rychlosti pohybu tiskové hlavy [58]

Vidíme, že při zvoleném zrychlení 5000 mm/s<sup>2</sup> je tiskárna schopna na úseku o délce 15 mm dosáhnout požadované rychlosti 120 mm/s po uražení vzdálenosti cca 1,5 mm a udržovat ji na úseku přibližně 12 mm. Posledních 1,5 mm tisková hlava zpomaluje zpět na nulovou rychlost.



## 2.5 Parametry tisku a tisk zkušebních tělísek

Parametry tisku zkušebních tělísek byly zvoleny na základě parametrů 3D tiskárny. Tloušťka nanášené vrstvy byla zvolena 0,2 mm a rychlosti tisku byly zvoleny 40 mm/s a 120 mm/s pro všechna tělíska ze všech testovaných materiálů. Pro lepší přilnavost tělísek k tiskové podložce byla rychlost tisku počáteční vrstvy nastavena na 20 mm/s. Toto snížení umožňuje materiálu lépe přilnout k podložce a vytvoření kvalitní první vrstvy, která slouží jako podklad pro další nanášené vrstvy.



Obrázek 46 – Náhled zkušebního tělesa v programu Cura

Výška tělesa byla zvolena 2 mm. Při zvolené tloušťce nanášené vrstvy 0,2 mm odpovídá pak výška tělesa 10 tištěným vrstvám. Tělesa byla pro lepší vizuální posouzení výsledné kvality tištěna bez horní vrstvy, což umožňuje posouzení kvality tisku i uvnitř zhotovovaného výrobku. Obrázek 46 zobrazuje prostředí programu Cura verze 5.2.2 se zkušebním tělískem. Zvolené parametry tisku společné pro všechny materiály jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4 – Parametry tisku společné pro všechny materiály

Výška vrstvy [mm]	0,2
Výška počáteční vrstvy [mm]	0,3
Tloušťka tištěné linky [mm]	0,4
Tloušťka stěny (2 linky) [mm]	0,8
Tloušťka spodu tělesa [mm]	0,8
Hustota výplně [%]	6
Vzor výplně	Grid
Rychlosti tisku [mm/s]	40 / 120

Další parametry tisku byly pro každý materiál určeny zvlášť pomocí experimentálního tisku tělísek, vizuálního posouzení kvality zhotoveného objektu a případné úpravě parametrů jako je teplota tiskové hlavy, podložky nebo velikost parametru retrakce. Jako retrakce se označuje zpětný chod motoru extruderu během kterého je tisková struna natahována zpátky, což vede ke snížení tlaku v tiskové hlavě a zastavení dávkování materiálu. Toho je využíváno zejména pro zabránění vzniku vláknitých přetoků – „vlásků“ (tzv. stringing). U flexibilních materiálů (v případě této práce u PVA) však za použití extruderu typu bowden musí být retrakce vypnuté, neboť vlivem pružení materiálu uvnitř teflonové trubičky podstatně zhoršují kvalitu tisku. Parametry pro jednotlivé materiály obsahuje tabulka 5.

*Tabulka 5 – Parametry tisku pro dané materiály*

<b>PETG</b>	
Teplota trysky	240 °C
Teplota podložky	60 °C
Rychlost retrakce	40 mm/s
Délka retrakce	6 mm
<b>HIPS</b>	
Teplota trysky	250 °C
Teplota podložky	90 °C
Rychlost retrakce	40 mm/s
Délka retrakce	6 mm
<b>PVA</b>	
Teplota trysky	195 °C
Teplota podložky	40 °C
Rychlost retrakce	vypnuto
Délka retrakce	vypnuto

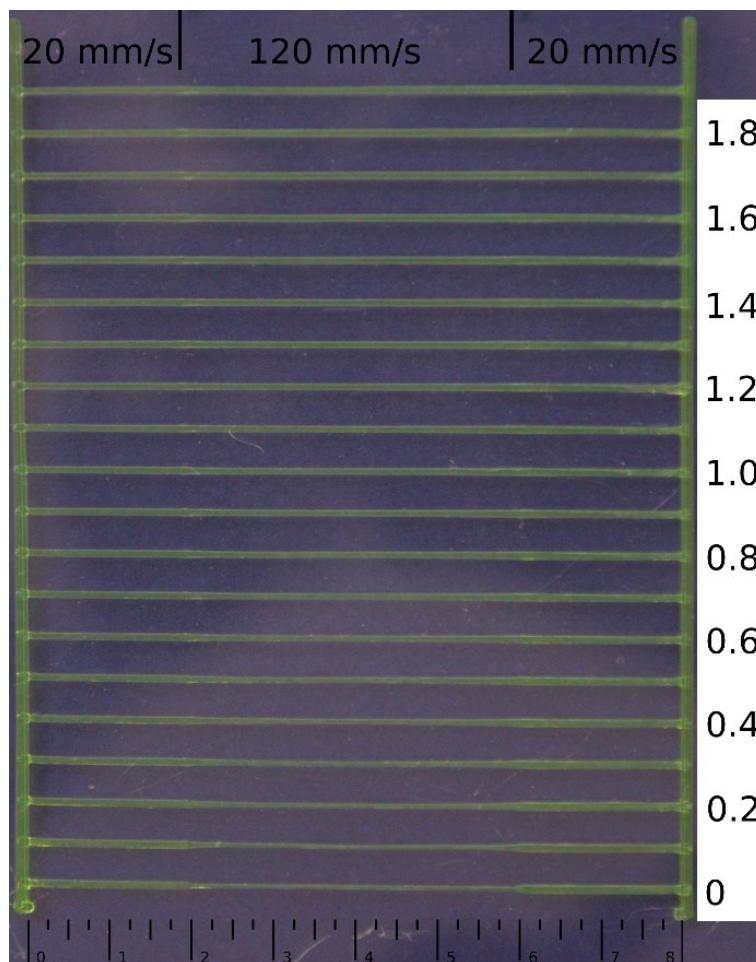
## 2.6 Stanovení K-hodnot

Zjištění K-hodnot pro daný materiál spočívá ve vytištění vzoru generovaného skrz nástroj dostupný z [59]. Pomocí tohoto nástroje je možné vygenerovat G-kód, podle kterého tiskárna vytiskne několik linek s postupně se měnící K-hodnotou a rychlostí tisku. Pro tuto práci byla k optimalizaci využita funkce Linear Advance verze 1.5. Pro správné vygenerování G-kódu je třeba nastavit průměr tiskové struny, průměr trysky, teplotu tiskové podložky a trysky, velikost a rychlost retrakce, výšku vrstvy a rychlost ventilátoru chladícího materiálu. Dále je potřeba správně zadat velikost tiskové plochy, která v tomto případě činí 230 mm v ose X a 150 mm v ose Y. Následuje nastavení samotného vzoru ke zjištění K-hodnot, zde je možné nastavit rozsah ve kterých se budou měnit K-hodnoty pro linky, velikost tištěných linek, změny rychlosti a zrychlení tiskové hlavy. Pro práci byl využit standartní vzor. Rychlost tisku, zrychlení tiskové hlavy a velikost tištěných linek byly pro všechny materiály nastaveny na stejné hodnoty, zbylé hodnoty byly upravovány pro každý materiál. Hodnoty společných nastavení jsou uvedeny v tabulce 6. Teploty tiskové podložky a trysky, rychlost a velikost retrakce pro každý materiál byly nastaveny dle parametrů tisku zjištěných experimentálně, viz. předchozí tabulka 5.

*Tabulka 6 – Hlavní nastavení společná pro všechny materiály*

Průměr tiskové struny	1,75 mm
Průměr trysky	0,4 mm
Výška vrstvy	0,2 mm
Nízká rychlost tisku	20 mm/s
Vysoká rychlost tisku	120 mm/s
Akcelerace	5000 mm/s

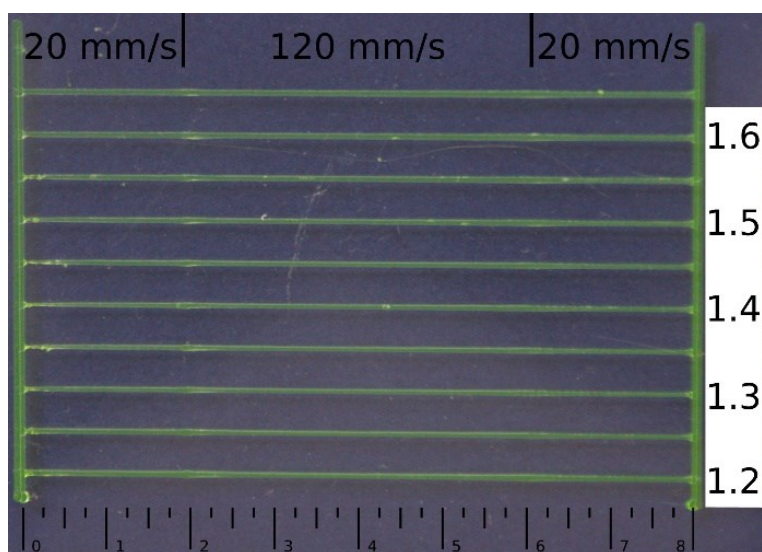
Po vygenerování G-kódu s nastavenými parametry byl G-kód nahrán na SD kartu, vložen do tiskárny a byl vytištěn vzor pro určení K-hodnot. Postup určování je následující. Pro každý materiál bylo vyhotoveno několik vzorů, kdy rozsah K-hodnot následujícího vzoru byl upraven na základě výsledků předchozího vzoru. Každý vzor se skládá z několika linek s postupně rostoucí K-hodnotou. Na počátku je nejnižší K-hodnota. U prvního vzoru je tato hodnota „0“ pro každý materiál, u druhého zvolena dle výsledků z prvního. S touto hodnotou vytiskne tiskárna linku, kdy prvních 20 mm je rychlost tisku 20 mm/s, po tomto úseku následuje 40 mm, na kterých tisková rychlost dosáhne 120 mm/s a následuje dalších 20 mm/s, kde tisková rychlost opět klesne na 20 mm/s. Poté následuje další linka s vyšší K-hodnotou (viz. Obrázek 47).



Obrázek 47 – Vzor pro zjištění K-hodnot (rozmezí 0 – 1,9) pro materiál PETG

Při pohledu na vytištěné linky jsou patrné jejich tři hlavní úseky, které jsou naznačeny čarami nahoře. Dole je měřítko v cm. Linky jsou tištěny zleva doprava a K-hodnota stoupá odspoda nahoru (osa s hodnotami vpravo). V prvním úseku linky, kde je tisková rychlost 20 mm/s, je materiál dávkován konzistentně. Při přechodu na vyšší rychlost 120 mm/s však naroste tlak v trysce, což se projeví nekonzistentním dávkováním materiálu a vytvoří se „hrudka“ uvnitř linky – materiálu je zde dávkováno více, než by mělo. Následně však při vyšší rychlosti tisková hlava při příliš nízké K-hodnotě nedávkuje dostatečné množství materiálu a linka má menší průměr než by měla mít (patrné na obrázku 47 zejména u K-hodnot 0 – 0,4). Příliš vysoká K-hodnota naopak vede u vyšší rychlosti k dávkování nadměrného množství materiálu, což je patrné na obrázku u K-hodnoty 1,9. Po rychlejším úseku nastává opět pomalejší úsek s tiskovou rychlostí 20 mm/s, kdy opět dochází k nekonzistentnímu dávkování materiálu a vzniku „hrudky“, po chvíli se dávkování zase srovná. Největší rozdíly jsou tedy patrné na rozmezí jednotlivých rychlostních úseků a uvnitř úseku o vyšší tiskové rychlosti.

Vyhodnocení vytisknutého vzoru se provádí vizuálně. Je hledána co nejnižší K-hodnota, při které je dávkování materiálu v průběhu tisku linky víceméně konstantní. Pokud je K-hodnota příliš nízká, je linka v úseku 120 mm/s užší než v úsecích 20 mm/s. Pokud je příliš vysoká, je situace opačná. Na obrázku 47 je vzor pro určení K-hodnot pro materiál PETG. K-hodnota zde stoupá od 0 až k 1,9 po stupních o velikosti 0,1. Z tohoto obrázku byla optimální K-hodnota pro materiál PETG vyhodnocena v intervalu 1,2 až 1,7. Proto byl vytištěn ještě jeden vzor s K-hodnotami v tomto úseku, kde stoupaní bylo po stupních o velikosti 0,05 (obr. 48).



Obrázek 48 – Vzor pro zjištění K-hodnot (rozmezí 1,2 – 1,65) pro materiál PETG

Z tohoto vzoru byla jako optimální pro materiál PETG vyhodnocena K-hodnota 1,45. Ta byla následně využita pro zhotovení zkušebního tělíska z PETG s optimalizací pomocí funkce Linear Advance. Stejným způsobem byly zjištěny hodnoty pro materiály PVA a HIPS. Vždy byl vytištěn počáteční vzor s K-hodnotami v rozmezí 0 až 1,9 po stupních o velikosti 0,1 a další vzory byly vytištěné s upraveným rozmezím pro přesnější zjištění optimálních hodnot, viz. kapitola 3.1.

## 2.7 Metody testování

Pro porovnání získaných optimálních K-hodnot jednotlivých materiálů byly pro materiály stanoveny indexy toku taveniny. Dále byl zjištěn modul pružnosti a míra elastické deformace jednotlivých tiskových strun z důvodu vlivu flexibility materiálů na dávkování materiálu skrz teflonovou trubičku extruderu typu bowden.

### 2.7.1 Stanovení indexu toku taveniny

Index toku taveniny udává množství taveniny, které proteče tryskou za 10 minut při daných podmínkách zkoušky. Toto množství může být udáváno buď v gramech – MFR (hmotnostní index toku) nebo v cm<sup>3</sup> – MVR (objemový index toku). Během stanovení indexu toku je měřen čas, za který je skrz trysku plastometru protlačeno dané množství roztaveného termoplastického materiálu. Stanovení probíhalo na výtlačném plastometru M201. Jako teplota komory pro jednotlivé materiály byly zvoleny teploty, na které byla vyhráta tryska FFF tiskárny během tisku zkušebních tělísek – pro HIPS 250 °C, pro PETG 240 °C a pro PVA 195 °C. Jako závaží bylo zvoleno nejnižší zatížení – 2,16 kg. Vytlačené množství materiálu je zváženo a jsou vypočítány MFR a MVR dle vzorců:

$$MFR = \frac{2,54 \cdot 427 \cdot d}{t} \quad [\text{g}/10 \text{ min}]$$

$$d = \frac{m}{1,804}$$

$$MVR = \frac{2,54 \cdot 427}{t} \quad [\text{cm}^3/10 \text{ min}]$$

kde t je čas, m je hmotnost vytlačeného vzorku za čas t v gramech, d je hustota. Podmínky měření: velikost čtecího kruhu – 2,54, závaží – 2,16 kg, konstanta komory – 427.

### 2.7.2 Zkouška tahem

Zkouška v tahu byla provedena na trhacím přístroji Instron 5500R. Tento přístroj umožňuje testování materiálů o pevnosti v tahu nepřekračující 5 kN. Přístroj je ovládán pomocí speciálního softwaru Bluehill 2 na počítači. Export zpracovaných dat je možný ve Wordu či Excelu a přístroj umožňuje i export prvotních dat do Excelu.

Pro zkoušku byla vytvořena metoda s upínací délkou 50 mm a rychlostí posunu příčnicku 2 mm/min. Měřeny byly vzorky tiskových strun materiálů PETG, PVA a HIPS o průměru 1,75 mm. Pro materiály byl zjišťován modul pružnosti (MPa) a míra elastické deformace (%) tiskových strun. Tyto vlastnosti charakterizují chování tiskové struny během tisku uvnitř trubičky bowden extruderu. Vlivem tlačení tiskové struny motorem coldendu do trubičky u extruderů typu bowden

dochází uvnitř trubičky k elastické deformaci. To způsobuje problémy během tisku, které se projevují nedostatečným dávkováním materiálu. Ze stejného důvodu musí být během tisku vysoce elastických materiálů u bowden extruderů vypnuté retrakce. Při retrakcích je tisková struna natahována motorem zpět a opět dochází k elastické deformaci. Během tisku se zapnutými retrakcemi dochází k neustálému střídání natlačování materiálu do trysky a natahování zpět.

Měření pro každý typ materiálu bylo prováděno nejméně 5x. Pro uchycení vzorků byly použity čelisti s pneumatickým upínáním s vrstvou jemného brusného papíru a tlakem čelistí 0,6 MPa. Pro materiály PETG a HIPS byly mezi čelisti uchyceny distanční vložky, aby čelisti zcela nedeformovaly vzorky tiskové struny a nedocházelo ke vzniku krčku uvnitř čelistí. U struny z PVA distanční vložky nebyly nutné.

### 2.7.3 Mikroskop

Pro posouzení úspěšnosti provedení optimalizace byly pořízeny snímky rohů tělísek před a po optimalizaci na vědeckém mikroskopu NU II JenaZeiss se čtyřnásobným zvětšením. Fotky jsou obsaženy v kapitole 3.2.

### 3. Výsledky a diskuse

#### 3.1 K-hodnoty

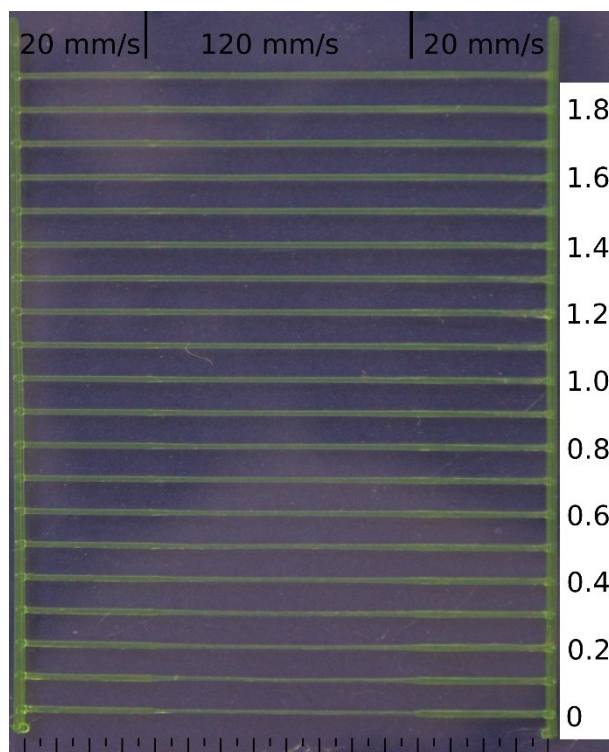
Optimální K-hodnoty byly zjištěny experimentálně pomocí vizuálního posouzení vytištěných vzorů vygenerovaných pomocí nástroje [59]. Na následujících obrázcích 49 - 55 jsou znázorněny vytištěné vzory a optimální K-hodnoty pro jednotlivé materiály. Nahoře jsou naznačeny 3 úseky rychlosti tisku linky, vpravo jsou K-hodnoty vytištěných linek a dole je měřítko v centimetrech. Fotky byly pořízeny fotoaparátem Canon EOS 60D. Tabulka 7 obsahuje K-hodnoty zjištěné pro dané materiály.

Tabulka 7 – K-hodnoty pro dané materiály

Materiál	K-hodnota
PETG	1,45
HIPS	0,6
PVA	3,3

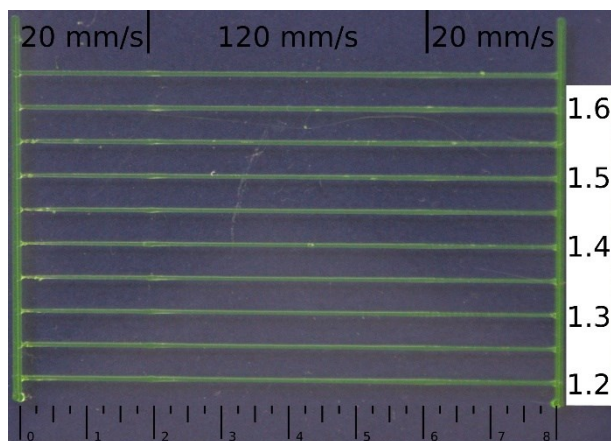
##### 3.1.1 PETG

Pro materiál PETG byl vytištěn vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 po stupních 0,1 (obr. 49). Optimální K-hodnota se jevila v intervalu 1,2 - 1,7. Pro přesnější určení byl vytištěn vzor o tomto rozmezí po stupni o velikosti 0,05 (obr. 50). Z něj byla jako optimální K-hodnota určena hodnota 1,45.



Obrázek 49 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 (PETG)

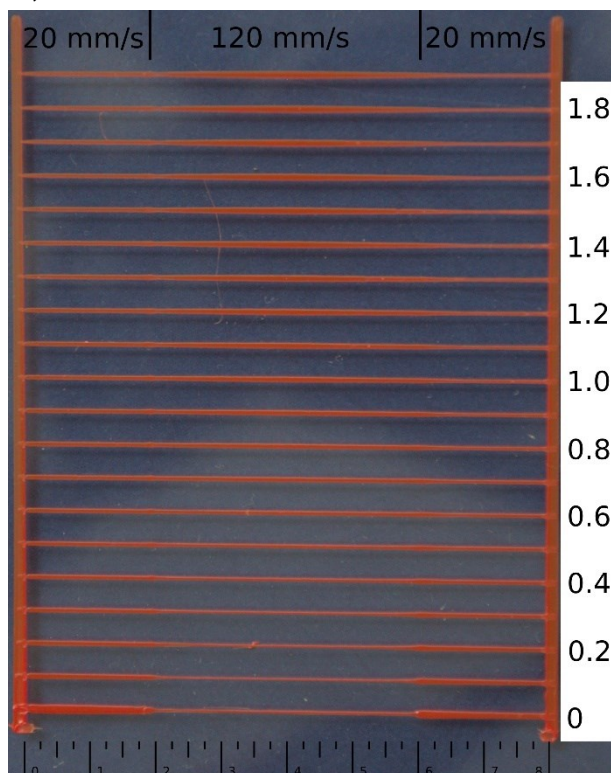




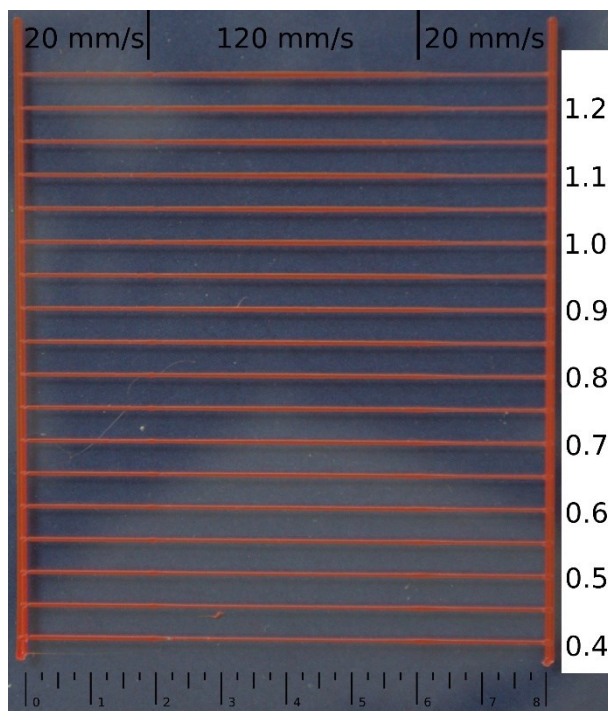
Obrázek 50 – Vzor v rozmezí K-hodnot 1,2 - 1,65 (PETG)

### 3.1.2 HIPS

Vzor pro materiál HIPS byl vytištěn v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 po stupních 0,1 (obr 51). Druhý vzor byl pro přesnější určení K-hodnoty vytištěn v intervalu 0,4 - 1,3 po stupních 0,05 (obr. 52). Optimální K-hodnota pro materiál HIPS byla určena jako 0,6.



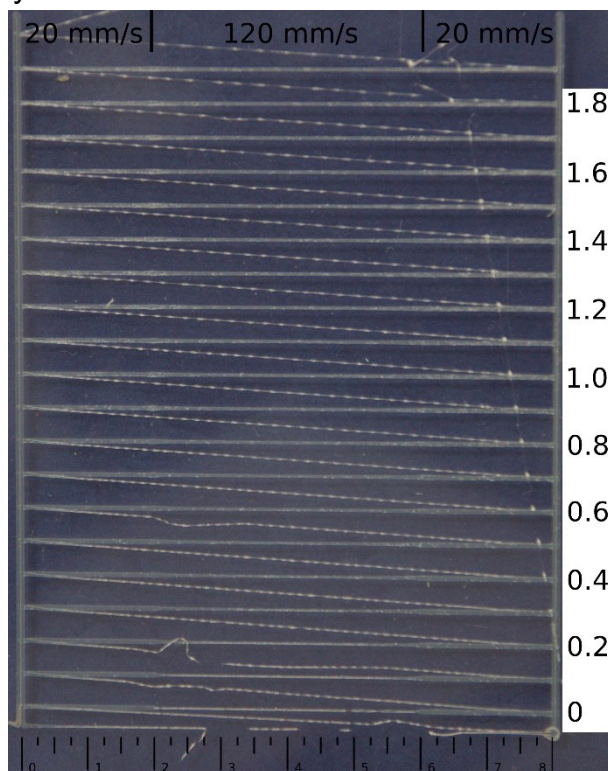
Obrázek 51 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 (HIPS)



Obrázek 52 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0,4 - 1,25 (HIPS)

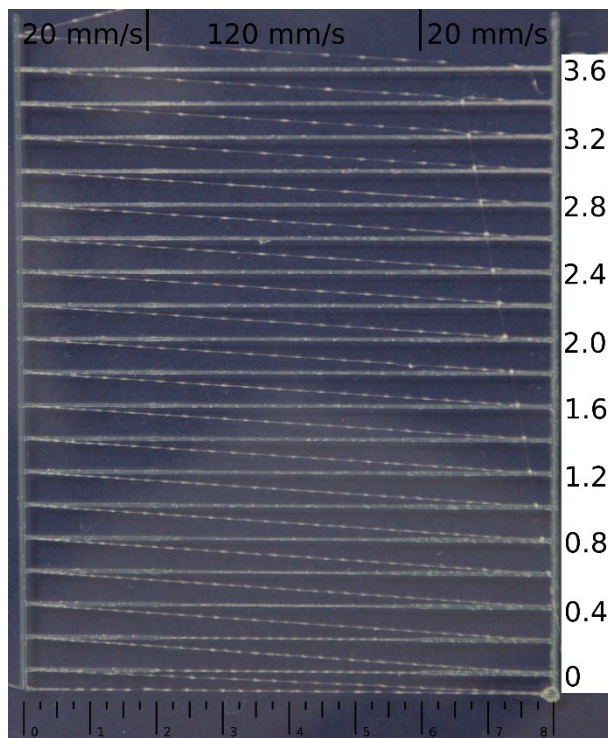
### 3.1.3 PVA

První vzor pro materiál PVA byl vytištěn v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 po stupních 0,1 (obr. 53). Z něj bylo zjištěno, že optimální K-hodnota leží nad tímto intervalem, neboť i při K-hodnotě 1,9 docházelo k nedostatečnému dávkování materiálu v úseku při rychlosti 120 mm/s.

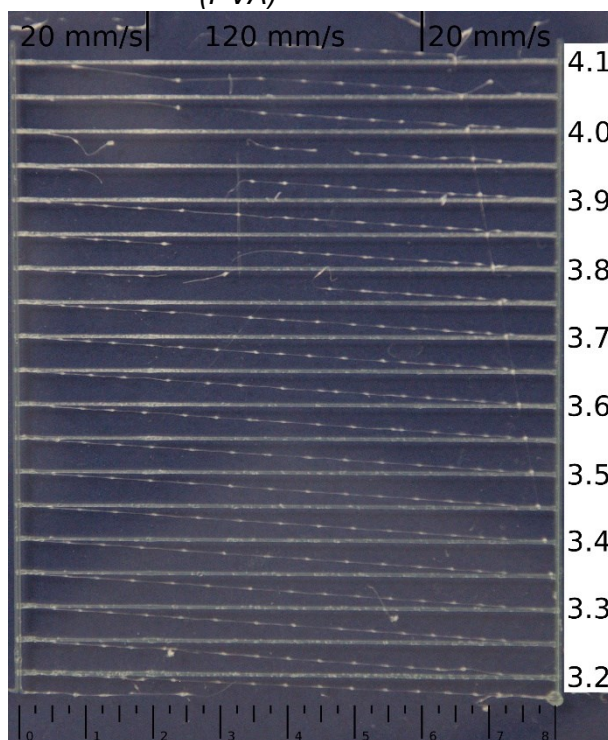


Obrázek 53 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 1,9 (PVA)

Následně byl zhotoven druhý vzor o intervalu K-hodnot 0 - 3,6 po stupních 0,2 (obr. 54). Z něj bylo určeno, že optimální hodnota se nachází v intervalu od 3,2 a výše. Proto byl vytištěn další vzor pro interval 3,2 - 4,1 po stupních 0,05 (obr. 55). Po vyhodnocení linek byla jako optimální K-hodnota pro materiál PVA určena hodnota 3,3.



Obrázek 54 – Vzor v rozmezí K-hodnot 0 - 3,6 (PVA)



Obrázek 55 – Vzor v rozmezí K-hodnot 3,2 - 4,1 (PVA)



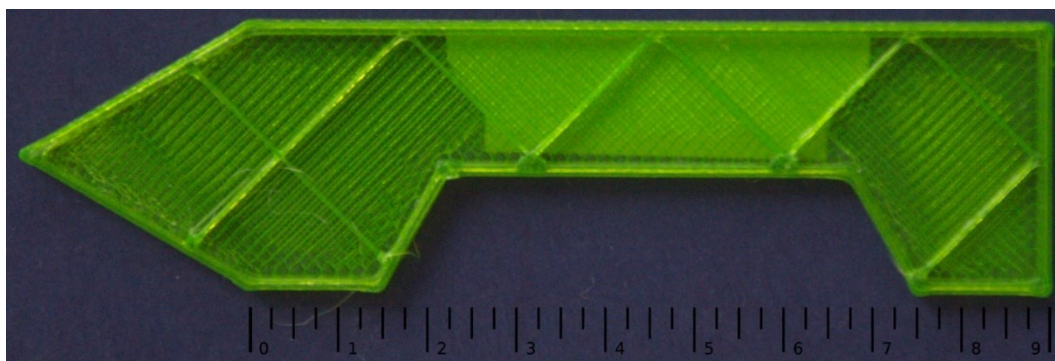
## 3.2 Porovnání tělísek před optimalizací a po optimalizaci

Následuje porovnání tělísek před optimalizací a po provedení optimalizace pomocí funkce Linear Advance. Na fotkách jsou přiložena vytištěná tělíska pro všechny materiály při rychlostech tisku 40 mm/s a 120 mm/s.

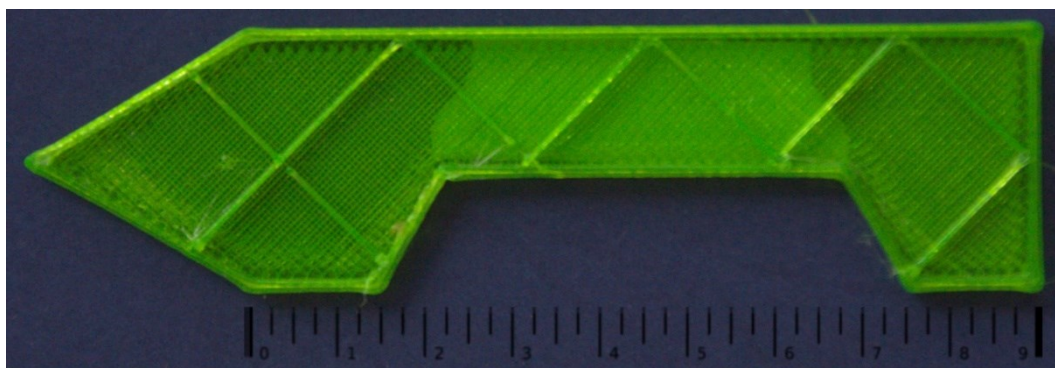
Všechna tělíska byla nafocena a jejich fotky jsou porovnány v této práci. Fotky těles byly pořízeny fotoaparátem Canon EOS 60D. Vědeckým mikroskopem s čtyřnásobným zvětšením a namontovaným fotoaparátem byly nafoceny všechny jejich rohy a případné vady, které se projevily uvnitř stěn tělísek. Z důvodu velkého množství fotek (přes 216) jsou však v této práci porovnány jen některé rohy, na kterých byla u tělísek před a po optimalizaci patrná největší změna. Zbylé fotky jsou obsaženy v přílohách v elektronické podobě.

### 3.2.1 PETG

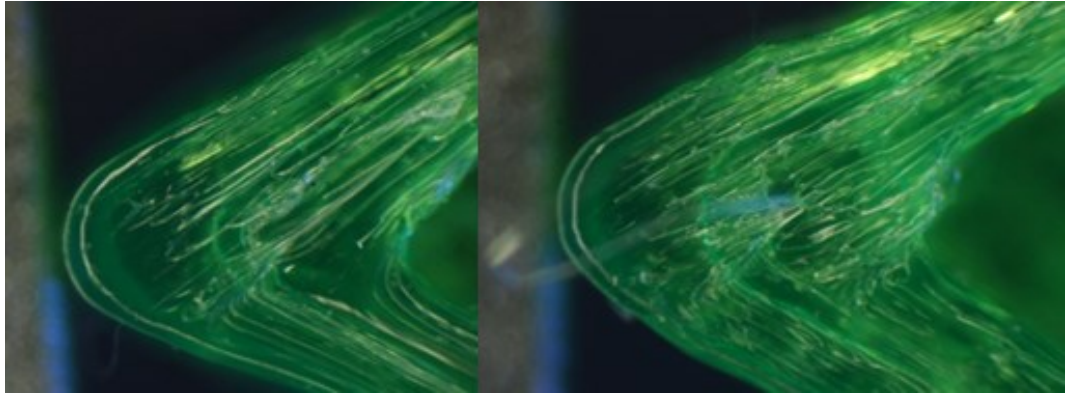
Obrázky 56 a 57 zobrazují tělíska zhotovená při rychlosti tisku 40 mm/s. Ke zlepšení díky optimalizaci funkcí Linear Advance došlo zejména v rozích tělísek. To je patrné na obrázcích 58 až 60, které zobrazují rohy těles před a po optimalizaci. Vlivem optimalizace dávkování materiálu nedochází v rozích tělísek k tak velkému vyboulení, jako u tělísek bez optimalizace.



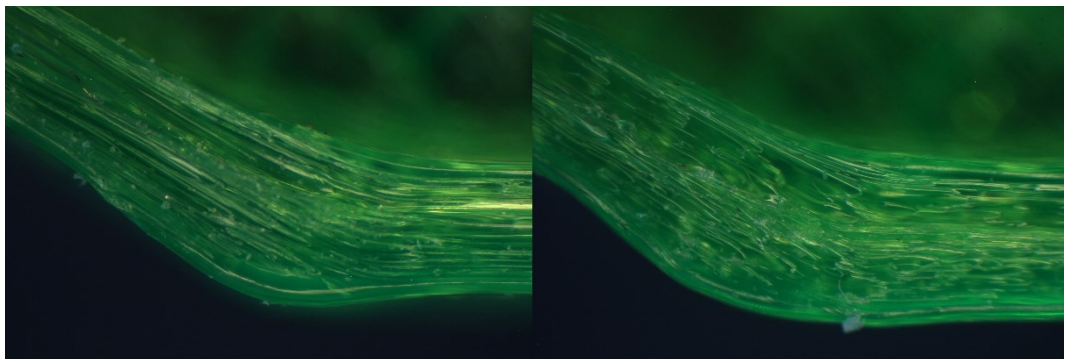
Obrázek 56 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, bez optimalizace (PETG)



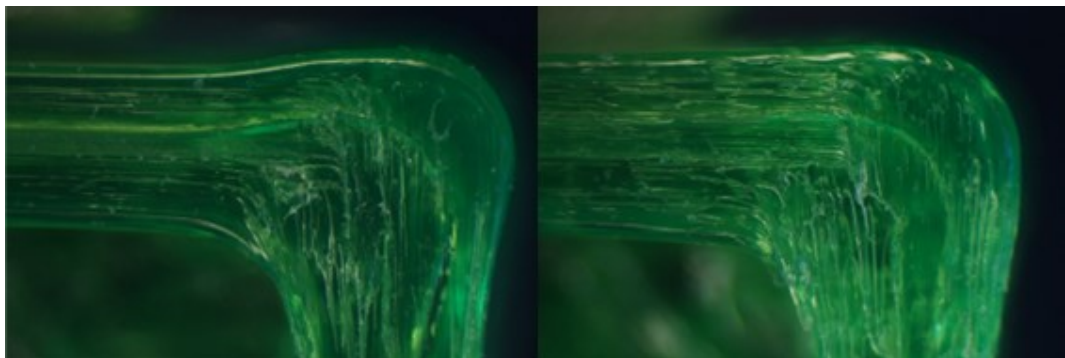
Obrázek 57 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, po optimalizaci (PETG)



Obrázek 58 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 40 mm/s (PETG)



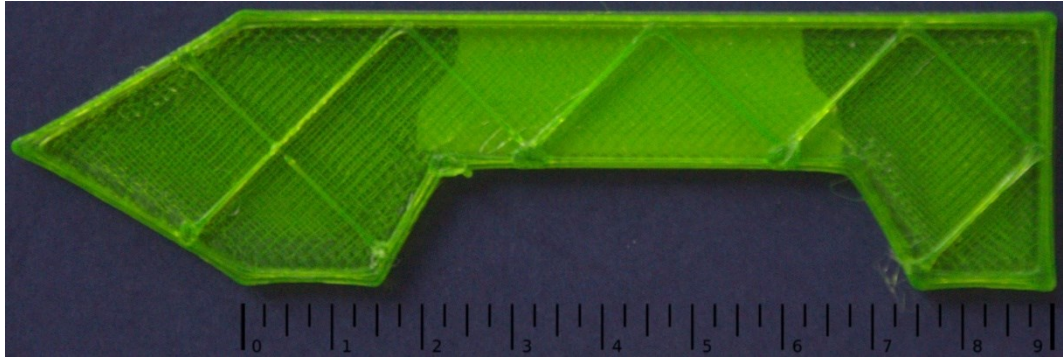
Obrázek 59 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 40 mm/s (PETG)



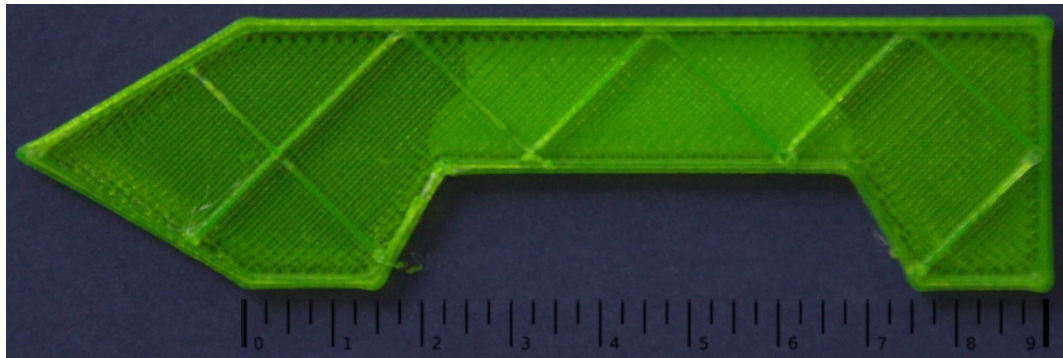
Obrázek 60 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 40 mm/s (PETG)

Při rychlosti tisku 120 mm/s se optimalizace dávkování materiálu projevila více. Na obrázcích 61 a 62 jsou vyobrazena tělíska při rychlosti tisku 120 mm/s. U těles bez optimalizace je, zejména u kratších stěn v dolní části těles, patrné lehké zakřivení stěn vlivem špatného dávkování materiálu. U tisku s optimalizací došlo k jejich narovnání. Zlepšení je patrné i v rozích zhotovovaných těles (obrázky 63 až 65).

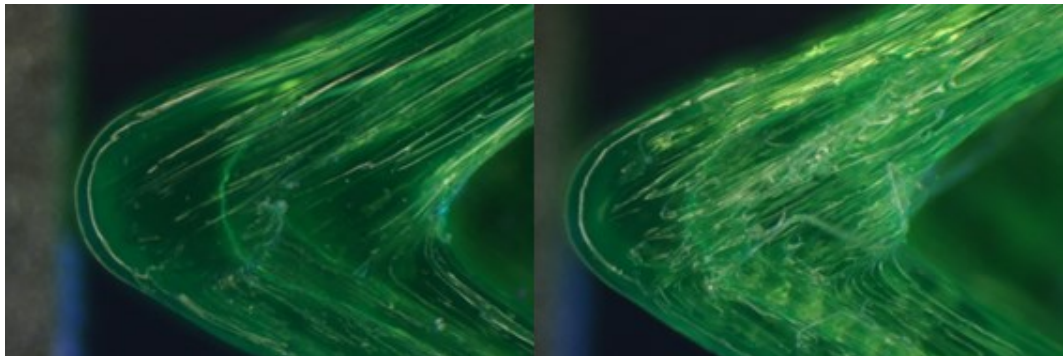




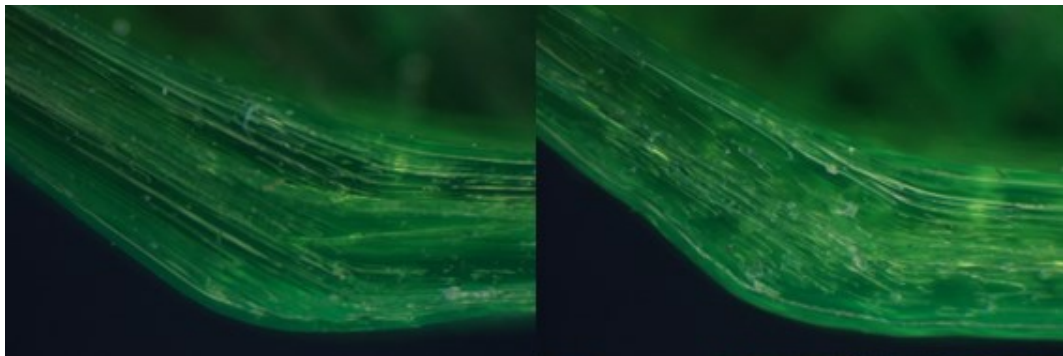
Obrázek 61 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, bez optimalizace (PETG)



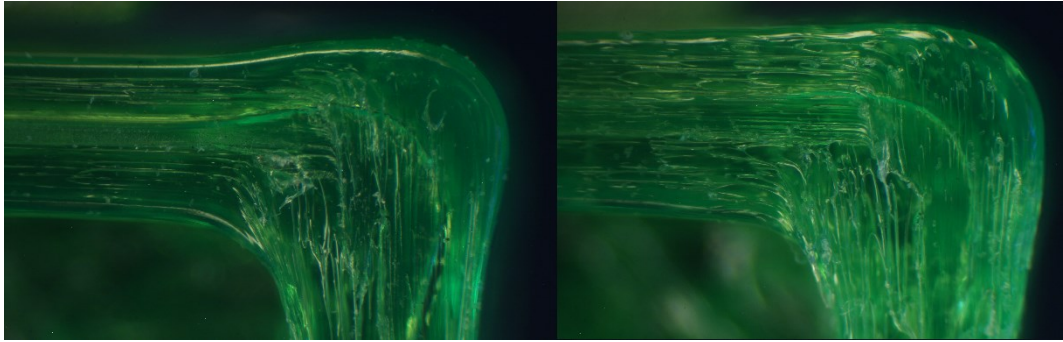
Obrázek 62 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, po optimalizaci (PETG)



Obrázek 63 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (PETG)



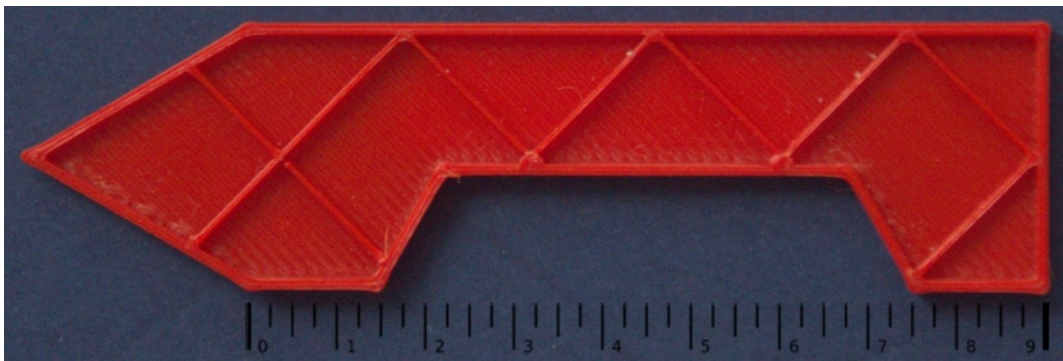
Obrázek 64 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (PETG)



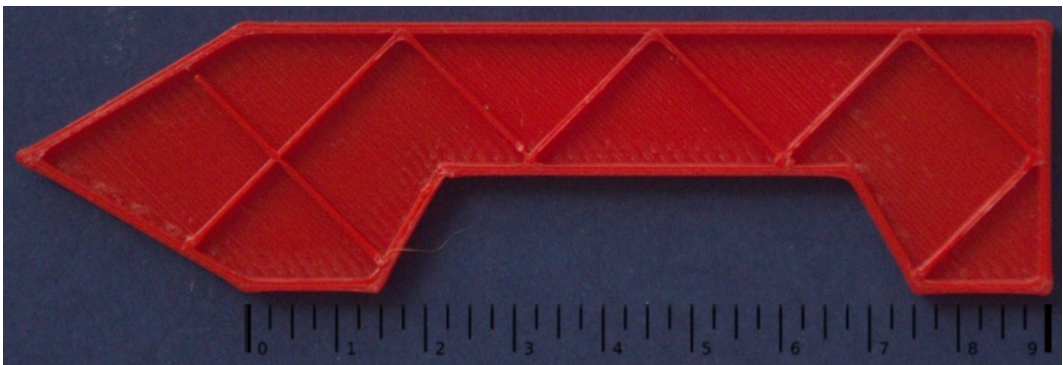
Obrázek 65 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (PETG)

### 3.2.2 HIPS

Tělíska zhotovená při rychlosti tisku 40 mm/s jsou znázorněny na obrázcích 66 a 67. Obdobně jako u materiálu PETG došlo optimalizací při rychlosti tisku 40 mm/s ke zlepšení zejména v rozích tělísek. To je patrné na obrázcích 68 až 70, které zobrazují rohy těles před a po optimalizaci. Vlivem predikce dávkování materiálu pomocí optimalizace nedochází k tak velkému vyboulení rohů jako u tělísek bez optimalizace.

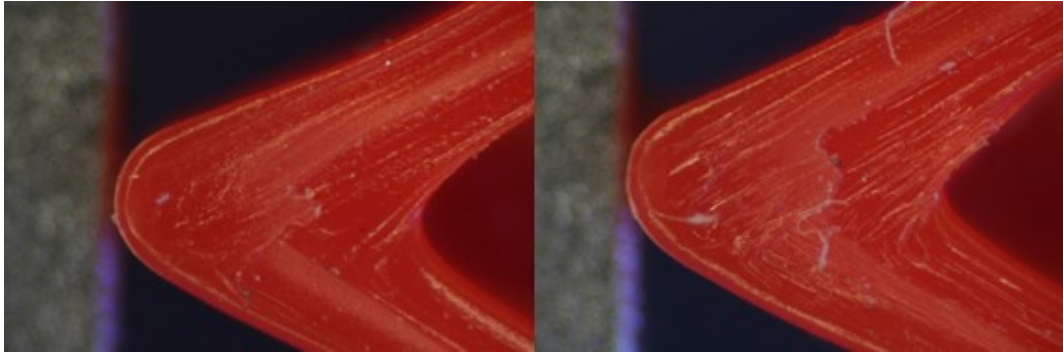


Obrázek 66 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, bez optimalizace (HIPS)

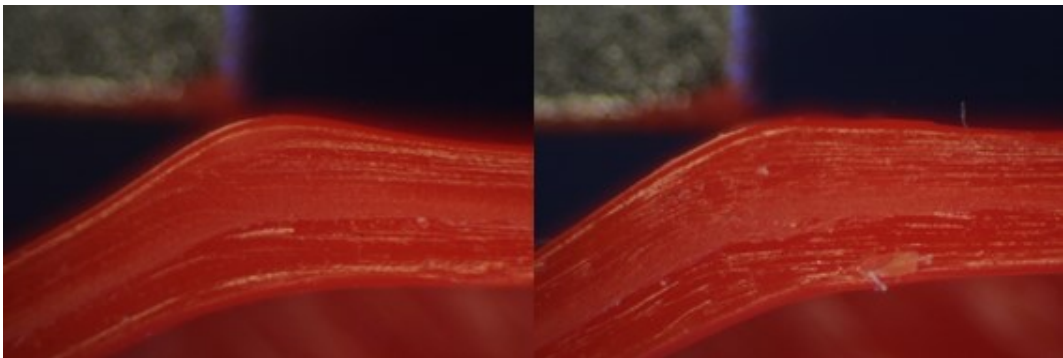


Obrázek 67 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, po optimalizaci (HIPS)

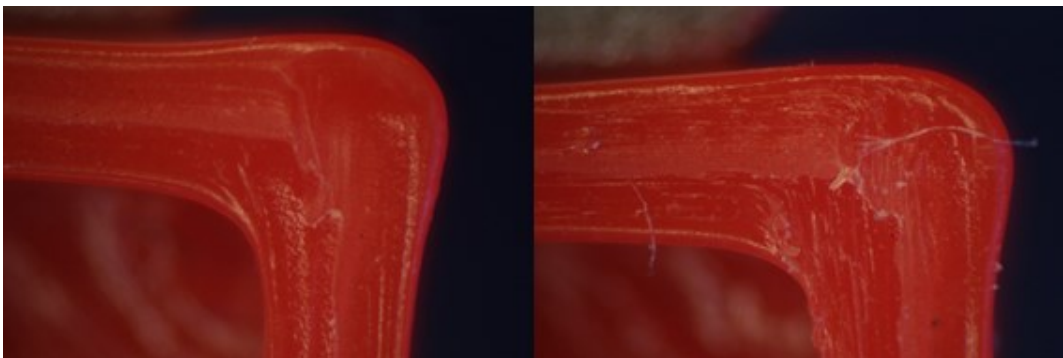




Obrázek 68 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 40 mm/s (HIPS)



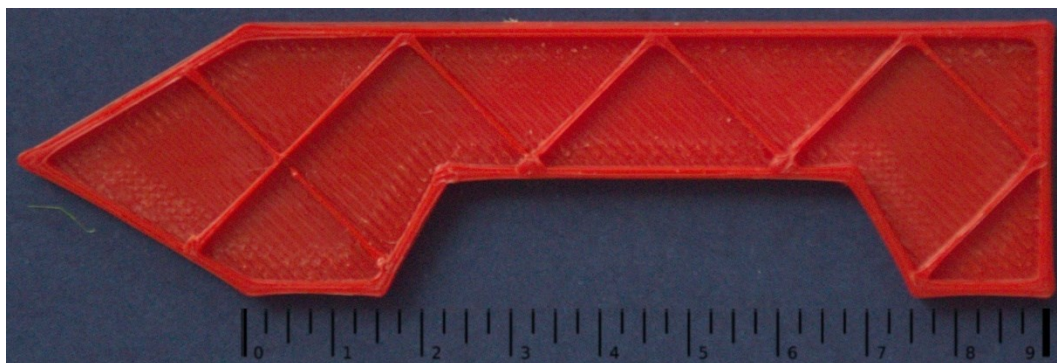
Obrázek 69 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 40 mm/s (HIPS)



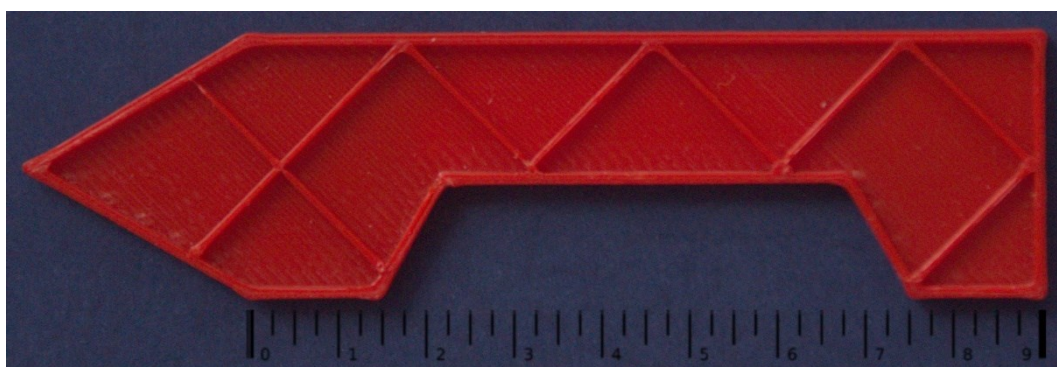
Obrázek 70 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 40 mm/s (HIPS)

Při rychlosti tisku 120 mm/s se zlepšení vlivem optimalizace dávkování materiálu projevilo více. Na obrázcích 71 a 72 jsou vyobrazena tělíska při rychlosti tisku 120 mm/s. Zejména u kratších stěn tělísek bez optimalizace je patrné jejich zakřivení. U těles s optimalizací došlo k jejich narovnání. Zlepšení je patrné v rozích zhotovovaných těles (obrázky 73 až 75), které u těles zhotovených s optimalizací nejsou tolik vypouklé jako u tělísek bez optimalizace. Při vyšší rychlosti se projevilo i nedostatečné dávkování materiálu uvnitř stěn objektu. Optimalizace tento problém vyřešila (obr. 76).

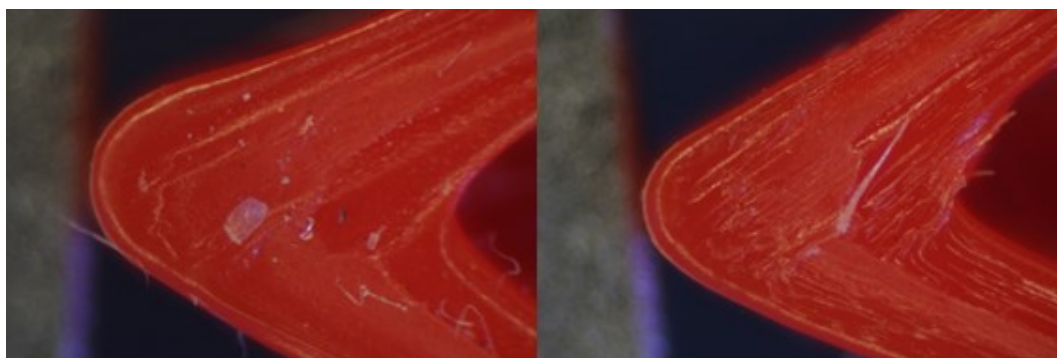




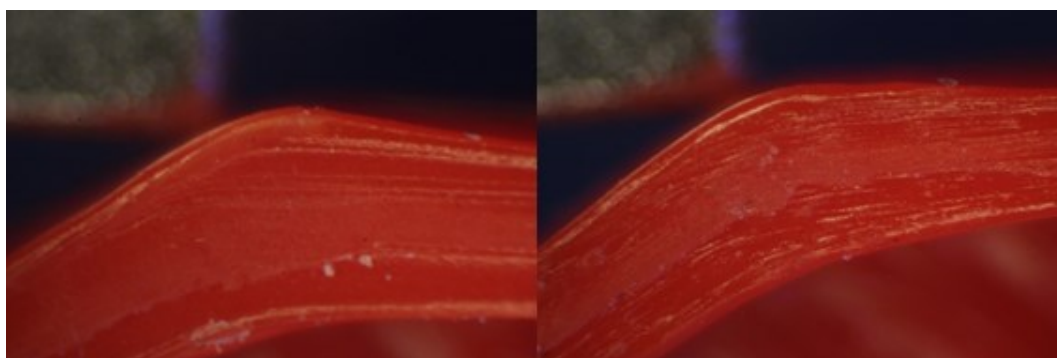
Obrázek 71 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, bez optimalizace (HIPS)



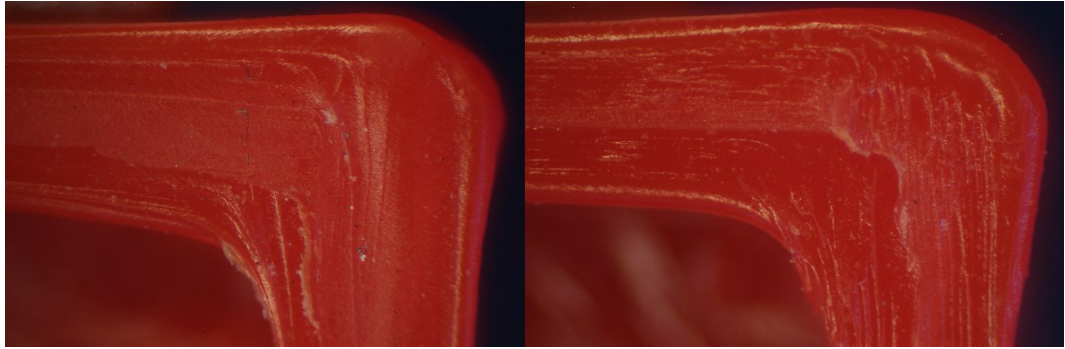
Obrázek 72 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, po optimalizaci (HIPS)



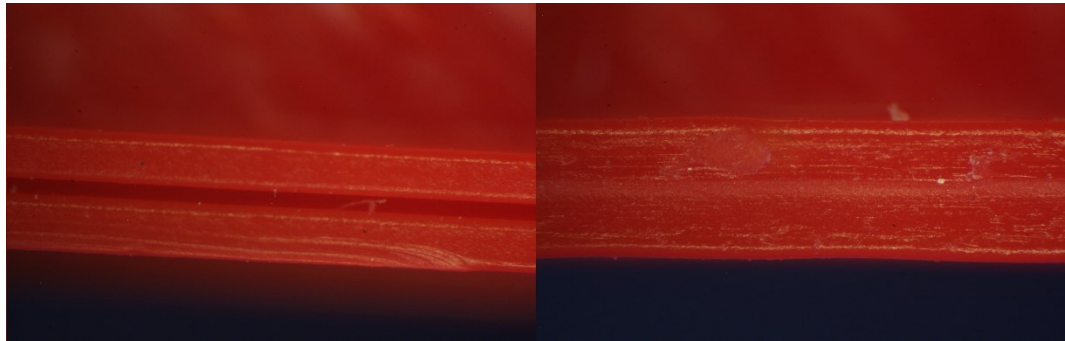
Obrázek 73 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (HIPS)



Obrázek 74 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (HIPS)



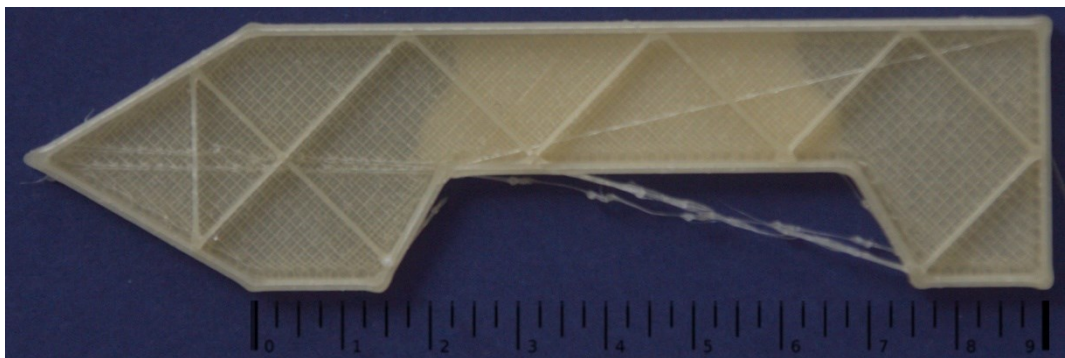
Obrázek 75 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (HIPS)



Obrázek 76 – Stěna tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (HIPS)

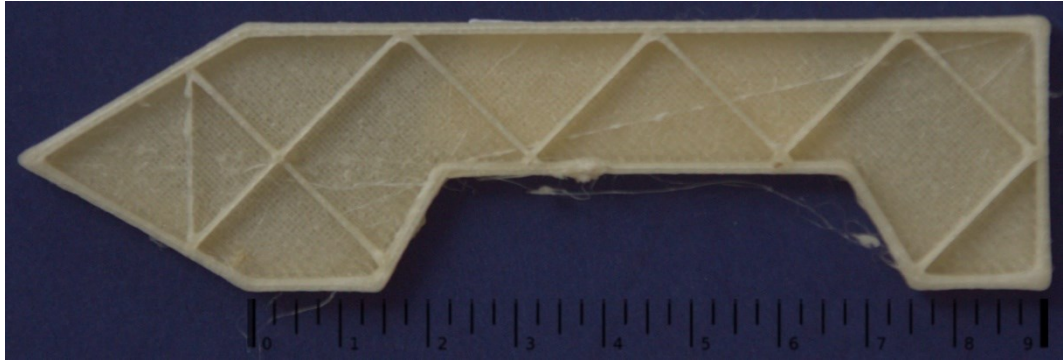
### 3.2.3 PVA

Na obrázcích 77 a 78 jsou zobrazena tělíska vytištěna při rychlostech tisku 40 mm/s. Obdobně jako u ostatních materiálů došlo optimalizací při rychlosti tisku 40 mm/s ke zlepšení zejména v rozích tělísek. To je patrné na obrázcích 79 až 81, které zobrazují rohy těles před a po optimalizaci. Pomocí optimalizace jsou rohy optimalizovaných tělísek méně zaoblené. U materiálu PVA bylo kvůli jeho flexibilitě nutné vypnout retrakce během tisku, což vedlo ke vzniku vlásků na zhotovovaném tělese.

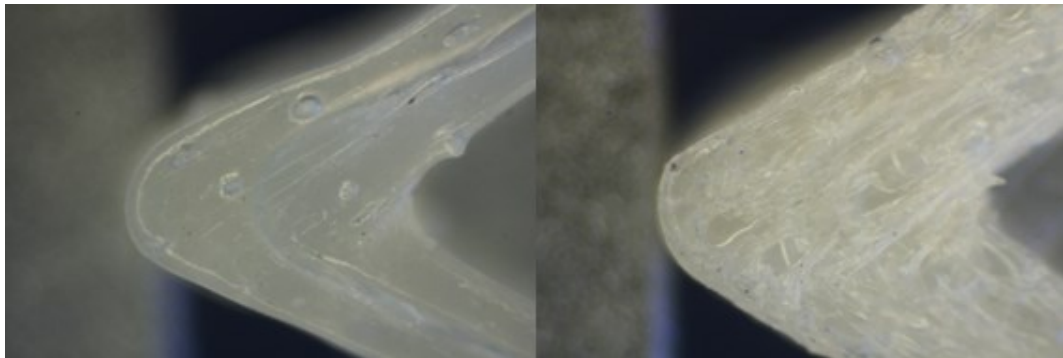


Obrázek 77 – Tělíska s parametry tisku 40 mm/s, bez optimalizace (PVA)

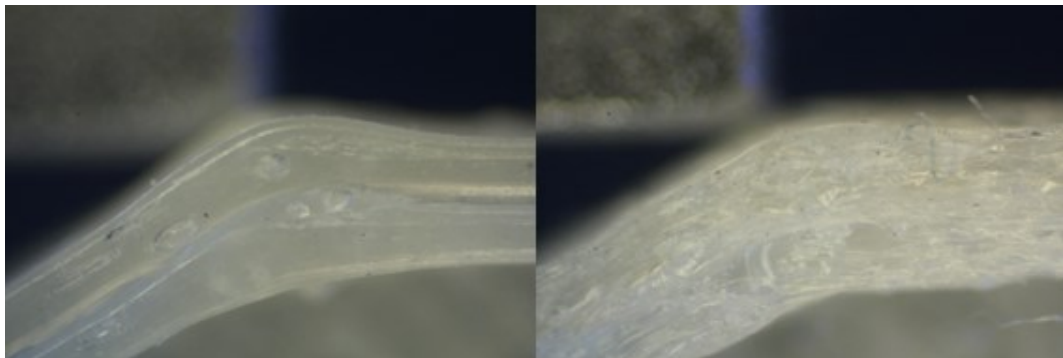




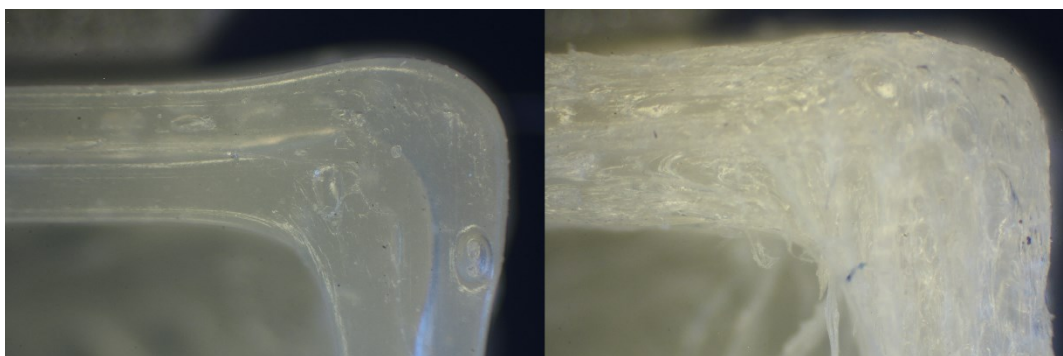
Obrázek 78 – Tělísko s parametry tisku 40 mm/s, po optimalizaci (PVA)



Obrázek 79 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PVA)

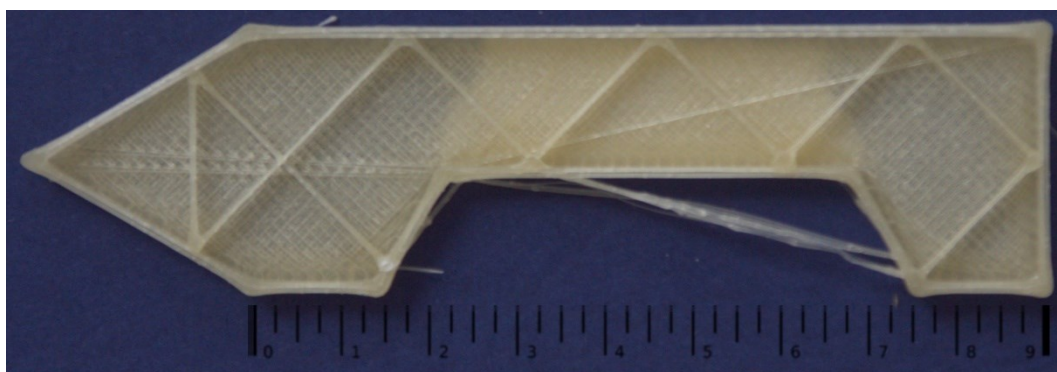


Obrázek 80 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PVA)

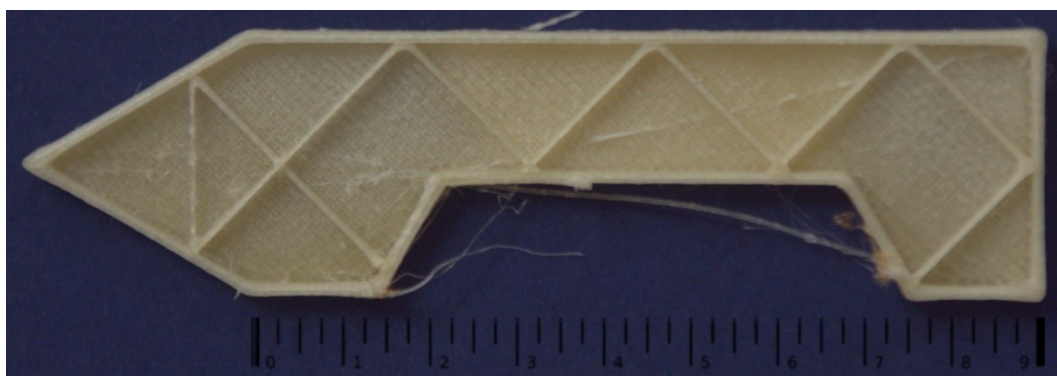


Obrázek 81 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 40 mm/s (PVA)

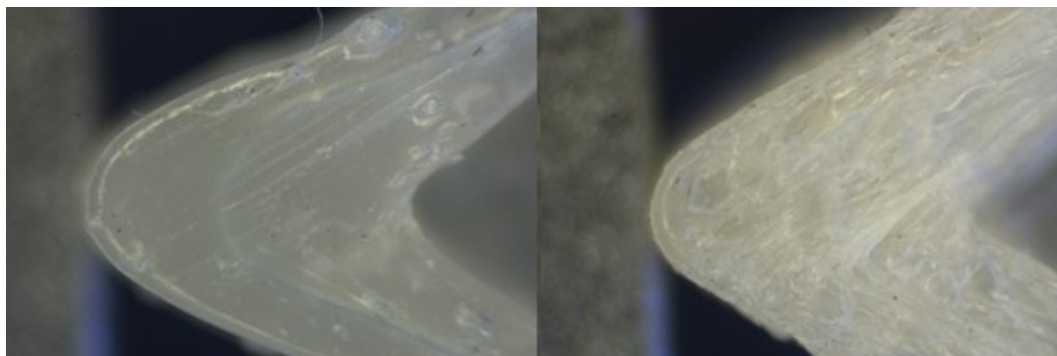
Při vyšší rychlosti tisku 120 mm/s se zlepšení vlivem optimalizace dávkování materiálu projevilo opět ve větší míře. Obrázky 82 a 83 zobrazují tělesa při rychlosti tisku 120 mm/s. Zejména u kratších stěn tělísek bez optimalizace je patrné jejich mírné zakřivení. Vlivem optimalizace došlo u dalších těles k jejich narovnání. Rohy tělísek z PVA po optimalizaci vykazují vizuálně nejlepší zlepšení kvality ze všech materiálů (obrázky 84 až 86). U vyšších rychlostí se u materiálu PVA projevuje i nedostatečné dávkování materiálu uvnitř stěn. Optimalizací se tento problém podařilo vyřešit (obr. 87).



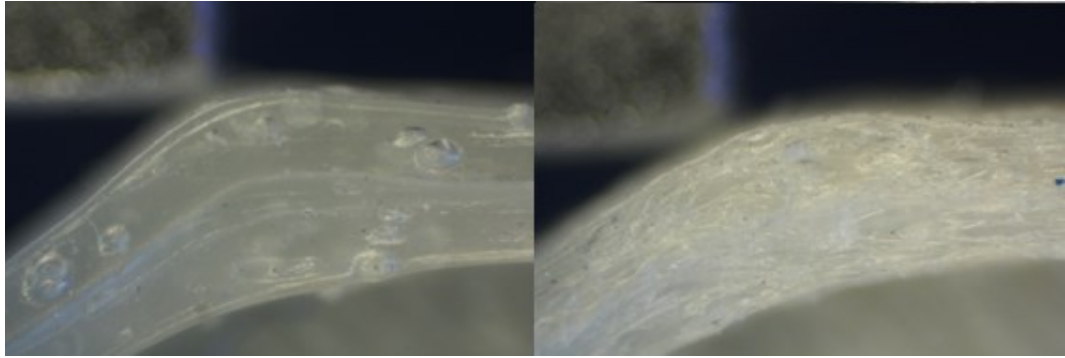
Obrázek 82 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, bez optimalizace (PVA)



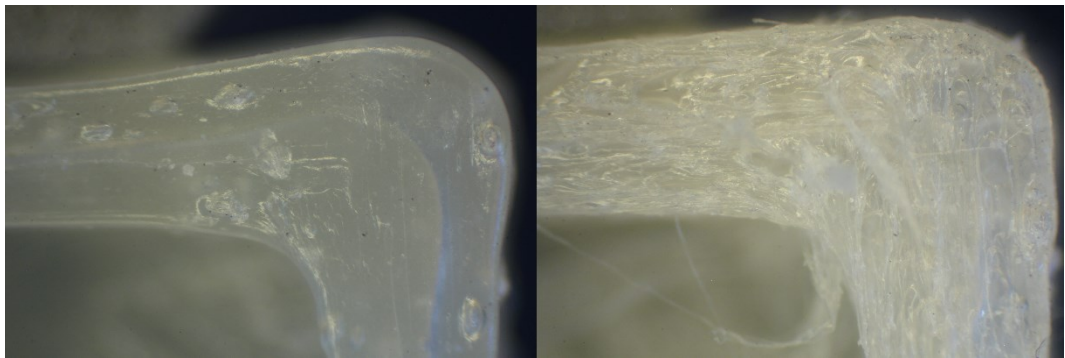
Obrázek 83 – Tělísko s parametry tisku 120 mm/s, po optimalizaci (PVA)



Obrázek 84 – Roh tělíska před a po optimalizaci, 120 mm/s (PVA)



Obrázek 85 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (PVA)



Obrázek 86 – Roh tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (PVA)



Obrázek 87 – Stěna tělíška před a po optimalizaci, 120 mm/s (PVA)

### 3.3 Index toku taveniny

Stanovení probíhalo při zatížení 2,16 kg a při teplotách 250 °C pro HIPS, 240 °C pro PETG a 195 °C pro PVA. Naměřené hodnoty jsou obsaženy v tabulce 8.

Tabulka 8 – Tokové vlastnosti materiálů

Materiál	MFR [g/10 min]	MVR [ml/ 10 min]	K-hodnota
HIPS	26,5 ± 0,8	28,7 ± 0,8	0,6
PETG	17,7 ± 1,2	18,7 ± 1,3	1,45
PVA	8,3 ± 0,4	8,5 ± 0,7	3,3

Z tabulky jsou patrné rozdíly v tokových vlastnostech zvolených materiálů. Největší hmotnostní a objemový index toku vykazuje materiál HIPS, nejmenší naopak PVA.

Při porovnání s optimálními K-hodnotami pro jednotlivé materiály je patrná závislost K-hodnot na hodnotách indexu toku taveniny. Optimální K-hodnota materiálu klesá s rostoucím indexem toku taveniny. Čím vyšší index toku, tím nižší K-hodnota a naopak. Tato závislost je způsobena tím, že čím vyšší je index toku taveniny, tím snáze je roztavený materiál dávkován pomocí trysky a není třeba tak velká míra optimalizace dávkování materiálu jako v případě tavenin s nízkým indexem toku. Funkce Linear Advance pak pro dobře tekoucí materiály nepotřebuje k optimalizaci tak vysoké K-hodnoty, jako pro materiály s horšími tokovými vlastnostmi. K-hodnota pro materiál HIPS činí 0,6, pro materiál PETG 1,45 a pro materiál PVA 3,3. Pokud by místo extruderu typu bowden použitého v této práci byl použit extruder typu direct, optimální K-hodnoty by byly ještě nižší. To je způsobeno pružením uvnitř teflonové trubičky bowden extruderu, které zhoršuje dávkování materiálu. O tomto však více v kapitole 3.4.

Při vysokých indexech toku hrozí svévolné odkapávání taveniny z trysky, aniž by byl filament posouván extruderem. Toto vykapávání může způsobovat problémy při začátku tisku. Vlivem vykapávání materiálu z trysky není uvnitř tiskové hlavy dostatečný tlak a motor extruderu podává tiskovou strunu chvíli bez souvislého vytlačování z trysky. Z toho důvodu je dobré používat během tisku skirt (2-3 linky kolem tištěného objektu), který jednak poslouží k rozjetí správné extruze, ale pomáhá i s ověřením správné přilnavosti materiálu k podložce. Při přílišném odkapávání materiálu však nemusí skirt stačit a může dojít k vadám tisku vlivem nesprávné extruze v rámci první vrstvy.

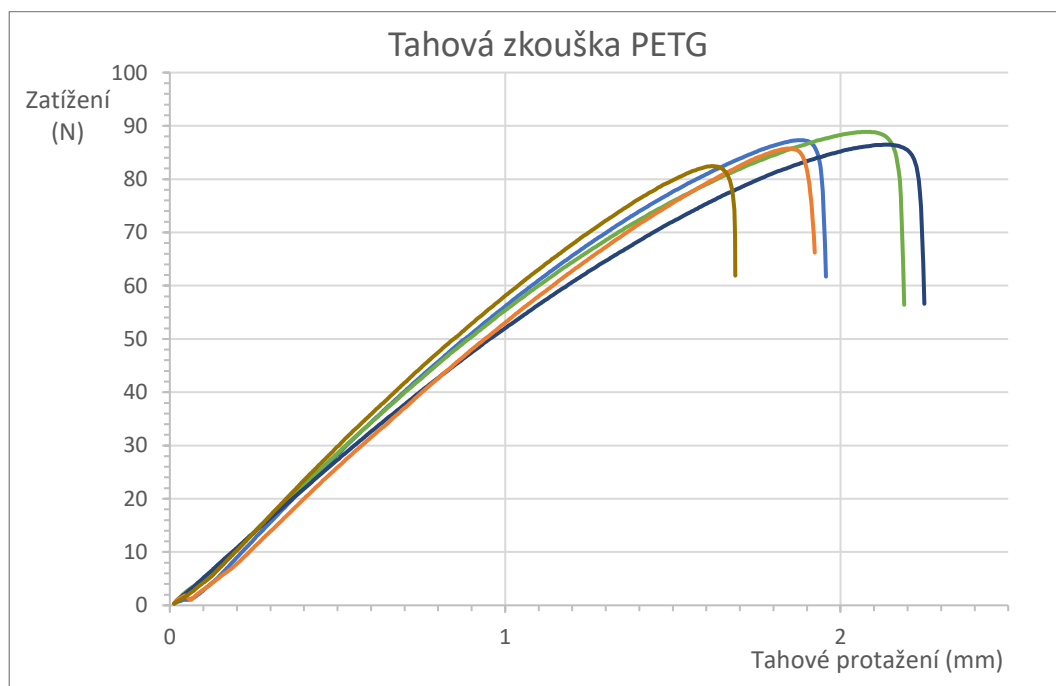
### 3.4 Zkouška v tahu

U vzorků tiskových strun o průměru 1,75 mm byly stanoveny moduly pružnosti a míra elastické deformace, které jsou obsaženy v tabulce 9. Obrázky 88 až 90 zobrazují grafy zkoušek. Měření byla provedena při upínací délce 50 mm a rychlosti posunu příčnicku 2 mm/min. Každý graf zobrazuje 5 měření.

Tabulka 9 – Moduly pružnosti a míry elastické deformace materiálů

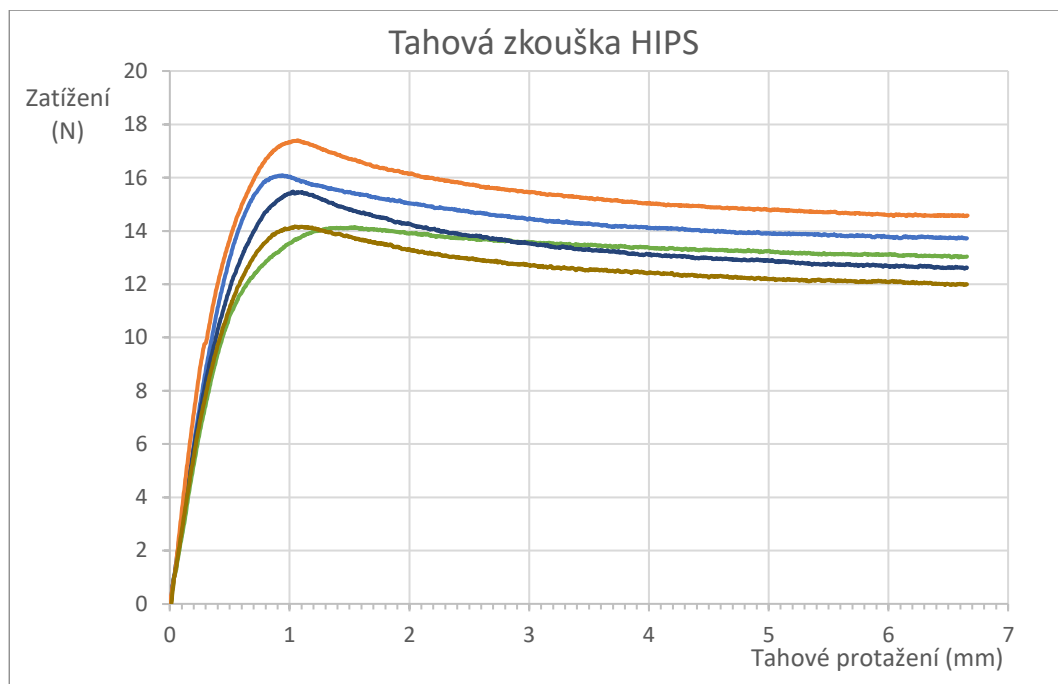
	Modul pružnosti [MPa]	Míra elastické deformace [mm]	Míra elastické deformace [%]	K-hodnoty
HIPS	924 ± 156	0,3	0,6	0,6
PETG	1206 ± 72	0,75	1,5	1,45
PVA	75 ± 5	1,1	2,2	3,3

Nejvyšší modul pružnosti vykazuje materiál PETG. Míra elastické deformace pro tento materiál činí 1,5 % (0,75 mm). Nejnižší modul pružnosti vykazoval materiál PVA, který měl i nejvyšší míru elastické deformace – 2,2 % (1,1 mm). Nejnižší míru elastické deformace vykazoval materiál HIPS – 0,6 % (0,3 mm). Při porovnání s K-hodnotami je patrná souvislost s hodnotami protažení při elastické deformaci.

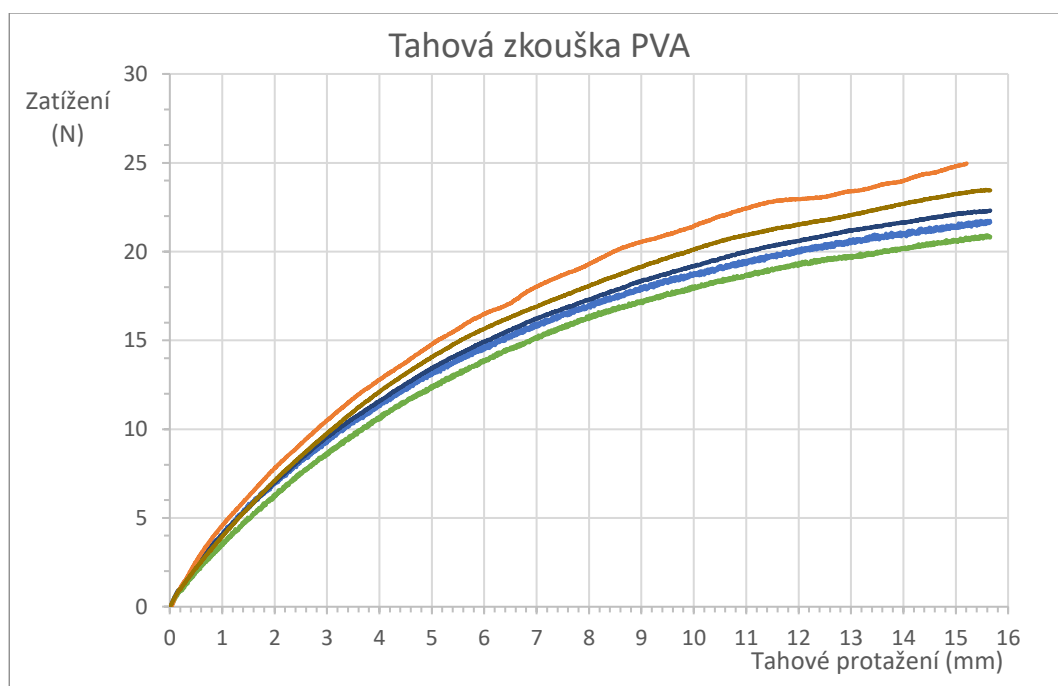


Obrázek 88 – Tahová zkouška PETG





Obrázek 89 – Tahová zkouška HIPS



Obrázek 90 – Tahová zkouška PVA

U extruderů typu bowden je filament během tisku tlačěn skrz teflonovou trubičku. Délka trubičky závisí na konstrukci tiskárny, ale pohybuje se většinou v desítkách centimetrů. Při posunu tiskové struny skrz trubičku pak dochází k elastické deformaci struny při tisku, což může způsobovat problémy s dávkováním materiálu. Materiály s nižší mírou elastické deformace uvnitř bowden trubičky tolik nepruží a nevyžadují tak velkou míru optimalizace. K-hodnoty proto mohou být nižší u málo elastických materiálů než u materiálů

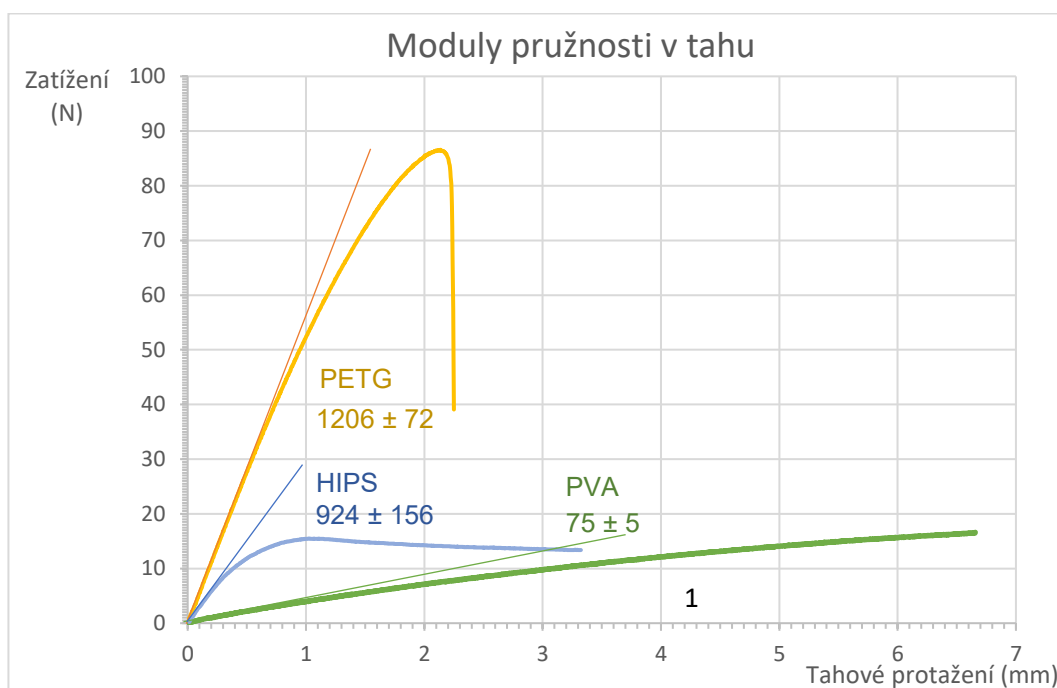


vysoce elastických, které vyžadují vysokou míru optimalizace a tudíž vysoké K-hodnoty.

Pružení uvnitř bowden trubičky kromě vyšší nutnosti optimalizace funkcí Linear Advance způsobuje i problémy s retrakcemi. Při tisku vysoce elastických materiálů pomocí extruderu typu bowden musí být retrakce vypnuté. V opačném případě dochází vlivem deformace způsobené neustálým pohybem tiskové struny tam a zpět k problémům s dávkováním materiálu během tisku. To se projevuje například vynechanými částmi linek uvnitř zhotovovaného objektu.

V případě této práce k nejvyšší elastické deformaci docházelo u materiálu PVA. Nízký modul pružnosti ukazuje snadnou deformaci tohoto materiálu v tahu. Vlivem elastické deformace docházelo k problémům během tisku a dávkování materiálu muselo být nejvíce optimalizováno funkcí Linear Advance, o čemž svědčí K-hodnota 3,3 – nejvyšší z K-hodnot materiálů použitých v této práci. Při tisku těles z tohoto materiálu musely být vypnuté retrakce.

Materiály PETG a HIPS vykazují vyšší moduly pružnosti a nedochází u nich tak snadno k deformaci během tahu. U těchto materiálů nedochází uvnitř teflonové trubičky bowden extruderů vlivem tlačení materiálu motorem k tak velké elastické deformaci a míra optimalizace pak nemusí být tak vysoká. Funkci Linear Advance pak stačí nižší K-hodnoty než v případě elastických materiálů. Obrázek 91 zobrazuje porovnání tahových zkoušek vybraných vzorků materiálů PETG, HIPS a PVA. U křivek je vyznačena lineární část a uvedeny moduly pružnosti v tahu.



Obrázek 91 – Moduly pružnosti v tahu

## 4. ZÁVĚR

Optimalizace pomocí funkce Linear Advance spočívá v predikcích nárůstu tlaku uvnitř tiskové hlavy vlivem zrychlování a zpomalování tiskové hlavy během tisku. Tiskové hlavy však nedisponují tlakovými senzory a jejich implementace by byla technicky náročná a proto jsou změny tlaku posuzovány na základě změn v dávkování materiálu tiskovou hlavou. Pomocí experimentálních vzorů vytištěných tiskárnou, která byla objektem optimalizace, byly vizuálně určeny optimální K-hodnoty, se kterými funkce Linear Advance obsažená ve firmwaru Marlin následně pracuje. Následně byl přehrán firmware a provedena optimalizace FFF tiskárny.

Po porovnání snímků tělísek před a po optimalizaci při rychlostech tisku 40 mm/s a 120 mm/s bylo patrné, že u všech tělísek došlo po optimalizaci ke snížení vyoblení rohů a k narovnání stěn. Rovněž byl vyřešen problém s nedostatečným dávkováním materiálu uvnitř stěn, kdy se vytvářela mezera mezi jednotlivými perimetry. U tělísek zhotovených při vyšší rychlosti 120 mm/s je patrné největší zlepšení, zároveň jsou u těchto tělísek bez optimalizace patrné i větší vady. To je způsobeno tím, že při vyšších rychlostech je materiál dávkován rychleji a změny tlaku uvnitř tiskové hlavy jsou také prudší. Funkce Linear Advance tyto změny dokáže předikovat a minimalizovat jejich dopad. Obecně k nejlepšímu zlepšení kvality tisku optimalizací došlo u materiálu PVA, který vyžadoval i nejvyšší K-hodnotu. Nejnižší K-hodnotu vyžadoval materiál HIPS.

Při porovnání zjištěných K-hodnot materiálů s hodnotami tokových vlastností lze tvrdit, že nižší K-hodnoty vyžadují materiály s vyššími indexy toku. Tedy čím snáze materiál teče, tím menší míra optimalizace dávkování funkcí Linear Advance je třeba. Pro extrudery typu bowden, který byl v této práci využit, je ještě důležitá míra elastické deformace, neboť k ní dochází uvnitř bowden trubičky. Z výsledků zkoušky v tahu vyplývá potřeba vyšších K-hodnot pro materiály s nižšími moduly pružnosti a s vyšší mírou elastické deformace. Konkrétní míra závislosti by však vyžadovala porovnání pro více materiálů než tří využitých v této práci a porovnání s K-hodnotami pro extruder typu direct. To by však vyžadovalo přestavbu tiskové hlavy a bylo by nad rámec této bakalářské práce.

Závěry z bakalářské práce ukazují, že optimalizace dávkování materiálu pomocí funkce Linear Advance byla provedena úspěšně. Optimalizace vedla ke zlepšení kvality zhotovovaných těles a bude na konkrétní tiskárně používána i nadále při tisku dalších objektů.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] What is 3D printing?. *Hubs.com* [online]. 2019 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/#chap>
- [2] STRÍTESKÝ, Ondřej; PRŮŠA, Josef; BACH, Martin. Základy 3D tisku s Josefem Průšou. *Prusa3d.com* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: [https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou\\_490/](https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/)
- [3] What is 3D printing?. *3dprinting.com* [online]. 2019 [cit. 2023-01-31]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [4] PRŮŠA, Josef. Tři stovky 3D tiskáren v jedné místnosti: Nová tisková farma Prusa Research. *Prusa3D.com* [online]. 2018 [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/nova-tiskova-farma-prusa-research\\_7474/](https://blog.prusa3d.com/cs/nova-tiskova-farma-prusa-research_7474/)
- [5] How 3D Printing is Transforming the Spare Parts Industry. *AMFG.ai* [online]. 2018 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/05/29/3d-printing-transforming-spare-parts-industry/>
- [6] HARIA, Rushabh. How 3D printing has changed dentistry, a billion dollar opportunity. *3dprintingindustry.com* [online]. 2017, 15.9. [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-impact-on-dentistry-121284>
- [7] 3D tisk ve zdravotnictví. *Paarts.cz* [online]. [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <https://www.paarts.cz/3d-tisk-v-praxi/3d-tisk-ve-zdravotnictvi>
- [8] 3D tisk ve zdravotnictví: Co vše už lékaři dokážou. *For3dtisk.cz* [online]. [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/3d-tisk-ve-zdravotnictvi-blog/>
- [9] GREGURIĆ, Leo. 3D Printed Prosthetic Leg: 5 Most Promising Projects. *All3dp.com* [online]. 2019 [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printed-prosthetic-leg-most-promising-projects/>
- [10] *CYBORG BEAST HAND* [online]. 2014 [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: <https://enablingthefuture.org/current-design-files/cyborg-beast-hand/>
- [11] LEE, Jian-Yuan; AN, Jia a CHUA, Chee Kai. Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. In: *Applied Materials Today* [online]. 2017, s. 120-133 [cit. 2023-02-08]. ISSN 23529407. Dostupné z: doi:10.1016/j.apmt.2017.02.004
- [12] AL RASHID, Ans; AHMED, Waqas; KHALID, Muhammad Yasir a KOÇ, Muammer. Vat photopolymerization of polymers and polymer composites: Processes and applications. *Additive Manufacturing* [online]. 2021, **47** [cit. 2023-02-10]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.102279
- [13] WIBERG, Anton. *Towards Design Automation for Additive Manufacturing: A Multidisciplinary Optimization approach* [online]. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2019 [cit. 2023-02-10]. Linköping Studies in Science and Technology. Licentiate Thesis. ISBN 9789179299859. Dostupné z: doi:10.3384/lic.diva-160888
- [14] Binder Jetting. *ACAM Aachen* [online]. 2019 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://acam.rwth-campus.com/binder-jetting/>

- [15] SING, S.L.; TEY, C.F.; TAN, J.H.K.; HUANG, S. a YEONG, W. Y. 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing. In: *Rapid Prototyping of Biomaterials* [online]. Elsevier, 2020, 2020, s. 17-40 [cit. 2023-02-15]. ISBN 9780081026632. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102663-2.00002-2
- [16] KAUPPILA, Ille. What Is Material Jetting? – 3D Printing Basics. *All3dp.com* [online]. 2022 [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/what-is-material-jetting-3d-printing-basics/>
- [17] SIREESHA, Merum; LEE, Jeremy; KRANTHI KIRAN, A. Sandeep; BABU, Veluru Jagadeesh; KEE, Bernard B. T. a RAMAKRISHNA, Seeram. A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. *RSC Advances* [online]. 2018, 8(40), 22460-22468 [cit. 2023-04-11]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C8RA03194K
- [18] Sheet Lamination. *Engineeringproductdesign.com* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>
- [19] CAROLO, Lucas. What Is FDM 3D Printing? – Simply Explained. *All3dp.com* [online]. 2022 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [20] What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?. *Hubs.com* [online]. 2023 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- [21] PURVIS, Alexandra. The Complete Guide to Fused Deposition Modeling (FDM) in 3D Printing. *3Dnatives.com* [online]. 2017 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/fused-deposition-modeling100420174/>
- [22] Typy tiskáren a rozdíly mezi nimi. *Prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi\\_112464](https://help.prusa3d.com/cs/article/typy-tiskaren-a-rozdily-mezi-nimi_112464)
- [23] CORMACK, Jordan. Homemade/Designed CoreXY 3D Printer. *Jordan Cormack* [online]. 2021 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://cormack.xyz/corexy/>
- [24] FLYNT, Joseph. What are Polar 3D Printers and Best Models to Consider. *3DINSIDER* [online]. 2019 [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/polar-3d-printers/>
- [25] O'CONNELL, Jackson. The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY, & More. *All3dp.com* [online]. 2022 [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>
- [26] ANDERSON, Tyler. Anatomy of a 3D Printer: How Does a 3D Printer Work?. *MatterHackers* [online]. 2016 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer>
- [27] IDÀ, Edoardo; NANETTI, Federico a MOTTOLA, Giovanni. An Alternative Parallel Mechanism for Horizontal Positioning of a Nozzle in an FDM

- 3D Printer. *Machines* [online]. 2022, **10** (7) [cit. 2023-03-13]. ISSN 2075-1702. Dostupné z: doi:10.3390/machines10070542
- [28] FLYNT, Joseph. Parts of a 3D Printer. *3DINSIDER* [online]. 2018 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printer-parts/>
- [29] KOČÍ, Jakub. Jak tisknout na pláty se zrnitým práškovým povrchem?. *Josefprusa.cz* [online]. 2019 [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-tisknout-na-texturovanou-podlozku/>
- [30] ANDERSON, Tyler. Choosing the Best 3D Printing Bed Surface. *MatterHackers.com* [online]. 2016 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/news/choosing-the-right-3d-print-bed-surface>
- [31] O'CONNELL, Jackson. 3D Printer Bed: How to Choose Your Build Plate/Surface. *All3dp.com* [online]. 2022 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-bed-how-to-choose-the-right-build-plate/>
- [32] 3D Printing Concepts and 3D Printer Parts. *Leapfrog* [online]. [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://www.lpfrg.com/guides/3d-printing-concepts-and-3d-printer-parts/>
- [33] E3D Volcano Hotend Bowden - 1,75 mm. *3DJake* [online]. [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/e3d/volcano-hotend-bowden-175-mm>
- [34] Creality Metal Extruder Upgrade Kit. *3DJake* [online]. [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/3d-tiskarny-nahradni-dily-creality/metal-extruder-upgrade-kit>
- [35] ZUZA, Mikolas. Vše o tryskách s různým průměrem. *Josefprusa.cz* [online]. 2018 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem/>
- [36] How to Select the Right Nozzle for 3D Printing. *PrinterSolid* [online]. 2018 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://www.printedsolid.com/blogs/news/how-to-select-the-right-nozzle-for-3d-printing>
- [37] How to fix stringing. *UltiMaker* [online]. 2022 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://support.makerbot.com/s/article/1667337578307>
- [38] LUTKEVICH, Ben. What is firmware? Definition, types and examples. *WhatIs.com* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/firmware>
- [39] Configuring Marlin. *Marlinfw.org* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://marlinfw.org/docs/configuration/configuration.html>
- [40] GIENCKE, Andreas. How to Set Up & Edit Marlin Firmware. *All3dp.com* [online]. 2022 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/marlin-firmware-how-to-edit-marlin-firmware/>
- [41] Linear Advance. *Marlinfw.org* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: [https://marlinfw.org/docs/features/lin\\_advance.html](https://marlinfw.org/docs/features/lin_advance.html)
- [42] Linear Advance. *Prusa3d.com* [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/linear-advance\\_2252](https://help.prusa3d.com/cs/article/linear-advance_2252)

- [43] O'CONNELL, Jackson. How to Set Up Linear Advance in Marlin. *All3dp.com* [online]. 2021 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/linear-advance-cura-marlin/>
- [44] MLEZIVA, Josef; ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [45] HIPS. *Prusa3D.com* [online]. 2023 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/hips\\_167118](https://help.prusa3d.com/cs/article/hips_167118)
- [46] ABS. *Prusa3d.com* [online]. 2022 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/abs\\_2058](https://help.prusa3d.com/cs/article/abs_2058)
- [47] *Oddělení vrstev a rozdělení FDM* [online]. 2023 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/oddeleni-vrstev-a-rozdeleni-fdm\\_1806](https://help.prusa3d.com/cs/article/oddeleni-vrstev-a-rozdeleni-fdm_1806)
- [48] BOISSONNEAULT, Tess. ASA vs ABS: Finding the right 3D printing filament. *Wevolver.com* [online]. 2022 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/asa-vs-abs-finding-the-right-3d-printing-filament>
- [49] KABASCI, S.; *Bio-Based Plastics*; vydavatelství: Wiley; 2014; Německo; ISBN 978-1-119-99400-8
- [50] Polylactide (PLA): Complete Guide to Accelerate your 'Green' Approach. *Omnexus* [online]. 2023 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polylactide-pla-bioplactic>
- [51] PVA. *Simplify3D* [online]. 2023 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/pva/>
- [52] WHAT IS PLA? (EVERYTHING YOU NEED TO KNOW). *TWI* [online]. 2023 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla#Properties>
- [53] What is PETG. *Filament2print* [online]. 2019 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: [https://filament2print.com/gb/blog/49\\_petg.html](https://filament2print.com/gb/blog/49_petg.html)
- [54] WANG, Kai; SHEN, Jianing; MA, Zhao; ZHANG, Yipeng; XU, Nai a PANG, Sujuan. Preparation and Properties of Poly(ethylene glycol-co-cyclohexane-1,4-dimethanol terephthalate)/Polyglycolic Acid (PETG/PGA) Blends. *Polymers* [online]. 2021, **13**(3) [cit. 2023-04-14]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13030452
- [55] PETG. *Prusa3d.com* [online]. 2023 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/article/petg\\_2059](https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059)
- [56] EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT NYLON 3D PRINTING. *MakerBot* [online]. 2023 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/stories/design/nylon-3d-printing/>
- [57] Nylon 3D Printing – The Ultimate Guide. *All3dp.com* [online]. 2023 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/nylon-3d-printing-how-to-get-nylon-3d-printed/>
- [58] RepRap kalkulačka. *Prusa3D.com* [online]. [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/reprap-kalkulacka\\_3416/](https://blog.prusa3d.com/cs/reprap-kalkulacka_3416/)

- [59] K-factor Calibration Pattern. *Marlinfw.org* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: [https://marlinfw.org/tools/lin\\_advance/k-factor.html](https://marlinfw.org/tools/lin_advance/k-factor.html)