

Univerzita Pardubice

**Fakulta chemicko-technologická**

Ústav chemie a technologie makromolekulárních látek

Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie

**Studium vlivů parametrů 3D tisku na  
fyzikálně-mechanické vlastnosti polymerů**

Petr Resl

**Bakalářská práce  
2016**

# Zadání bakalářské práce

Petr Resl

## Studium vlivů parametrů 3D tisku na fyzikálně-mechanické vlastnosti polymerů

### Zásada pro vypracování

1. V literární rešerši se zaměřte na problematiku 3D tisku, různé technologie a využití v praxi.
2. V teoretické části dále přehledně popište používané polymery pro 3D tisk se zaměřením na PLA.
3. Připravte jednotlivé vzorky různých typů PLA pomocí 3D tiskárny se změnou různých parametrů např. rychlost tisku, tloušťka tiskové vrstvy.
4. Studujte vliv jednotlivých typů PLA a změny parametrů tisku na fyzikálně-mechanické vlastnosti.
5. Srovnajte a diskutujte zjištěné mechanické vlastnosti u jednotlivých testovaných vzorků PLA. Zhodnoťte vliv změny parametrů 3D tisku na zjišťované vlastnosti.

Ing. Luboš Prokůpek, Dr.

Prohlašuji:

Tuto práci 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., autorský zákon, 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. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Petr Resl

Děkuji Ing. Luboši Prokúpkovi, Dr. za pomoc a podnětné připomínky, které mi během práce poskytoval.

## Anotace

Náplní bakalářské práce je studium parametrů 3D tisku, které mají vliv na fyzikálně-mechanické vlastnosti polymerního materiálu používaného pro 3D tisk za účelem optimalizace procesu 3D tisku.

Tisk byl proveden na 3D tiskárně typu open-source reprop s příslušným softwarem umožňujícím měnit parametry 3D tisku, neboli nanášení vrstvy materiálu např. různou rychlostí či v různé tloušťce této vrstvy. Tyto parametry ovlivňuje další parametr tzv. Flow.

Za materiál byl zvolen PLA, polymléčná kyselina, jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk. K dispozici byl surový PLA, různě modifikovaný (kopolymer PLA/PHA nebo fosforescentní látkou) nebo s obsahem plniva, v našem případě bronzovým prachem.

Z těchto materiálů byly zhotoveny testovací vzorky s měnícími se parametry 3D tisku, které byly testovány ve fyzikálně-mechanických vlastnostech jako jsou pevnost v tahu a tvrdost dle Brinella.

Klíčová slova: 3D tisk; 3D tiskárna; flow; PLA; fyzikálně-mechanické vlastnosti; pevnost v tahu; tvrdost dle Brinella.

## Annotation

Study of effect parameters of 3D print to physical-mechanical properties of polymers

The aim of this Bachelor thesis is study parameters of 3D print which have effect physical-mechanical properties of polymer materials for the purpose of optimalization of the 3D print process.

Print was done by open-source RepRap 3D printer with driver to allow change parameters of 3D print such as layer thickness or print speed. They are effected by flow parameter.

Material was chosen as PLA (Polylactide acid) one of the most used polymer materials for 3D print. Natural PLA, PLA with fluorescent substance, copolymer PLA/PHA or PLA bronze fill was used.

Test specimen with diferent parameters was made from these materials and physical-mechanical properties was determinate.

Key words: 3D print, 3D printer, flow, physical-mechanical properties, tensile strength; hardness Brinell scale.

# Obsah

ÚVOD.....	10
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1.1 Počátek 3D tisku.....	11
1.2 3D tisk.....	13
1.3 RepRap.....	14
1.4 Příprava dat k 3D tisku.....	18
1.5 Materiály pro Fused Deposition Modeling (FDM).....	22
1.5.1 Kyselina polymléčná (PLA).....	22
1.5.2 Akrylonitril Butadien Styren (ABS).....	26
1.5.3 Ostatní polymerní materiály pro 3D tisk.....	26
1.6 Ostatní technologie 3D tisku.....	27
1.6.1 Polyjet, MultiJet Printing (MJP).....	27
1.6.2 ColorJet Printing (CJP).....	28
1.6.3 Selective Laser Sintering (SLS).....	29
1.6.4 Continuous Liquid Interface Production (CLIP).....	30
1.7 Objekty zhotovené 3D tiskem.....	35
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	38
2.1 Charakteristika materiálů.....	38
2.2 Tiskárna RepRap.....	40
2.3 Parametry 3D tiskárny.....	46
2.4 Zkušební tělíska a parametry 3D tisku.....	46
2.5 3D tisk tělísek.....	50
2.6 Stanovení a metody testování.....	52
2.6.1 Stanovení indexu toku taveniny.....	52
2.6.2 Stanovení obsahu nespalitelných částic.....	53
2.6.3 Zkouška v tahu – trhačka INSTRON 5500R.....	53
2.6.4 Tvrdost dle Brinella.....	54
3 VÝSLEDKY A DISKUZE.....	55
3.1 Stanovení Indexu toku taveniny a obsahu nespalitelných částic.....	55
3.2 Tvrdost dle Brinella.....	56
3.3 Zkouška v tahu.....	63
4 ZÁVĚR.....	72
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	73
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	77

## Seznam obrázků

Obr. 1: Stereolitografie [2].....	11
Obr. 2: ProJet 6000 HD [7].....	12
Obr. 3: Technologie FDM [13].....	14
Obr. 4: Prototyp Darwin [14].....	15
Obr. 5: Prototyp Mendel [15].....	15
Obr. 6: „Hotend“.....	16
Obr. 7: Typy „heatboxů“.....	16
Obr. 8: Typy trysek.....	16
Obr. 9: Typy hrdélek.....	16
Obr. 10: Original Prusa i3 MK2 [17].....	17
Obr. 11: Geeetech I3 X [17].....	17
Obr. 12: Rebel 2 [18].....	18
Obr. 13: Ultimaker 3 [19].....	18
Obr. 14: 3D scanner Sense [20].....	19
Obr. 15: Prostředí ovladače Intel RealSense kamery.....	19
Obr. 16: Příklad tisku bez retrakce [22].....	20
Obr. 17: Příklad objektu s podpurným lešením.....	20
Obr. 18: Prostředí softwaru CURA 2.3.1.....	21
Obr. 19: Prostředí softwaru Pronterface.....	22
Obr. 20: Monomery a dimery pro výrobu PLA.....	23
Obr. 21: Polykondenzace PLA.....	24
Obr. 22: Polymerace s otevřením kruhu PLA.....	24
Obr. 23: Čajové sáčky z PLA [24].....	25
Obr. 24: Rentgenový snímek chodidla s kostní fixací z PLA [25].....	25
Obr. 25: Schéma technologie polyjet/MJP [30].....	27
Obr. 26: Stratasys PolyJet J750 [34].....	28
Obr. 27: 3D Systems ProJet MJP 3600 Max [35].....	28
Obr. 28: 3D Systems ProJet CJP 360 [36].....	29
Obr. 29: Solidscape MAX2 [37].....	29
Obr. 30: 3D systems ProX 800 [43].....	30
Obr. 31: Schéma technologie CLIP [47].....	31
Obr. 32: Reakce vzniku kyanové skupiny.....	32
Obr. 33: Reakce vzniku kyanurátové vazby.....	32
Obr. 34: Rozdíl povrchů objektů ostatních technologií a technologie CLIP [46].....	33
Obr. 35: Rozdíl mechanických vlastností 3D tisku a technologie CLIP [46].....	33
Obr. 36: CLIP Technologie [46].....	34
Obr. 37: CLIP technologie Carbon M1 [47].....	34
Obr. 38: Příklad architektonického modelu [52].....	35
Obr. 39: Interierové doplňky [54].....	36
Obr. 40: Čokoládový dort [55].....	36
Obr. 41: Fixace předloktí zhotovená 3D tiskem [56].....	36
Obr. 42: Implantát do páteře z 3D tiskárny [57].....	36
Obr. 43: Dům postavený za pomoci 3D tiskárny včetně interieru v Dubai [58].....	37
Obr. 44: Most postavený principem 3D tisku v Madridu [59].....	37
Obr. 45: Obuv s podrážkou zhotovenou technologií SLS od New Balance [60].....	37
Obr. 46: Schéma 3D tiskárny použité pro tisk zkušebních tělísek.....	41
Obr. 47: Chladič hrdélka.....	42

Obr. 48: Schéma tiskové hlavy 3D tiskárny použité pro tisk zkušebních tělísek.....	43
Obr. 49: RepRap 3D tiskárna.....	44
Obr. 50: Detail tiskové hlavy.....	45
Obr. 51: Rozměry zkušebního tělíška pro zkoušku v tahu dle normy ASTM D 1708 – 02a.....	46
Obr. 52: Zkušební tělíško pro tvrdost dle Brinella z materiálu Natural.....	49
Obr. 53: Zkušební tělíško pro tvrdost dle Brinella z materiálu Glow.....	49
Obr. 54: Zkušební tělíško pro tvrdost dle Brinella z materiálu PLA/PHA.....	49
Obr. 55: Zkušební tělíško pro tvrdost dle Brinella z materiálu Bronzefill.....	49
Obr. 56: Zkušební tělíško pro tvrdost dle Brinella z materiálu Glow fosforeskující ve tmě.....	50
Obr. 57: Proces 3D tisku.....	51
Obr. 58: Graf závislosti tvrdosti dle Brinella při 10 s na parametrech 3D tisku materiálu PLA/PHA.....	60
Obr. 59: Graf závislosti tvrdosti dle Brinella při 10 s na parametrech 3D tisku materiálu Bronzefill.....	62
Obr. 60: Graf závislosti tvrdosti dle Brinella při 10 s na tloušťce nanášené vrstvy 0,1 mm napříč materiály .....	63
Obr. 61: Graf průběhu zkoušky v tahu materiálu Natural – závislost napětí na protažení vzorku 0,15/100 jako příklad.....	65
Obr. 62: Graf závislosti meze pevnosti v tahu [MPa] na parametrech 3D tisku materiálu Glow.....	67
Obr. 63: Graf průběhu zkoušky v tahu materiálu Glow – závislost napětí na protažení vzorku 0,1/100 jako příklad.....	68
Obr. 64: Graf průběhu zkoušky v tahu materiálu PLA/PHA – závislost napětí na protažení vzorku 0,05/50 jako příklad.....	70



## Seznam tabulek

Tabulka 1: Charakteristika materiálu PLA Natural Crystal Clear.....	38
Tabulka 2: Charakteristika materiálu PLA Glow In the Dark.....	38
Tabulka 3: Charakteristika materiálu PLA/PHA Bio-Flex.....	39
Tabulka 4: Charakteristika materiálu PLA/PHA BronzeFill.....	39
Tabulka 5: Vybrané parametry 3D tiskárny.....	46
Tabulka 6: Vybrané parametry 3D tisku.....	47
Tabulka 7: Časová náročnost 3D tisku zkušebních tělísek v závislosti na parametrech 3D tisku.....	51
Tabulka 8: Hmotnostní a objemový index toku taveniny materiálů pro 3D tisk.....	55
Tabulka 9: Obsah nespalitelných částic materiálu Bronzefill.....	56
Tabulka 10: Tvrdost dle Brinella materiálu Natural.....	56
Tabulka 11: Tvrdost dle Brinella materiálu Glow.....	58
Tabulka 12: Tvrdost dle Brinella materiálu PLA/PHA.....	59
Tabulka 13: Tvrdost dle Brinella materiálu Bronzefill.....	61
Tabulka 14: Zkouška v tahu materiálu Natural.....	64
Tabulka 15: Zkouška v tahu materiálu Glow.....	66
Tabulka 16: Zkouška v tahu materiálu PLA/PHA.....	69

## ÚVOD

## ÚVOD

V rámci bakalářské práce je rozvedena čím dál více populárnější problematika 3D tisku z hlediska jeho parametrů a fyzikálně-mechanických vlastností polymerního materiálu používaného pro samotný 3D tisk.

3D tisk je moderním pojmenováním technologie aditivní výroby, kdy se výrobek takto zhotovený, skládal z vrstev materiálů připevněných na sebe do konečného tvaru např. lepením či svářením. 3D tisk takto pracuje také, nanáší vrstvy polymerního materiálu na sebe, které tvoří finální tvar výrobku. Tyto vrstvy na sobě drží různým způsobem, záleží na typu 3D tiskárny a materiálu. Důležitý je fakt, že celý proces je řízený digitální grafickou předlohou a ovládacím softwarem 3D tiskárny. Proto se změnilo označení tohoto procesu na dnes velmi populární 3D tisk. Podobně jako klasické tiskárny převádějí digitální formu textu či obrazu na reálnou podobu na papír, zde je tvořen prostorový objekt přímo dle digitálního grafického 3D modelu v softwaru počítače a to bez odpadu či nároku na formu.

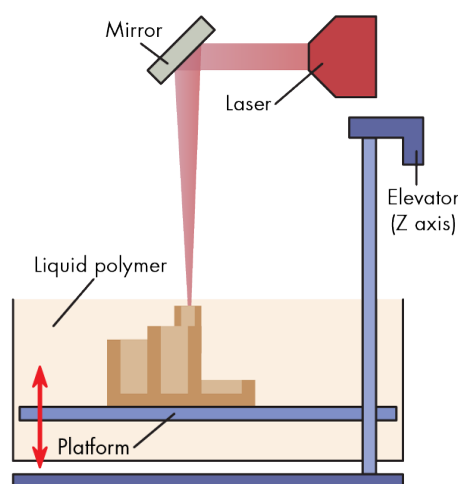
Nejprve je nutné připravit 3D model v příslušném editoru, poté jej rozvrstvit na kódový soubor se souřadnicemi a nastavenými parametry 3D tisku, jako jsou rychlosti pojezdu os, tloušťka nanášené vrstvy nebo tloušťka stěny výrobku. Na závěr se tento soubor nahraje do ovládacího softwaru 3D tiskárny, která jej dle zadání zhotoví.

Pro tento konkrétní případ byla použita 3D tiskárna typu open-source RepRap (Replication Rapid prototyper) a jako materiál zvolen jeden z nejpoužívanějších polymerních materiálů pro 3D tisk PLA (Polylactic acid, kyselina polymléčná) surová i modifikovaná různými aditivami. PLA je polymer vyrobený z biologických materiálů, tím je zaručena jeho biodegradabilita a výroba založená na obnovitelných zdrojích.

## 1 TEORETICKÁ ČÁST

### 1.1 Počátek 3D tisku

Softwarově řízená aditivní výroba se objevila na začátku 80. let minulého století, kdy v roce 1984 Charles Hull patentoval proces Stereolitografie (SLA). Jedná se o technologii využívající vytvrzování vysokoviskózní kapaliny UV zářením. Celé zařízení pracuje na posuvné podložce, která je postupně ponořována do této kapaliny, na niž svítí UV laser. Tento paprsek je směřován přes zrcátko po konturách objektu. Schéma zařízení stereolitografie je vyobrazeno na obrázku 1. [1]



Obr. 1: Stereolitografie [2]

Moderní stereolitografie, vycházející z původního patentu, je doplněna o dotvrzovací systém, díky kterému je proces vytváření objektu stabilnější. Ozářené vrstvy kapaliny ztuhnou jedna na druhé a jsou dotvrzeny jezdcem umístěným, těsně nad hladinou kapaliny, emitujícím UV záření. Laser má svou vlastní řídicí jednotku, tudíž bylo možné odstranit zrcátko. [3]

SLA je jednou z nejpreciznějších technologií aditivních výrob, její tolerance je obvykle menší než 0,05 mm. I přes takto jemné dataily pracuje SLA relativně rychle, díky téměř okamžitému ztuhnutí i při krátkém osvitu. Lze tak zhotovovat objekty miniaturních rozměrů či objekty vyžadující maximální přesnost. Další výhodou této technologie spočívá v následném zpracování, neboť výrobky lze snadno obrábět, leštit

brousit či pískovat. Nová metoda umožňuje pokovování niklem. Takováto úprava nejen že značně zpevní výsledný objekt, ale především přidá schopnost vést elektrický proud. Materiály které SLA využívá jsou komerčně vyrobené polymery na bázi polypropylenu (PP-like), polykarbonátu (PC-like, Rigid) a dalších polymerů jako ABS nebo HIPS. [3], [4]

Společně s SLA technologií se v 80. letech minulého století rozvinula také kovovýroba a to o technologie známé jako Computer Numeric Control (CNC), Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) či robotické sváření. [5] [6]

Velmi důležitou roli sehrál na počátku 90. let rozvoj výpočetní techniky, který umožnil vyvinout základy softwarového 3D modelování. Později Charles Hull založil společnost 3D Systems vyvíjející nové 3D tiskárny, softwary, materiály či 3D scannery. Na obrázku 2 je vyobrazen komerční stroj ProJet 6000 HD pracující na technologii SLA vyrobený společností 3D Systems.



Obr. 2: ProJet 6000 HD [7]

Další důležitý milník nastal na přelomu tisíciletí, kdy pozbyly platnost patenty zahrnující podobné technologie a z aditivních výrob se stává 3D tisk. V roce 2005 vzniká na univerzitě v britském městě Bath projekt open-source RepRap (Replication Rapid prototyper), který v dnešní době zahrnuje stovky vývojářů a tisíce uživatelů. [5], [8], [9]

## 1.2 3D tisk

3D tisk je moderní technologie aditivní výroby. Je to velmi účinná metoda zhotovení výrobku s maximální úrovní detailů a přesností. Jedná se o techniku nanáší vrstev materiálu na sebe, vrstvu po vrstvě, do konečného tvaru podle digitální předlohy 3D modelu a softwarového nastavení. Podle ztuhnutí vrstev polymeru se 3D tisk rozděluje na několik technologií, lišících se od sebe rychlostí zhotovení objektů, jemností detailů a cenou. Jsou zde zahrnuty technologie od open-source typu RepRap až po komerční stroje pracující na principu vytvrzování kapalných polymerů UV zářením.

Hlavní přednosti 3D tisku spočívají v prakticky bezodpadovém procesu výroby. Materiálu je spotřebováno jen takové množství, jaké je nezbytné pro zhotovení objektu. Nehledě na to, že software umožňuje volit hustotu výplně, takže model může být i dutý, nevádí-li to aplikaci. (V případě 3D tiskárny typu RepRap je ovšem dobré zapnout tzv. „skirt“, neboli režim obtáhnutí prostoru tisku, z důvodů rozjetí tisku a ověření kvality či plynulosti tisku a vytyčení prostoru pro tisk. V tomto případě odpad vzniká, ale jedná se pouze o jednu nanesenou vrstvu.) Další výhodou je možnost tisku různých modelů najednou bez nároku na formu. Jelikož data tisku se získávají přímo z 3D modelů, není problém přiřadit jim místo na tiskové podložce.

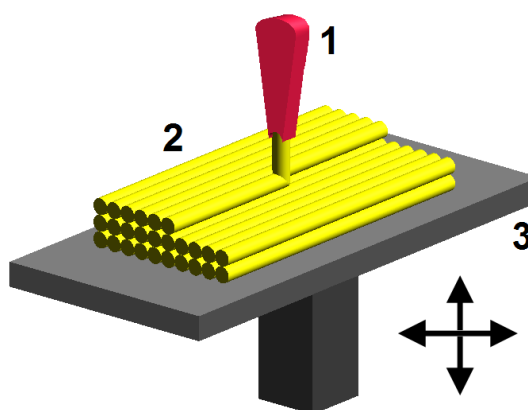
Na druhou stranu existují i omezení, které 3D tisk obnáší. Největší problém představuje zhotovení převisů. Jelikož 3D tisk probíhá po vrstvách, není možné začít novou vrstvu v prázdném prostoru. Jinak řečeno, každá vrstva musí mít podklad. Stejně je to i u tisku úhlů, kdy bez problému lze zhotovit úhel do 120°. Tento problém jde však obejít zhotovením tzv. lešení v režimu support, které podrží převis a poté je lze odstranit. Tím však vzniká další odpad. Z tohoto důvodu je lepší pomocí rotace modelu natočit objekt tak, aby převis nevznikl. To je však omezeno tvarem objektu.

Dalším problémem je časová náročnost. Jelikož 3D tiskem lze zhotovit detail na úrovni setin mm, takto nastavený tisk bude pochopitelně trvat řadu hodin, záleží na

rozměrech objektu. Čas lze zkrátit nastavením rychlosti nebo právě tloušťkou nanášené vrstvy. Čím je ale nanášená vrstva větší, tím se utvoří větší reliéf povrchu a to může působit estetický problém.

### 1.3 RepRap

Z hlediska zpracování polymerů, spadají 3D tiskárny RepRap pod extruzi. Tiskárny typu open-source RepRap jsou založeny na technologii FDM (Fused Deposition Modeling), jakožto aditivní výroba, pracující na principu postupného nanášení vyextrudovaných vrstev na sebe, kde každá další ztuhne na předchozí. Materiál ve formě struny, tzv. filamentu, je nataven na teplotu odpovídající teplotě tečení daného materiálu a materiál je přes trysku extrudován ve formě vlákna na podložku. Tryska je krokovými či servo motory řízena ve všech směrech, což umožňuje vytvářet daný objekt podle grafické předlohy. Schéma technologie FDM znázorňuje obrázek č. 3. Materiál nemusí mít funkci pouze stavební, ale také podpůrnou, je-li třeba zhotovit převis či velký úhel. Pozdější úpravy dovolují použití více extruderů. Díky tomu lze zhotovit objekt vícebarevně nebo lze vytvořit podpůrné lešení pro převisy z jiného materiálu, např. polyvinylalkoholu, který je rozpustný ve vodě. Lze tak velmi efektivně odstranit podpůrné můstky ponořením výrobku do vody, načež se podpůrný polyvinylalkohol rozpustí, zatímco objekt nikoliv. [6], [10], [11], [12]

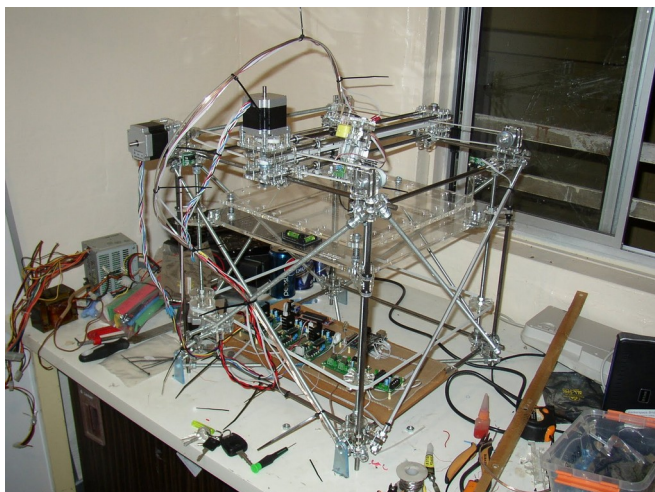


Obr. 3: Technologie FDM [13]

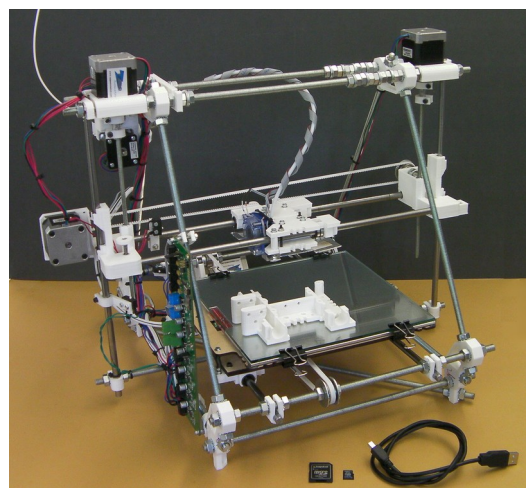
1. tryska, 2. vyextrudovaný materiál, 3. podložka

Pojem RepRap je zkratkou anglického názvu pro Replication Rapid prototyper. Toto označení vzniklo na Britské univerzitě v Bath Adrianem Bowyerem v roce 2005

pro zařízení, které je schopné do určité míry vyrobit (replikovat) samo sebe v relativně krátkém čase (rapid). Tímto způsobem vznikly první 3D tiskárny tohoto typu s názvy Darwin (obr. 4) a Mendel (obr. 5). [8], [9]



Obr. 4: Prototyp Darwin [14]



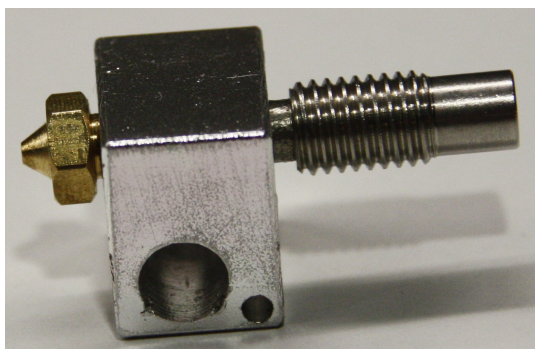
Obr. 5: Prototyp Mendel [15]

Darwin byl prvně sestrojeným prototypem 3D tiskárny, jehož díly byly pouze z kovu. Darwin poskytl možnost zhotovit další díly pro svého nástupce – repliky Mendel. Zároveň Mendel opravil nedostatky prototypu Darwin, došlo ke zredukování hmotnosti celého zařízení, redukci vibrací os, zvětšení tiskové plochy a možnosti měnit tiskové materiály.

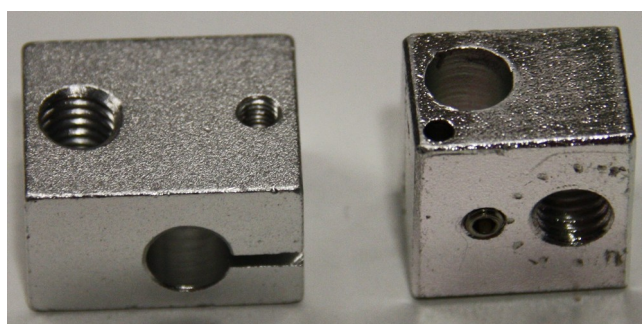
Části, které je možné replikovat jsou pouze plastové části držící pojezdy os či tiskovou hlavu. Představují tedy přibližně 15 % celé konstrukce 3D tiskárny. Jsou to ovšem důležité komponenty, díky kterým lze snížit celkovou cenu stroje. [9]

Zbytek přístroje tvoří jednoduchá konstrukce z kovových profilů či závitových tyčí a dalšího konstrukčního a spojovacího materiálu. O funkčnost chodu se stará základní deska dalšího open-source projektu tzv. Arduino. Jedná se o jednoduchý obvod podobný základní desce počítače, s tím rozdílem, že nemusí mít nainstalovaný operační systém. Pohonem jsou zde krokové motory zapojené na Arduino, které hýbou třemi osami nezávisle na sobě. Osu X a Z představuje tisková hlava (extruder) a osu Y tisková podložka. Tisková hlava se skládá z krokového motoru, podavače filamentu a tzv. „hotendu“ (obr. 6). Na tiskovou podložku je po vrstvičkách nanášen materiál. Ten je zde ve formě struny, tzv. filamentu o tloušťce, buď 3 mm, nebo 1,75 mm, který se taví ve spodní části tiskové hlavy – „hotendu“, skládajícího se z tzv.

„heatboxu“ (obr. 7), trysky (obr. 8) a hrdélka (obr. 9), kudy se přivádí filament navinutý na cívce. Filament je postupně podáván krokovým motorem s ozubeným kolečkem, který je opět řízený Arduinem. Vrstvy filamentu jsou nanášeny na sebe, každá další vrstva je natavena na předchozí. Vyhřívání heatboxu je řešeno pomocí odporového topného tělíska řízeného teplotním čidlem také napojeným na Arduino. Převody jsou zde řešeny pomocí ozubených kol či řemenů. Zdrojem energie je libovolný počítačový zdroj. [5], [8], [9]



Obr. 6: „Hotend“



Obr. 7: Typy „heatboxů“



Obr. 8: Typy trysek



Obr. 9: Typy hrdélek

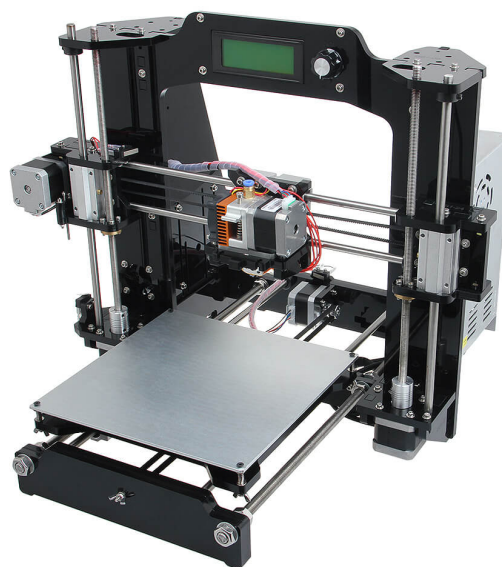
Jak je patrné 3D tiskárna není nic nemožného na sestavení a pokud existuje možnost alespoň částečné seberekopie, poté je obtížné takovou věc přivlastnit či patentovat. Z tohoto důvodu se z projektu RepRap stává open-source – volně šiřitelný nástroj zahrnující otevřený hardware i software komukoliv, kdo má zájem být jeho součástí a podílet se na jeho rozvoji. [8], [16]



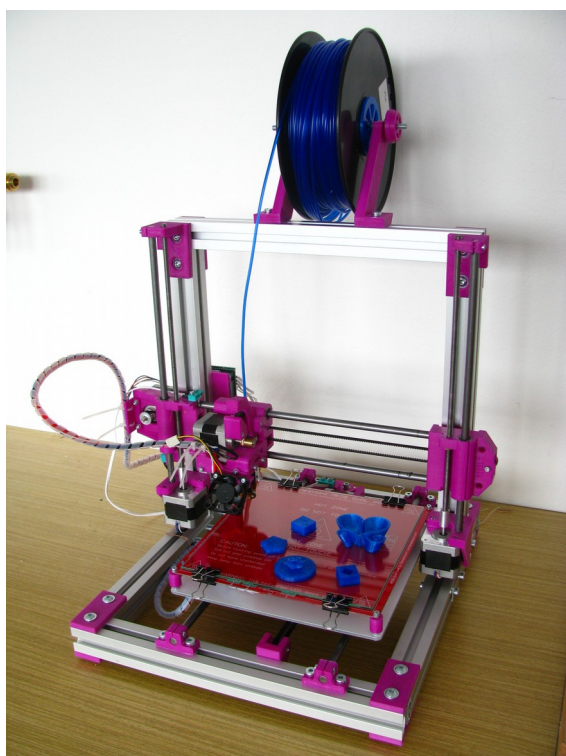
Postupem času se projekt RepRap celosvětově rozšířil. Vzniklo mnoho podob 3D tiskáren nesoucí mnohá označení. Česká republika nezůstala pozadu. Zasloužil se o to vývojář Josef Průša, který stál u zrodu 3D tisku v České republice. Zasluhou takovýchto vývojářů byla přidána zásadní vylepšení, jako např. zjednodušení celé konstrukce, díky které sestavení stroje trvá hodiny a ne dny nebo týdny, jako v případě strojů odvozených od prvních dvou prototypů. Dále např. vyhřívání tiskové podložky z důvodů zabránění kroucení výrobku. Na takovéto i další modifikace postupně přicházeli další vývojáři a vzniklo tak mnoho konceptů po celém světě ať už open source nebo komerční produkty pod názvy např. Rebel, Geeektech, EASY3DMAKER, ULTIMAKER a další, lišících se zejména v konstrukci a tiskové hlavě. Některé z nich jsou vyobrazeny na obrázcích 10 až 13. [8], [17]



Obr. 10: Original Prusa i3 MK2 [17]



Obr. 11: Geeetech I3 X [17]



Obr. 12: Rebel 2 [18]



Obr. 13: Ultimaker 3 [19]

#### 1.4 Příprava dat k 3D tisku

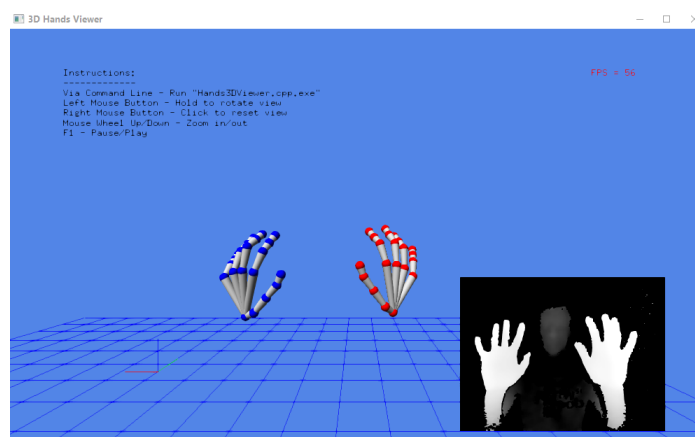
Celý proces začíná navržením 3D modelu pro samotné zhotovení. Navrhnutí modelu lze dnes provést několika způsoby, z nichž nejčastější jsou dvě možnosti. Lze použít nejrůznější grafické softwary s 3D prostředím. V 80. letech minulého století nastal rozvoj CAD (Computer Aided Design) a CAM (Computer Aided Manufacturing) softwarů, zahrnujících nástroje pro tvorbu reálných objektů či jevů ať už ve 2D nebo 3D prostředí. Nachází se zde mnoho registrovaných i open-source softwarů, z nichž nejznámější je nejspíše AutoCAD, vyvinutý společností Autodesk anebo Blender, jakožto zástupce open-source softwaru použitý i pro tuto práci. CAD programy jsou určeny pro tvoření modelů jakýchkoli objektů různě složitých tvarů.

Jako druhou alternativou lze použít 3D scanner. Jedná se o moderní zařízení, které na základě dvou paralelních kamer dokáže rozpoznat objekt v prostoru a díky odražejícímu paprsku pozná i hloubku objektu. Vývojem těchto zařízení se mimo jiné zabývá společnost Sense, dceřiná společnost firmy 3D Systems. V roce 2015 vznikl projekt ve spolupráci společností Intel a Sense s názvem Intel RealSense, díky kterému se toto zařízení značně zmenšilo a bylo jej možné vestavět do rámu

notebooků a tabletů. Tím odpadá nutnost připojení dalšího hardwaru. Navíc nejen že umožňuje převádět reálné objekty do digitální podoby, umožňuje i bezdotykové ovládání softwarů. Obrázek 14 zobrazuje externí 3D scanner od firmy Sense a na obrázku 15 je snímek z prostředí ovladače pro bezdotykové ovládání počítače díky Intel RealSense technologii.



Obr. 14: 3D scanner Sense [20]



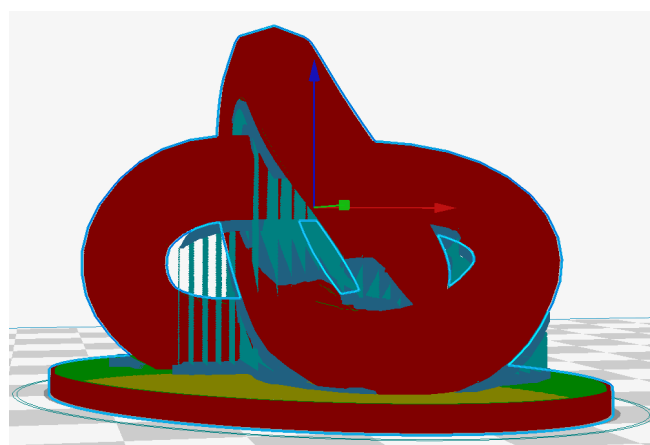
Obr. 15: Prostředí ovladače Intel RealSense kamery

Finální model je potřeba vyexportovat do pevného souboru. K tomu slouží formáty např. .obj, .ply nebo jako v tomto případě .stl. Stl představuje formát vycházející z prvně použitých softwarů pro stereolitografii, tento formát je základ pro většinu technologií včetně FDM. [21]

Vyexportovanému souboru jsou potřeba přidělit souřadnice na tiskové podložce a nastavit parametry tisku. K tomu slouží programy obecně zvané „slicery“. Název je odvozen od anglického slova slice (nakrájet, rozvrstvit). Tyto programy tedy rozvrství model na jednotlivé vrstvy o definované tloušťce a nastaví rychlost pojezdu os při tisku, rychlost pojezdu os bez tisku, rychlost extrudování, rychlosti retrakce (režim obráceného chodu motoru tiskové hlavy z důvodů zabránění tvorby vlasových přetoků – obr. 16) podle uživatelem zadaných hodnot. Dále lze volit teplotu při které se má filament tavit, ta je daná teplotou tečení materiálu a teplotu tiskové podložky, která je dána teplotou skelného přechodu materiálu. Lze přizpůsobit výkon chlazení, zvolit a nakonfigurovat režim skirt, upravit režim hustoty výplně a to i z hlediska tvaru výplně. Je-li potřeba, lze nastavit parametry tisku podpůrného lešení (Obr. 17) nezávisle na parametrech tisku modelu. Je-li k dispozici tisková hlava s více extrudery, lze nakonfigurovat opět každý extruder zvlášť.



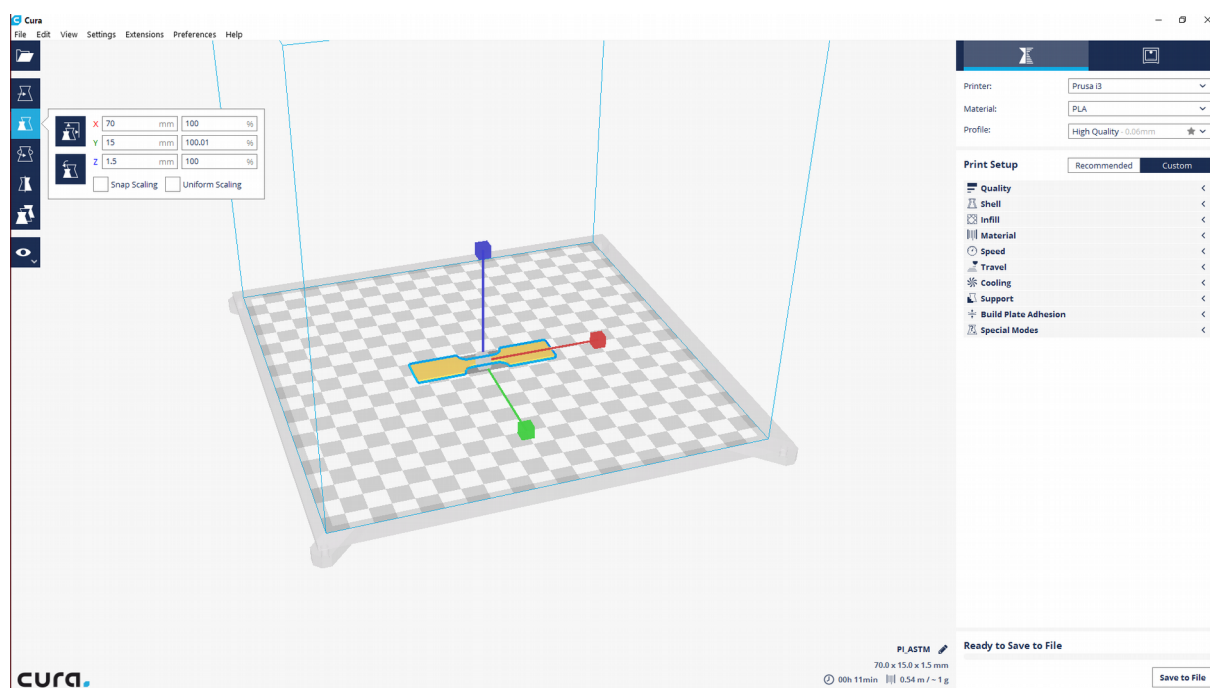
Obr. 16: Příklad tisku bez retrakce [22]



Obr. 17: Příklad objektu s podpurným lešením

Parametr, na který se zaměřuje tato práce je parametr flow. Jedná se o kompenzaci průtoku filamentu tryskou, respektive je to procentuální hodnota toku materiálu vztažená na rychlost pohybů os X a Y vůči ose Z, tedy tloušťce nanášené vrstvy. Množství materiálu, které proteče tryskou je násobeno procentuální hodnotou parametru flow. Jinak řečeno, při 100% hodnotě flow, by mělo být dosaženo toho, aby tryskou proteklo přesně tolik materiálu, aby jej bylo spotřebováno takové množství, jaké je potřeba na zhotovení vrstvy o dané tloušťce při zvolené rychlosti pohybů os X a Y. Manuálně to znamená rychlost otáčení pastorku motoru tiskové hlavy, který posouvá filament do hotendu. Při vysoké rychlosti pohybů os by se mohlo stát, že by krokový motor posouvající filament, nestíhal nanášet vrstvu na podložku a tím by způsoboval nehomogenity nanesených vrstev a tudíž vady výrobku. Tato práce má za úkol ověřit funkčnost této kompenzace právě na fyzikálně-mechanických vlastnostech zkušebního tělíška, zhotoveného při 100% hodnotě parametru flow. Nehomogenity způsobené nesprávnou funkcí parametru flow se projeví na pevnosti či tvrdosti výrobku. Tento parametr dovoluje volit hodnoty i větší než 100 %.

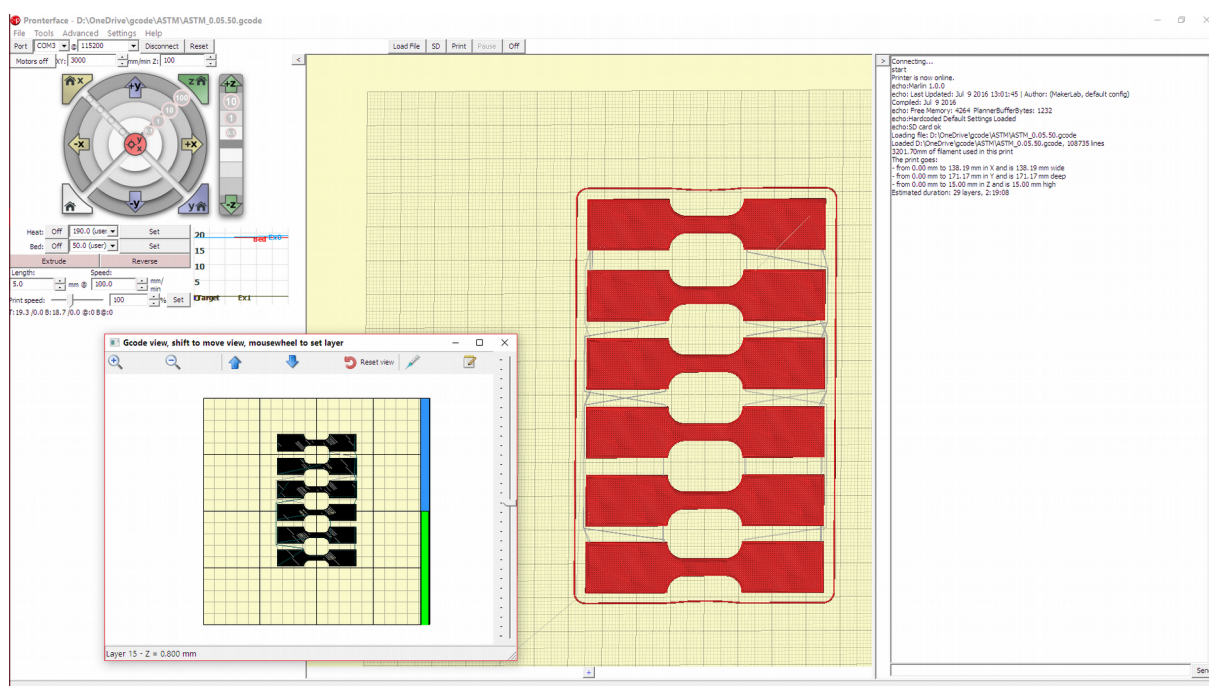
Pro tuto práci byl použit open-source software zvaný CURA ve verzi 2.3.1 od společnosti Ultimaker. Prostředí programu zobrazuje obr. 18.



Obr. 18: Prostředí softwaru CURA 2.3.1

Výstup z tohoto softwaru představuje soubor .gcode. Je to soubor obsahující všechna nastavená data tisku, převedená do programovacího jazyka, podle kterého řídicí jednotka – arduino pozná jak řídit celý proces tisku.

Soubor .gcode je konečným formátem, který lze nahrát do samotného ovládacího softwaru 3D tiskárny. Ovládací software použitý pro tuto práci se jmenuje Pronterface. Opět open-source umožňující kalibraci os, řízení extruze či vyhřívání a v neposlední řadě samozřejmě sledování a kontrolování průběhu tisku. Prostředí programu je vyobrazeno na obrázku č. 19. Je-li na Arduinu zapojený slot pro paměťové karty, lze na kartu vložit soubor .gcode a tisk tak spustit přímo z ovládacího panelu na tiskárně, bez nutnosti připojení počítače.



Obr. 19: Prostředí softwaru Pronterface

## 1.5 Materiály pro Fused Deposition Modeling (FDM)

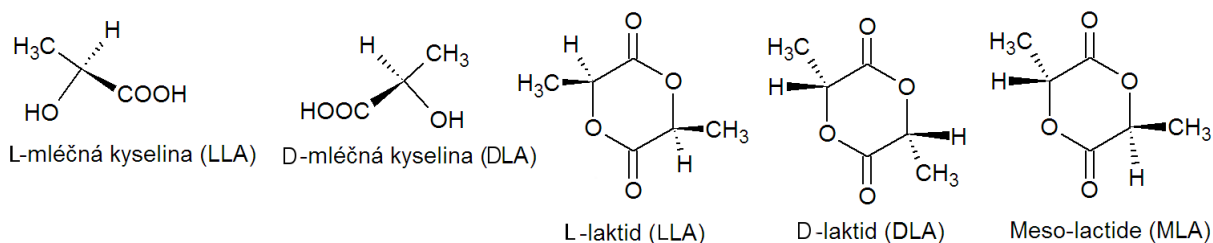
FDM technologie používá nejrůznějších termoplastických polymerních materiálů ve formě struny, tzv. filamentu. Tyto filameny jsou navinuty na cívce o hmotnosti cca 1kg a tloušťce 1,75 nebo 3 mm. Starší typy tiskáren používaly 3mm filameny, dnes už jsou téměř všechny tiskové hlavy přizpůsobeny tloušťce 1,75 mm. Důvodem zúžení tloušťky struny se zdá být větší délka návinnu při dané hmotnosti cívky. Pro tuto práci byl použit filament o tloušťce 1,75 mm z materiálu PLA – kyseliny polymléčné (polylactic acid), surové a modifikované ve formě kopolymeru s PHA (polyhydroxyalkanoáty) se zvýšenou elasticitou, dále modifikované fosforescentní příměsí svítící ve tmě a kompozitem s bronzovým prachem.

### 1.5.1 Kyselina polymléčná (PLA)

PLA patří do skupiny polymerů označujících se jako „bio-based“, tedy polymery, jejichž výchozí suroviny lze získat z biologických materiálů. V případě polymléčné kyseliny to může být kukuřičný či bramborový škrob, řepa, cukrová třtina, atd. Základní surovinou pro výrobu je glukosa, která se nejefektivněji získává právě z kukuřičného škrobu. Z tohoto hlediska se jedná o materiál, který lze považovat za ekologickou

alternativu k polymerům založeným na petrolejové chemii. Dále je PLA zajímavá svou biodegradabilitou a to nejen v enviromentálním prostředí, ale také v organismu – lidském těle. Z tohoto hlediska je použitelná v medicíně nebo potravinářství. Produkty vzniklé biodegradací jsou prakticky netoxické.

Monomer pro výrobu PLA je kyselina mléčná (2-hydroxypropanová kyselina), reagující ve smyslu polykondenzace. Kyselina mléčná obsahuje chirální centrum, díky němu vykazuje optickou aktivitu, stejně jako produkt. Monomer se vyskytuje ve 2 enantiomerech, L a D, respektive S a R, mléčné kyselině. Dimery těchto kyselin jsou cyklické sloučeniny, reagující mechanismem polymerace s otevřením kruhu. Dimery jsou celkem tři a nesou označení podle toho, jaký optický izomer obsahují. LLA je dimerem dvou L-mléčných kyselin, DLA potom dimer dvou D-mléčných kyselin a MLA dimer L-mléčné kyseliny a D-mléčné kyseliny. Vzorce monomerů a dimerů jsou vyobrazeny na obrázku 20. Kvůli těmto třem formám dimeru se kyselina polymléčná rozlišuje na tři typy – PLLA, PDLA a PDLLA. PLLA je polymer opticky aktivní a krystalinický, stejně jako PDLA. PDLLA je amorfní polymer bez optické aktivity. Nejčastějším typem je právě PLLA, vzhledem k jejímu nízkonákladovému procesu výroby. [23]



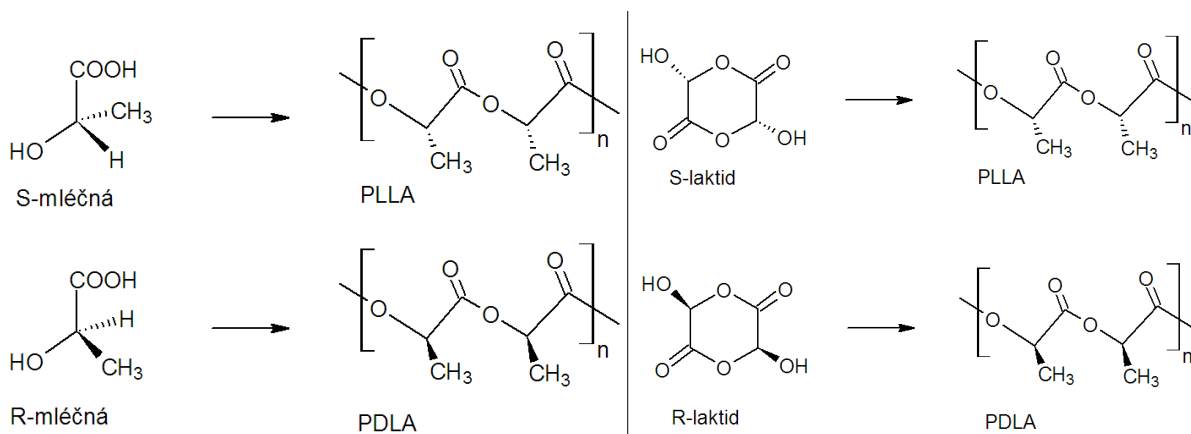
Obr. 20: Monomery a dimery pro výrobu PLA

Kyselina mléčná je produktem bakteriální fermentace glukosy, získané ze škrobu. Výtěžek či čistota získané kyseliny mléčné závisí na druhu bakterie *lactobacillus* použité pro kvašení a samozřejmě na podmínkách kvašení (pH, aerace, koncentrace N<sub>2</sub>, atd). Dále je kyselina mléčná produktem anaerobní metabolické přeměny glukosy, tzv glykolýzy, která nastává při zvýšené svalové námaze.

Polymer lze získat dvěma způsoby, buď polykondenzací nebo polymerací s otevřením kruhu. Reakce probíhají za přítomnosti katalyzátoru na bázi cínu, který zapříčiňuje vysokou molekulovou hmotnost polymeru, jejíž hodnoty se pohybují mezi 10<sup>5</sup> – 10<sup>6</sup> g/mol. Dále katalyzátor zabraňuje transesterifikaci a tvorbě racemické směsi.

Polykondenzace (Obr. 21) probíhá při určitých podmínkách. Teplota reakce dosahuje 200 °C za sníženého tlaku, cca 0,6 kPa. Reakční doba je v řádech několika hodin. Dále je při polykondenzaci nutné odebírat vznikající vodu, aby bylo dosaženo dostatečné konverze a tedy i molekulové hmotnosti.

Polymlečná kyselina získaná polymerací s otevřením kruhu (Obr. 22) vykazuje větší hodnoty molekulové hmotnosti než PLA získaná polykondenzací. Polymerace s otevřením kruhu probíhá při nižší teplotě než polykondenzace, cca 120 °C. Nižší teplota zaručuje vyšší optickou čistotu vznikajícího produktu. Reakční doba je zhruba stejná.



Často se PLA používá jako součást kopolymerů. Kyselina mléčná či její dimery kopolymerují z řadou monomerů, např. kyselinou glykolovou, butandiolem nebo ε-kaprolaktámem. V případě této práce byl použit kopolymer PLA/PHA, tedy kopolymer s polyhydroxyalkanoáty.

Polyhydroxyalkanoáty (PHA) představují skupinu biopolymerů, syntetizovaných intracelulárními procesy uvnitř eukaryotických i prokaryotických bakterií. Jedná se o lineární polyestery, zahrnujících více než 150 různých monomerních stavebních jednotek, na bázi 3-hydroxyalkanoátů.

Biosyntéza PHA je založena na obnovitelných zdrojích podobně jako PLA. Lze použít opět škrob, dále tuky, alkoholy, organické kyseliny nebo plyny jako metan a CO<sub>2</sub>. PHA jsou uvnitř buňky syntetizovány jako zdroj energie. Podobně slouží např. tuky v lidském těle, které se ukládají jako zdroj energie, také PHA uvnitř buňky slouží jako zdroj ATP či jiných metabolických produktů. Takovýto polymer bude zaručeně



biodegradabilní a navíc představuje materiál s vlastnostmi téměř shodnými se syntetickými polyestery. Mnoho polymerů skrývajících se pod zkratkou PHA je opticky aktivních, mohou obsahovat boční řetězce s dalšími funkčními skupinami. Tím se značně rozšiřuje použití PHA právě pro kopolymery. Teplota tečení dosahuje 180 °C podobně jako PLA. Z tohoto důvodu je výhodná kopolymerace těchto dvou polymerů. Získaný termoplast může být elastičtější a v případě filamentu použitého pro tuto práci, PHA zapříčiňuje fluorescenci. [23]

PLA je bezbarvý semikrystalický termoplastický polymer s elektroizolačními vlastnostmi, odolný hydrolyze a teplotám do 60 °C. Teplota skelného přechodu  $T_g$  kyseliny mléčné se pohybuje okolo 60 °C a teplota tečení  $T_f$  začíná na 170 °C. Velká výhoda je minimální objemová teplotní roztažnost, díky čemuž je PLA jeden z nejčastějších materiálů pro 3D tisk. S tiskovou podložkou opatřenou speciální lepící páskou lze tisknout i bez vyhřívání. Jinak lze tisknout na podložku s papírovou lepící páskou při teplotě cca 50 °C.

Polymlečná kyselina je efektivní náhradou syntetických polymerů. Zastupuje je převážně v obalových materiálech, dále v elektrotechnice, potravinářském a automobilovém průmyslu, zemědělství či jako biodegradabilní příměs do ostatních polymerů. Na obrázku 23 je příklad využití v potravinářství jako čajový sáček. Ve směsi s polykarbonátem, PLA představuje filtr krátkovlnných záření. Takováto uplatnění však zamezují biodegradabilitě materiálu, proto je nutné vždy zvážit kompromisy.



Obr. 23: Čajové sáčky z PLA [24]



Obr. 24: Rentgenový snímek chodidla s kostní fixací z PLA [25]

Své uplatnění našla PLA v medicíně. Díky schopnosti vstřebávání se v tkáních a biodegradabilitě v buňkách se z PLA vyrábějí kostní implantáty, šrouby či jiné fixace (Obr. 24). Fixace se po zhojení tkáně či kosti v těle rozloží. Dále se používá jako nosič léků. Dle molekulové hmotnosti lze určit dobu vstřebávání léčivé komponenty. [23]

### 1.5.2 Akrylonitril Butadien Styren (ABS)

ABS představuje termoplastický terpolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Vyrábí se převážně dvěma způsoby. Disperzací butadien-akrylonitrilového kaučuku se styren-akrylonitrilovým kopolymerem nebo roubováním monomerů styrenu a akrylonitrilu na předem připravený elastomer a následným míšením kopolymeru styren-akrylonitril.

Polymery ABS jsou heterogenní materiály, obsahují amorfni spojitou fázi styren-akrylonitrilového kopolymeru, ve které jsou rozptýleny malé částice polybutadienového kaučuku. Kvůli přítomnosti kaučuku však ztrácejí odolnost na povětrnosti a především jsou náchylné na UV záření. Oproti tomu mají velmi dobré mechanické vlastnosti, jsou snadno zpracovatelné, chemicky odolné a výborně izolují. Vzhledem k heterogenní struktuře jsou neprůhledné,  $T_g$  se pohybuje v rozmezí 80 – 105 °C. Hodnota  $T_f$  se pohybuje okolo 240 °C.

ABS se používá pro vnější i vnitřní díly automobilů (palubní desky, mřížky masek), elektrotechnická zařízení (telefony, notebooky), domácí spotřebiče, nábytek, a mnoho dalšího. Byl to první materiál použitý pro 3D tisk. Jeho nevýhoda je velká objemová kontrakce při chladnutí, což má za následek kroucení. Zabránění zkroucení je třeba vytápět tiskovou podložku až na 100 °C a nejlépe použít vytápěnou komoru. [26]

### 1.5.3 Ostatní polymerní materiály pro 3D tisk

Alternativou k ABS se zdá být polymer ASA, akrylonitril styren akrylát, který se vyznačuje vyšší stálostí na povětrnosti díky nahrazení butadienového kaučuku akrylátovým kaučukem. Vykazuje nižší teplotní roztažnost, při zachování mechanických vlastností a chemické odolnosti. [26]

Dalším velmi vhodným materiálem je PET, polyethyltereftalát, nejrozšířenější zástupce lineárních polyesterů. Pro 3D tisk se používá amorfni transparentní PETG, glykolem modifikovaný PET, s  $T_g$  okolo 70 °C. Výhodou je tisk bez jakékoliv úpravy tiskové podložky, lze tisknout na čisté sklo.

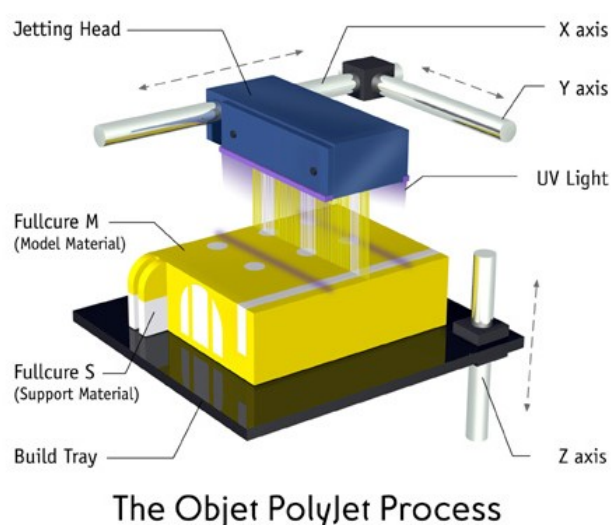
Dalšími méně častými materiály jsou, polypropylen (PP), polymethylmethakrylát (PMMA, plexisklo), Nylon, Flex (materiál vykazující zvýšenou elasticitu), či různé kompozity např. PET s karbonovými vlákny, PLA s kovovým prachem nebo dřevěnou moučkou. [27]

## 1.6 Ostatní technologie 3D tisku

Jednotlivé technologie 3D tisku se rozlišují podle použitého materiálu a způsobu vytváření vrstev. Materiál může být ve formě struny, jak je tomu u FDM technologií nebo ve formě prášku či fotocitlivé pryskyřice, jak tomu je u SLA a u následujících komerčních technologií.

### 1.6.1 PolyJet, MultiJet Printing (MJP)

Technologie PolyJet/MJP je založena na tiskové hlavě podobné inkjetové digitální tiskárně. Tisková hlava obsahuje UV lampu a na místo inkoustu používá polymerní náplň. Jak název napovídá, tiskových hlav je tu více, tudíž i náplní, z pravidla dvě. Jedna hlava slouží k nanášení polymerního materiálu s fotoiniciátorem pro zhotovení objektu, druhá nanáší polymer bez fotoiniciátoru, který slouží jako podpora pro převisy. Hlava jezdí nad podložkou z jedné strany na druhou a lineárně nanáší materiál v minimální výšce 0,016 mm, který je v zápětí ozářen. Materiál bez fotoiniciátoru zůstane nevytvrzen a lze jej tak velmi snadno odstranit rozpuštěním. Podobně jako u inkjetu i zde je materiál vytlačován na základě piezoelektrického efektu. Schema zařízení je znázorněno na obrázku 25. Tímto způsobem lze snadno zhotovit libovolný objekt s velmi přesnými detaily v čase kratším, než tomu je u FDM technologií. Na tomto obecném principu jsou založeny komerční stroje firem 3D Systems (MJP), Stratasys, Solidscape (PolyJet), Object, HP a řada dalších. [28], [29]



Obr. 25: Schéma technologie polyjet/MJP [30]

### 1.6.2 ColorJet Printing (CJP)

Technologie CJP pocházející od 3D Systems umožňuje plnobarevný tisk. Tato technologie se nejvíce blíží tisku jako takovému. Využívá polymer ve formě prášku, na který je inkjetovou hlavou nanášen barevný inkoust podobně jako na papír. Práškový materiál působením inkoustu ztvrdne a následně je překryt další vrstvou tohoto materiálu, na kterou je opět nanesen inkoust. Celý proces se opakuje až do získání žádaného objektu. Z výrobku je nutné odstranit přebytečný nevytvrzený materiál a pro zvýšení barevnosti lze výrobek nalakovat. Materiál, který zbyde, lze opakovaně použít. [31], [32]

Na obrázcích 26 až 29 jsou vyobrazeny 3D tiskárny od výše zmíněných firem. Solidscape je dceřinou společností společnosti Stratasys, zabývající se výrobou šperků či zdravotnického materiálu jako např. dentálních či jiných implantátů. [33]



Obr. 26: Stratasys PolyJet J750 [34]



Obr. 27: 3D Systems ProJet MJP 3600 Max [35]



Obr. 28: 3D Systems ProJet CJP 360 [36]



Obr. 29: SolidScape MAX2 [37]

Materiály, které využívají tyto technologie, jsou komerčně vyráběné směsi pod různými názvy. Polyjet technologie firmy Stratasys využívá materiály pod názvy, např. Digital Material (fotocitlivý kompozitní materiál umožňující vícebarevný tisk), Transparent (fotopolymerní materiál podobný PMMA), Simulated Polypropylen (fotopolymer s vlastnostmi polypropylenu), Rubber-like (fotopolymer s vlastnostmi polyisoprenu), dále Dental Material, Rigid Opaque a další. [38]

MultiJet Printing od firmy 3S Systems využívá materiál s názvy VisiJet Crystal, Tango Gray, Tango Black nebo Tango Plus. ColorJet Printing, rovněž od firmy 3D Systems, používá VisiJet PXL. [32], [39]

### 1.6.3 Selective Laser Sintering (SLS)

Podstatou technologie SLS je bodové spékání práškového materiálu  $\text{CO}_2$  laserem. Tento materiál může být polymer, kov, sklo či keramika. Laser kopíruje konturu dle digitální předlohy dané 3D modelem. Po každé dokončené vrstvě je nanášena nová vrstva práškového materiálu, kterou opět ozáří laser. Takto celý proces pokračuje až do finálního tvaru, z výrobku se odstraní nespečený práškový materiál, který lze opakovaně použít. Na obrázku 30 je vyobrazen komerční stroj firmy 3D Systems ProX 800 pracující na technologii SLS.

Velikou výhodou této technologie, stejně tak jako technologie CJP, je skutečnost, že není potřeba používat podpůrného lešení. Práškový materiál je nanášen ve vrstvách po celé ploše a spékán je pouze po konturách objektu, nespečený materiál tak slouží jako podpora pro převisy. Díky tomu lze tyto technologie teoreticky považovat za bezodpadové. Výrobky zhotovené technologií SLS jsou velmi odolné a konkurují dosud běžným technologiím jako vstřikování, lisování, a další.[40], [41]

Materiály pro technologii SLS jsou opět komerčně vyráběné kompozity a kopolymery na bázi polyamidů od firmy 3D Systems s názvy Aluminum-Filled (PA12-AL), Impact-Resistant Nylon (Duraform EX), Nylon (Duraform PA), Glass-Filled Nylon (Duraform GF), Rubber-Like (Duraform Flex Plastic). [42]

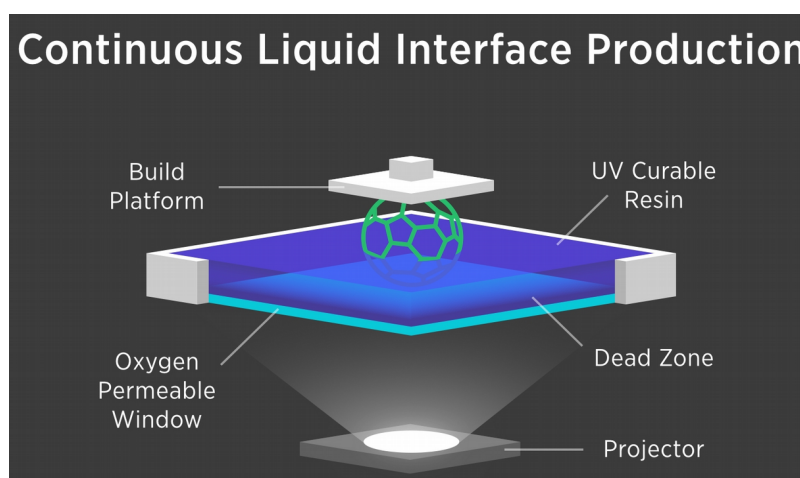


Obr. 30: 3D systems ProX 800 [43]

#### 1.6.4 Continuous Liquid Interface Production (CLIP)

Zatím nejpokročilejší technologií v oblasti 3D tisku je technologie CLIP: Continuous Liquid Interface Production vyvinutá společností Carbon, která představuje doposud nejrychlejší zhotovení objektu ze všech technologií 3D tisku. Čas potřebný k dokončení procesu se pohybuje v řádů jednotek sekund až desítek minut, záleží opět na rozměrech modelu. Ty se pohybují v řádech jednotek  $\mu\text{m}$  až několik desítek cm. Jedná se tedy o zhotovení výrobku 25 – 100  $\times$  rychleji než FDM technologií. [44]

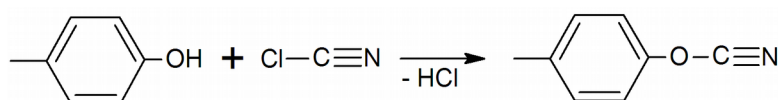
Princip CLIP technologie spočívá opět ve vytvrzování pryskyřice UV zářením. Tento děj je však inhibován vzdušným kyslíkem. Toho se využívá k vytvoření počáteční vrstvy objektu. Spodní část zařízení je tvořena projektoem emitujícím UV záření a nádobou, jejíž dno je tvořeno sklu podobným organickým materiálem, navrženým tak, že je propustný pouze pro UV záření a kyslík. Horní část zařízení tvoří tisková podložka, která je ponořena do nádoby s fotocitlivou pryskyřicí. Vyvážením průchodu kyslíku spodní stěnou nádoby, je na dně vytvořena počáteční vrstva o tloušťce řádově desítky  $\mu\text{m}$ , tzv. mrtvá zóna (dead zone). Od této chvíle se celý systém stává nepropustný pro kyslík, respektive propustný pouze pro UV záření z projektoru. Tisková podložka se pohybuje směrem nahoru a vzhůru nohama vytahuje ozářené vytvrzené vrstvy pryskyřice ven. Materiál vtéká pod vytvrzenou vrstvu a vzápětí je také ozářen projektoem, díky čemuž ztvrdne. Celý proces zobrazuje schéma technologie (obr. 31). Projektor promítá obrys vrstvy objektu v celé ploše, nikoliv jen bodově nebo lineárně, jak je tomu v případě nanášení materiálu u předchozích technologií. Tím značně podporuje plynulost celého procesu.[44], [45], [46]



Obr. 31: Schéma technologie CLIP [47]

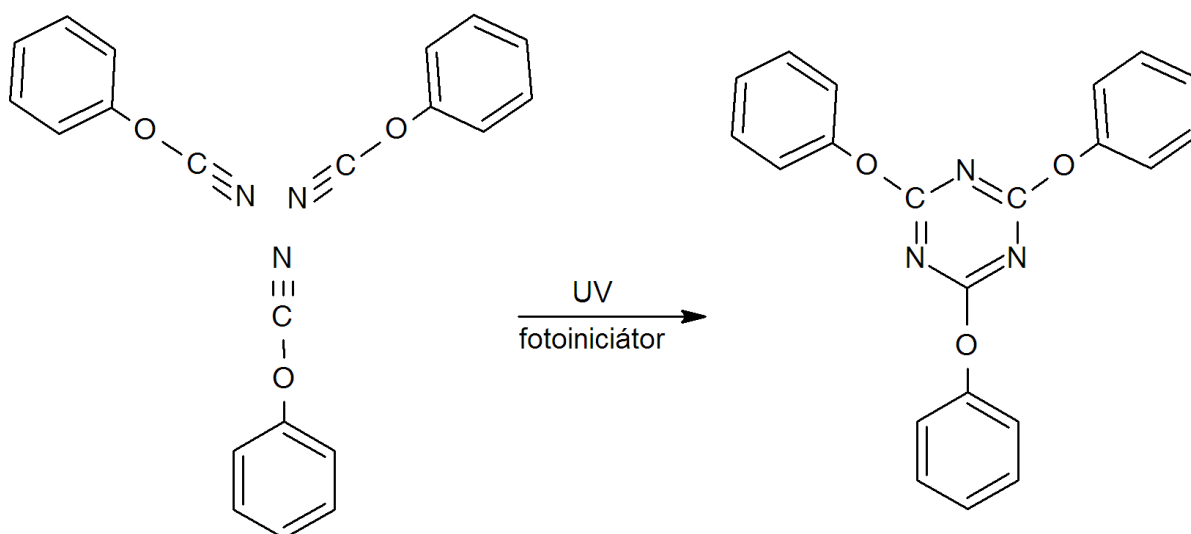
CLIP technologie využívá polymerní kapalné pryskyřice na bázi polyurethanů, kyanátových pryskyřic, epoxidů a urethan methakrylátů nesoucí označení RPU, FPU, EPU, CE, EPX a UMA mající nejrůznější vlastnosti. Od čirých pryskyřic po nejrůznější barvy, od elastických po velmi pevné a tepelně odolné materiály. [48]

Kyanátové pryskyřice (CE) spadají do oblasti reaktoplastických materiálů. Vynikají velmi dobrou tepelnou stálostí a mechanickou pevností. Funkční skupinu představuje kyanátová skupina  $-O-C\equiv N$ , zpravidla na aromatickém jádře. Kyanáty vznikají reakcí fenolů s kyanhalogenidy dle následující reakce (obr. 32).



Obr. 32: Reakce vzniku kyanové skupiny

Tyto pryskyřice lze vytvrdit mnoha způsoby, např. teplem, reakcí s epoxidovými skupinami nebo jako v případě technologie CLIP UV zářením. Na místo termoiniciátorů nebo katalyzátorů je zde použit fotoiniciátor. Ten zapříčiní cyklomerizaci tří kyanátových skupin (cyklotrimerizaci) za vzniku cyklických sloučenin, tzv. kyanurátů. (Obr. 33)

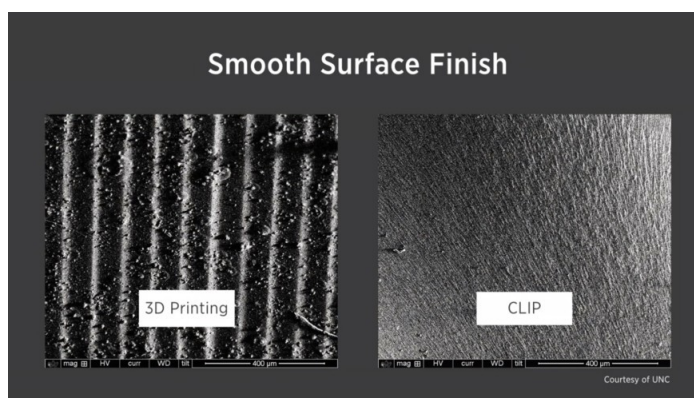


Obr. 33: Reakce vzniku kyanurátové vazby

Vzniklá kyanurátová vazba zaručuje tepelnou stálost do stovek °C. Teplota skelného přechodu může být i vyšší než 350 °C. Kyanátové pryskyřice ve směsi s epoxidovými pryskyřicemi vytvářejí natolik pevné materiály, které jsou schopné odolat tlakům a teplotám při explozi a lze je tak použít jako identifikační tělíska výbušin. [49], [50], [51]

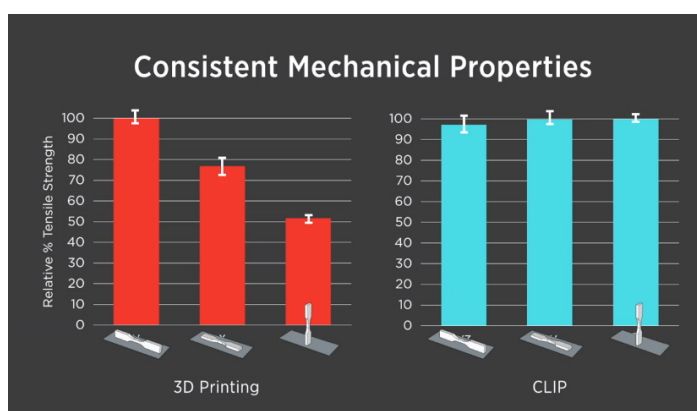


CLIP technologie je unikátní nejen v principu procesu zhotovení objektu, který se dá považovat za bezodpadový, ale také ve struktuře povrchu objektu. Všechny výše zmíněné technologie nanáší vrstvy materiálu na sebe a tím tvoří více či méně reliéfní povrch. Výrobek zhotovený technologií CLIP je hladký po celém svém povrchu (obr. 34).



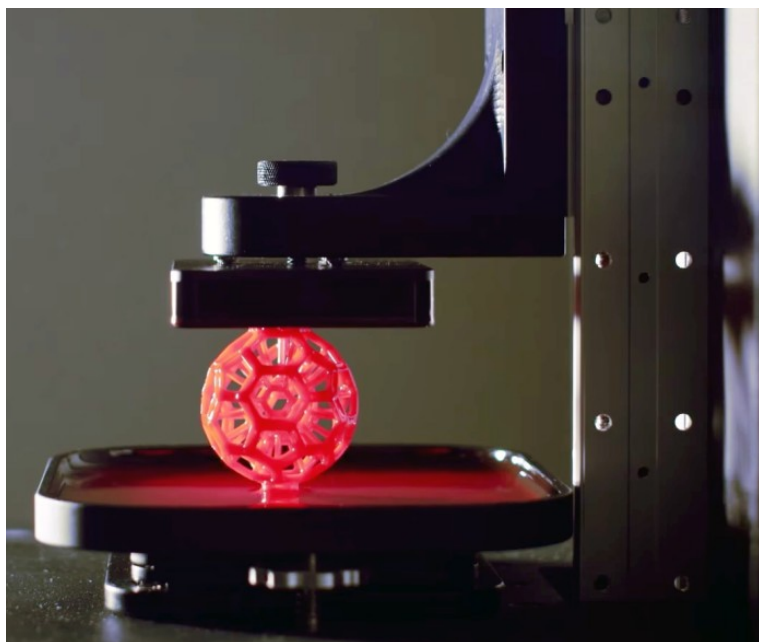
Obr. 34: Rozdíl povrchů objektů ostatních technologií a technologie CLIP [46]

Dále u ostatních aditivních výrobků závisí mechanické vlastnosti mimo jiné na geometrické orientaci objektu. Nanášené vrstvy materiálu jsou orientovány vždy kolmo na osu Z, tedy na výšku objektu. Objekt, např. zkušební tělíčko, orientovaný na výšku, bude mít z vrstev zhotovenou užší část a ještě navíc příčně k ose trhacího stroje. Takto zhotovený výrobek bude mít značně nižší pevnost v tahu než výrobek orientovaný na délku či na šířku, jehož vrstvy budou tvořit delší či širší stranu objektu. Technologie CLIP tím, že nevytváří tyto vrstvy, nejeví téměř žádnou závislost na orientaci objektu (Obr. 35). [44]



Obr. 35: Rozdíl mechanických vlastností 3D tisku a technologie CLIP [46]

Software, který pohání celé zařízení umožňuje ovládat množství kyslíku procházející spodní stěnou nádoby, na němž závisí tloušťka mrtvé zóny. Dále je možné volit intenzitu UV záření, volit rychlost pojezdu tiskové podložky na základě viskozity pryskyřice, rozměrech a geometrickém tvaru modelu. Průchod omezeného množství kyslíku stěnou by umožnil touto technologií vytvořit nanostrukturu během několika desítek sekund. Do budoucna tak představuje mobilní zařízení poskytující okamžitou podporu v nouzových situacích v medicíně, armádě či kosmickém průmyslu. Nyní se technologie CLIP nachází na rozmezí mezi prototypovacím zařízením a strojem s uplatněním ve výrobě a tvoří milník mezi hardwarem, softwarem a aplikovanou chemií. [44], [45] Technologie CLIP je komerčně dostupná od dubna 2016 a zařízení je vyobrazeno na obrázcích 36 a 37.



Obr. 36: CLIP Technologie [46]



Obr. 37: CLIP  
technologie Carbon  
M1 [47]

## 1.7 Objekty zhotovené 3D tiskem

3D tisk umožňuje zhotovit výrobky libovolného tvaru, není totiž závislý na formě, nýbrž na softwaru. Podmínky zhotovení závisí pouze na stabilní první vrstvě a podržení převisů. Vzhledem k časové náročnosti, vyjma technologii CLIP, je 3D tisk vhodný zatím pouze na zhotovení prototypů. I přesto lze celkem pohodlně demonstrovat výrobek, ještě před zavedením do výroby. Právě proto se 3D tisk výborně uplatnil v architektuře, kdy bylo možné v relativně krátkém čase (24 h) zhotovit miniaturu výsledné stavby (obr. 38).



Obr. 38: Příklad architektonického modelu [52]

3D tisk se velmi rychle rozšířil do mnoha odvětví průmyslu jako prototypovací zařízení. Modely zhotovené 3D tiskem umožňují například testovat aerodynamické vlastnosti letadel, či aut. Dále lze pohodlně navrhovat jakýkoliv design – bytové, kuchyňské a jiné interierové doplňky. Existují prototypy obuvi. Důležité uplatnění našel 3D tisk v medicíně. Lze vytisknout zubní či kostní implantáty a protézy, objevují se pokusy o vytištění tkáně a žil. Dokonce lze tisknout i z čokolády, např. dorty. Experimentální stroje o velkých rozměrech dokáží tisknout zdi z betonu a stavět tak stavby, dokonce i mosty. Na obrázcích 39 až 45 jsou vyobrazeny příklady dnešních uplatnění 3D tisku. [53]



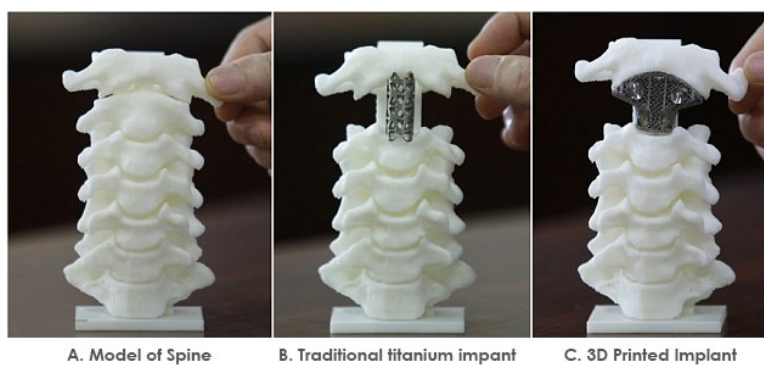
Obr. 39: Interierové doplňky [54]



Obr. 40: Čokoládový dort [55]



Obr. 41: Fixace předloktí zhotovená 3D tiskem [56]



Obr. 42: Implantát do páteře z 3D tiskárny [57]



Obr. 43: Dům postavený za pomoci 3D tiskárny včetně interieru v Dubai [58]



Obr. 44: Most postavený principem 3D tisku v Madridu [59]



Obr. 45: Obuv s podrážkou zhotovenou technologií SLS od New Balance [60]

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 Charakteristika materiálů

Tabulka 1: Charakteristika materiálu PLA Natural Crystal Clear

PLA Natural Crystal Clear, 750 g, 1,75 ± 0,05 mm	
Výrobce	Fillamentum ČR
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,25
Index toku taveniny MFR (190 °C, 5 kg) [g/10min]	8,1
Index toku taveniny MVR (190 °C, 5 kg) [cm <sup>3</sup> /10min]	12,6
Teplota skelného přechodu [°C]	60 – 63
Teplota tečení [°C]	170 – 180
Teplota tisku [°C]	190 – 210
Pevnost v tahu [MPa]	50
Prodloužení při porušení [%]	3
Rázová houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	3 – 5
Surová bezbarvá PLA, základní materiál pro 3D tisk	

Tabulka 2: Charakteristika materiálu PLA Glow In the Dark

PLA Glow In the Dark, 1 kg, 1,75 ± 0,05 mm	
Výrobce	Plasty Mladeč ČR
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,24
Index toku taveniny MFR (190 °C, 5 kg) [g/10min]	24,1
Index toku taveniny MVR (190 °C, 5 kg) [cm <sup>3</sup> /10min]	34,7
Teplota skelného přechodu [°C]	55
Teplota tečení [°C]	170
Teplota tisku [°C]	180 – 210
Pevnost v tahu [MPa]	53
Prodloužení při porušení [%]	6
Rázová houževnatost [J/m]	0,3
PLA s fosforeskujícím aditivem mléčně zelené barvy, po nasvícení, svítí ve tmě zeleně	

Tabulka 3: Charakteristika materiálu PLA/PHA Bio-Flex

PLA/PHA Bio-Flex V 135001, 750 g, 1,75 ± 0,05 mm	
Výrobce	ColorFabb Nizozemsko
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,24
Index toku taveniny MFR (190 °C, 5 kg) [g/10min]	12,6
Index toku taveniny MVR (190 °C, 5 kg) [cm <sup>3</sup> /10min]	15,4
Teplota skelného přechodu [°C]	50 – 60
Teplota tečení [°C]	150 a více
Teplota tisku [°C]	190 – 210
Pevnost v tahu [MPa]	61,5
Prodloužení při porušení [%]	10,5
Rázová houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	2,8
Kopolymer PLA/PHA fluorescentní žlutozelené barvy se zvýšenou houževnatostí	

Tabulka 4: Charakteristika materiálu PLA/PHA BronzeFill

PLA/PHA Bronzefill 750 g, 1,75 ± 0,1 mm	
Výrobce	ColorFabb Nizozemsko
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	3,9
Obsah plniva (bronzový prach) [%]	90
Index toku taveniny MFR (190 °C, 5 kg) [g/10min]	19,6
Index toku taveniny MVR (190 °C, 5 kg) [cm <sup>3</sup> /10min]	15,7
Teplota tečení [°C]	155 a více
Teplota tisku [°C]	190 – 210
Pevnost v tahu [MPa]	30
Prodloužení při porušení [%]	5 – 10
Rázová houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	4,5
Kompozitní materiál pro 3D tisk s obsahem bronzového prachu pro kovový lesk	

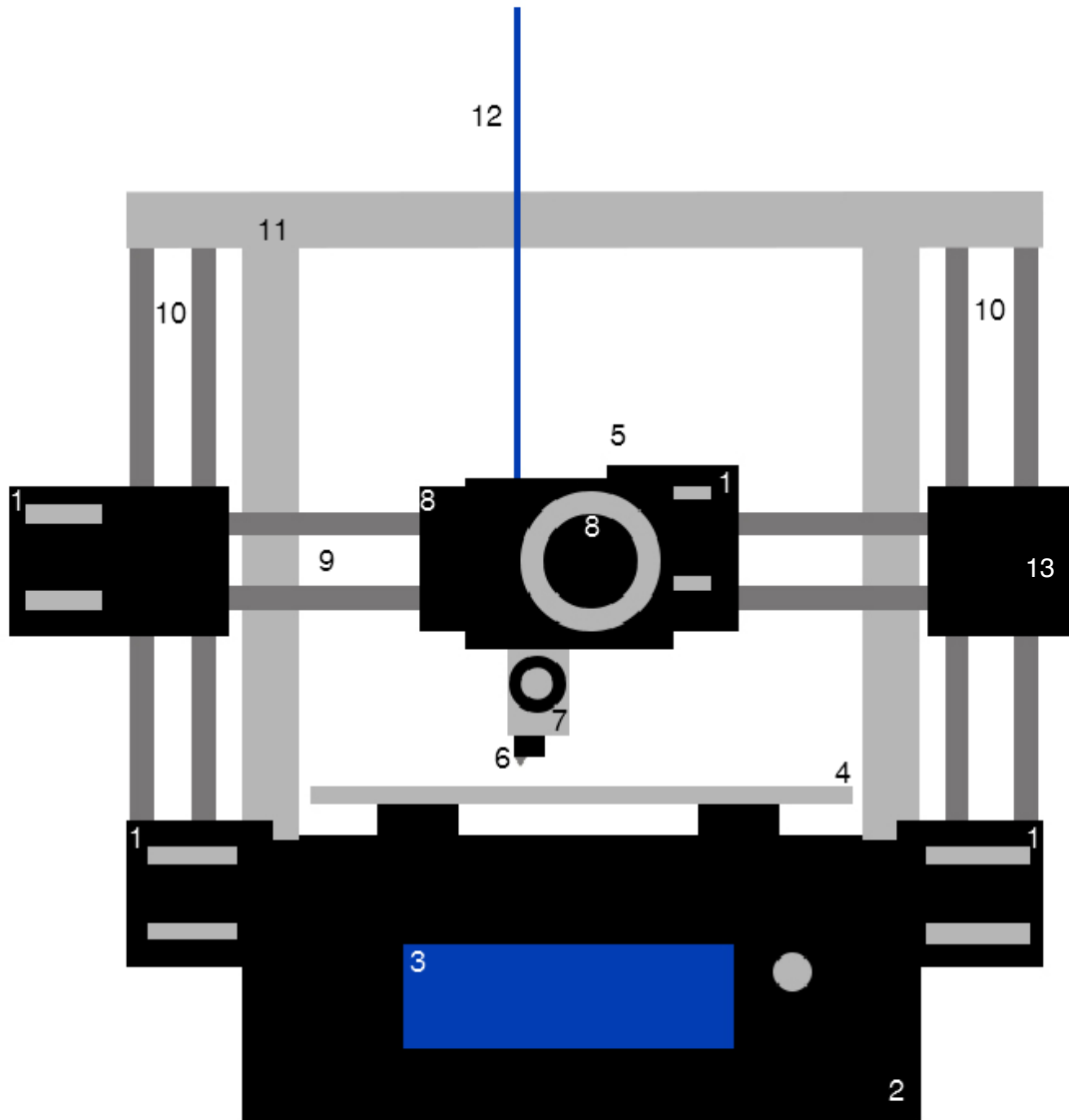
## 2.2 Tiskárna RepRap

3D tiskárna použitá pro tuto práci představuje moderní typ 3D tiskárny s jednoduchou pevnou konstrukcí a specifickou tiskovou hlavou. Řídící jednotka je stejná jako u českého konceptu tiskárny Průša i3 a konstrukce se podobá tiskárně českého konceptu Rebel. Jelikož se jedná o open-source, je tedy možné 3D tiskárnu libovolně upravovat. 3D tiskárna byla modifikována čínskými vývojáři. Úprava spočívá v zasazení spodní části konstrukce, zdroje a Arduina do plastového bloku, který zvyšuje stabilitu celého zařízení. Další úpravy proběhly na tiskové hlavě po zakoupení stroje. Bylo nutné připojit chladič na hrdélko hotendu. Bez tohoto chladiče se filament tavil již u vstupu do hrdélka a docházelo tak k zasekávání.

Celá konstrukce se skládá z hliníkových profilů a ocelových závitových a vodících tyčí. Spodní část konstrukce je upevněna v plastovém bloku skrývajícím Arduino a zdroj. Tato část nese pojezd tiskové podložky a hliníkové šasi nesoucí tiskovou hlavu, které tvoří horní díl konstrukce. Na obou stranách šasi jsou upevněny svisle vodící a závitové tyče, pro pojezd tiskové hlavy po ose Z. Na těchto tyčích je plastový vytištěný pojezd, tvořící uzel mezi osou Z a osou X. Z tohoto uzlu vedou vodorovně další vodící tyče, které nesou opět vytištěný pojezd tiskové hlavy po ose Z.

Plastový blok má výhodu zejména v tlumení vibrací, vznikajících pohybem krokových motorů. Těch je tu celkem 5. Prvním je krokový motor opatřený ozubeným kolečkem, který je součástí tiskové hlavy a má za úkol posouvat filament do hotendu. Další motor je umístěný na levém uzlu os X a Z. Ten díky řemenu posouvá pojezd tiskové hlavy po ose X. Osa Z je řízena dvěma motory. Na obou stranách bloku jsou k těmto motorům upevněny svislé závitové tyče s vodítky po kterých se posouvají oba plastové uzly. Díky tomu je řízen pojezd celé osy X po ose Z. Poslední motor hýbe osou Y opět pomocí řemene. Tu zde představuje odporově vyhřívaná hliníková tisková podložka upevněná na rámu plastového bloku pomocí vytištěných kotevních dílců. Zjednodušené schéma celého zřízení znázorňuje obrázek 46.





Obr. 46: Schéma 3D tiskárny použité pro tisk zkušebních tělísek

1. krokové motory, 2. plastový blok skrývající zdroj, Arduino a pojezd osy Y, 3. display, 4. tisková podložka, 5. tisková hlava, 6. hotend, 7. chladič filamentu s ventilátorem, 8. ventilátory, 9. vodící tyče osy X, 10. vodící tyče osy Z, 11. nosná konstrukce, 12. filament, 13. uzel mezi osou Z a X

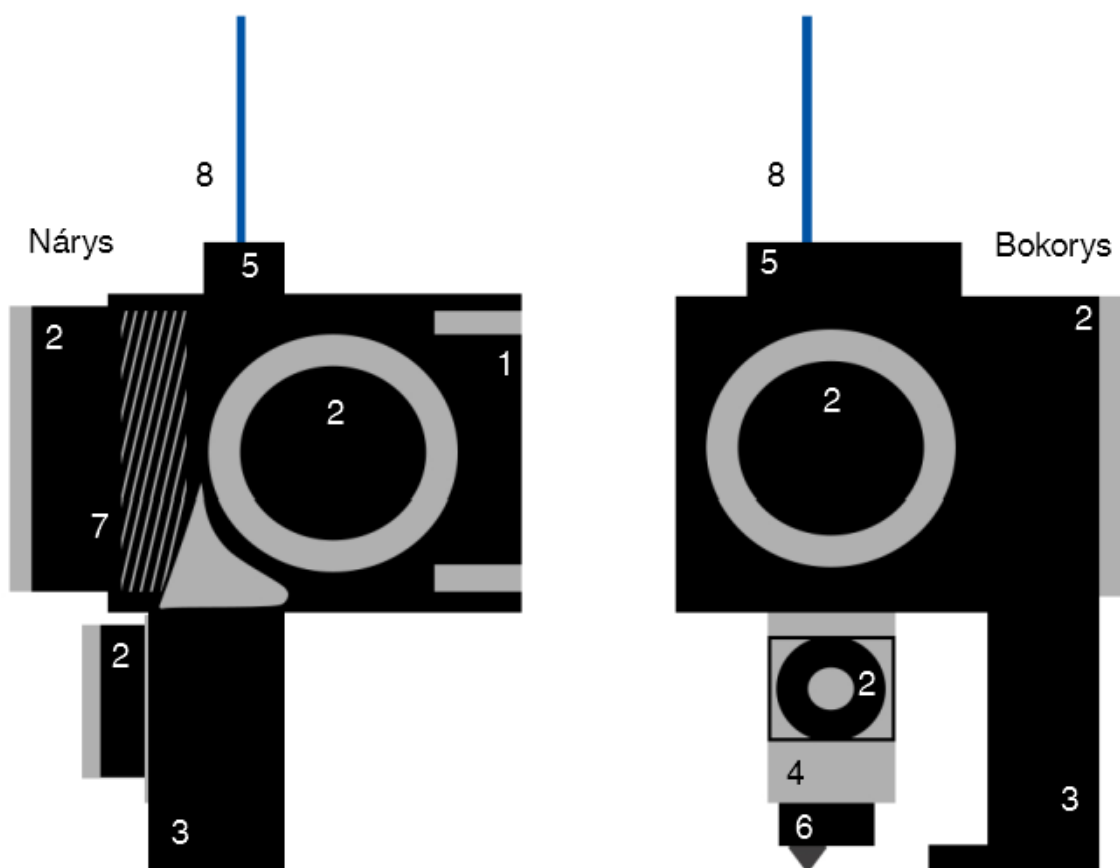
Tisková hlava je upevněna pomocí vytištěného dílu vsazeného na vodící tyče osy X. Pohyb je řízen krokovým motorem na levé straně přes řemen. Na tento vytištěný díl je připevněn kovový držák osazený krokovým motorem s pastorkem pro posun filamentu do hotendu. Na něj navazuje vytisknutá součástka zaručující dobrý přitlak struny materiálu na pastorek. Na tuto součástku je připevněn chladič s ventilátorem.

Ze předu tiskové hlavy je upnutý ventilátor s vytištěným hrdlem ústícím na konci hotendu. Tím je zaručeno chlazení materiálu vystupujícího z trysky. Toto chlazení zaručuje přesnější tvar objektu, díky rychlejšímu ztuhnutí nataveného filamentu. Rychlejší chlazení však zapříčiňuje vnitřní pnutí materiálů, které jsou náchylné na tepelnou roztažnost, např. ABS. Pnutí se může projevit zkroucením výsledného objektu. Je tak třeba najít kompromis mezi teplotou tiskové podložky a výkonem ventilátoru, který lze přizpůsobit ve sliceru. Bez tohoto chlazení může docházet k přetokům při tisku tenkých stěn či k prověsům při tisku menších převisů.

Zespodu vystupuje hotend s dodatečně připevněným chladičem hrdélka (Obr. 47). Tento chladič odvádí teplo z hrdélka, aby docházelo k tavení filamentu pouze uvnitř heatboxu a trysky. Bez tohoto chladiče se materiál taval již při vstupu do hotendu a motor, který má posouvat filament, jej deformoval a docházelo tak k zasekávání filamentu. Na tomto chladiči je pro jistotu upnutý ventilátor. Schéma tiskové hlavy přibližuje obrázek 48. Na snímcích 49 a 50 je poté vyobrazena 3D tiskárna použitá pro tuto práci spolu s detailem tiskové hlavy.

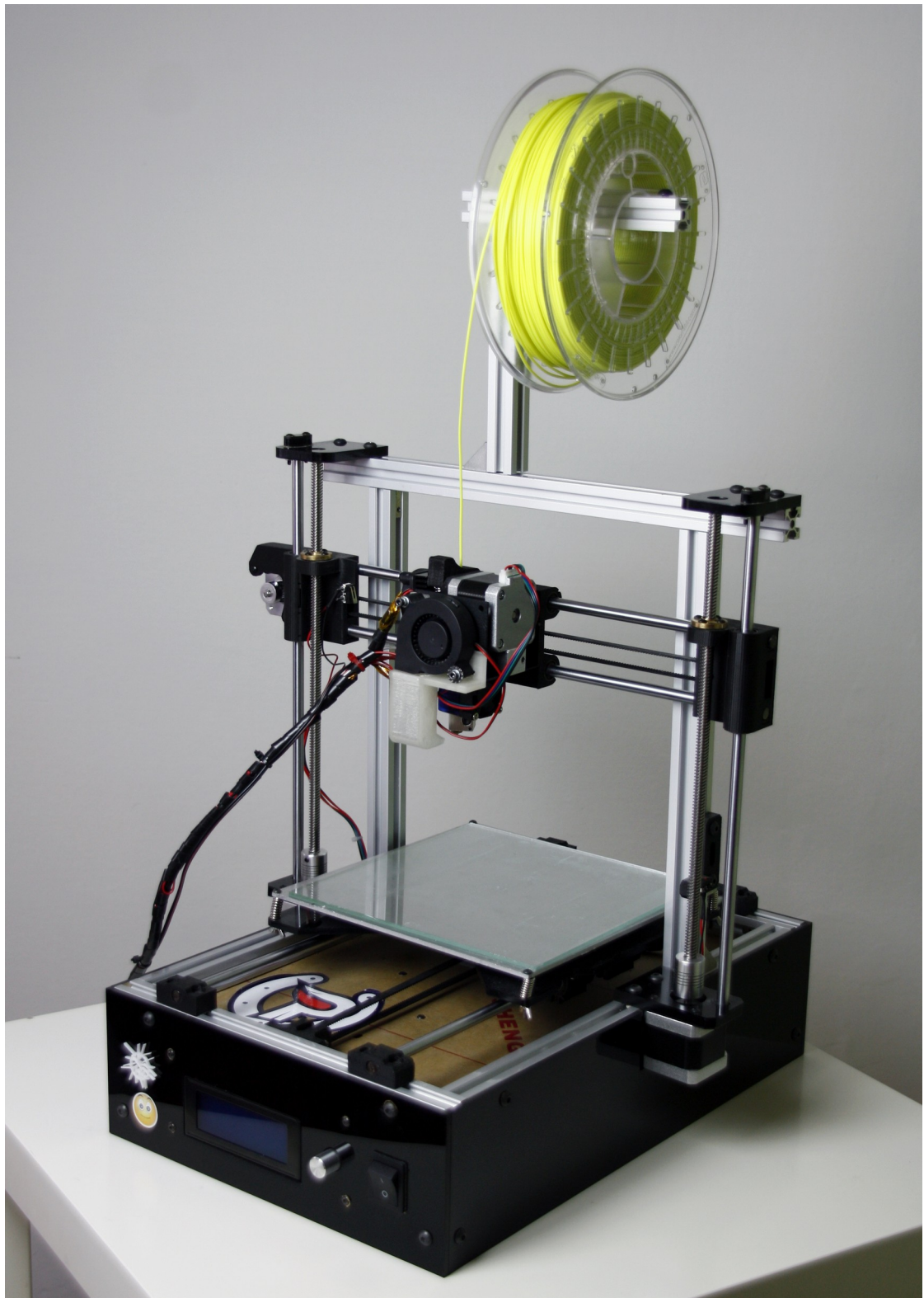


Obr. 47: Chladič hrdélka

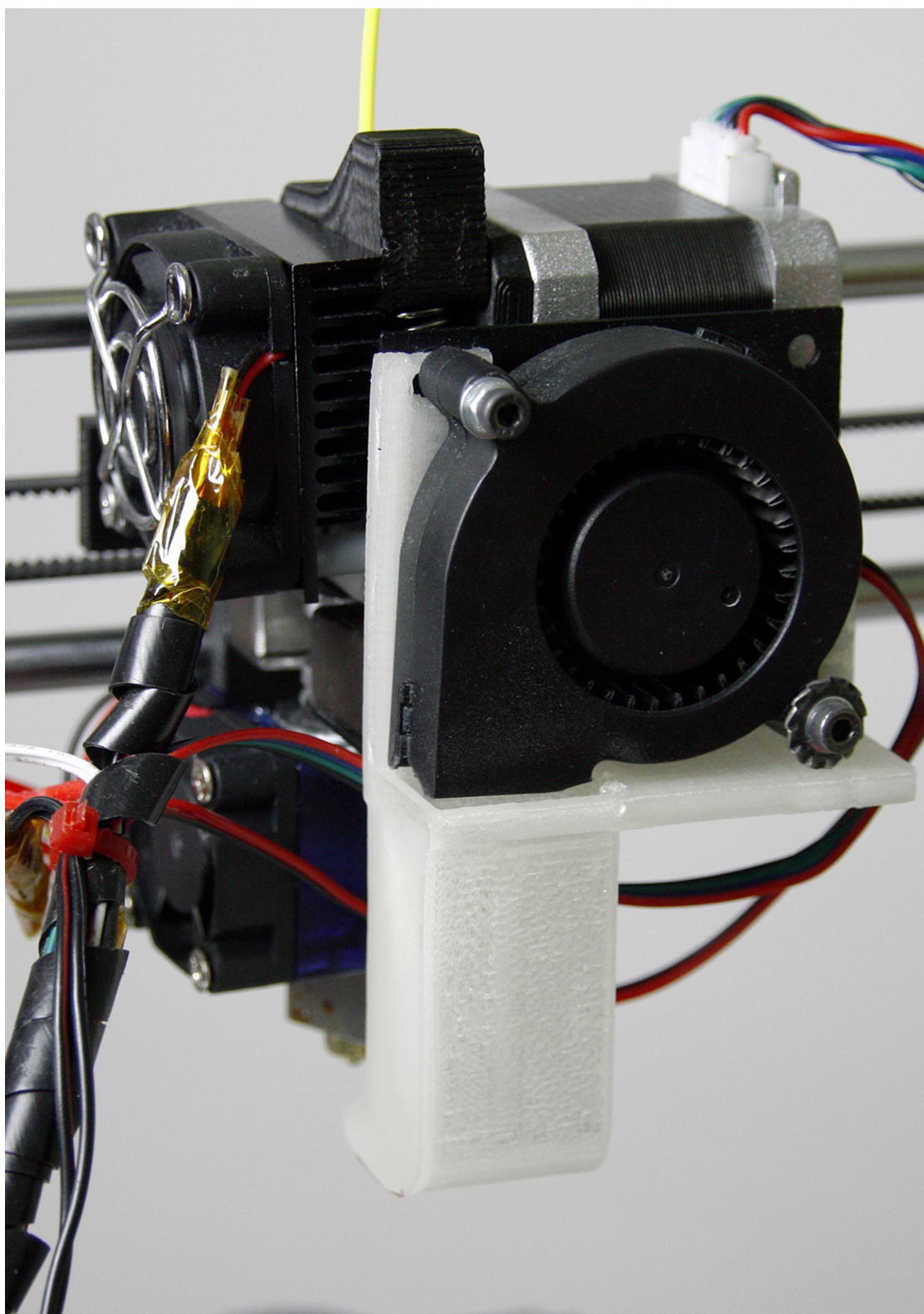


Obr. 48: Schéma tiskové hlavy 3D tiskárny použité pro tisk zkušebních tělísek

1. krokový motor, 2. ventilátory, 3. hrdlo ventilátoru, 4. chladič hrdélka, 5. podavač filamentu, 6. hotend, 7. pasivní chladič motoru, 8. filament



Obr. 49: RepRap 3D tiskárna



Obr. 50: Detail tiskové hlavy

## 2.3 Parametry 3D tiskárny

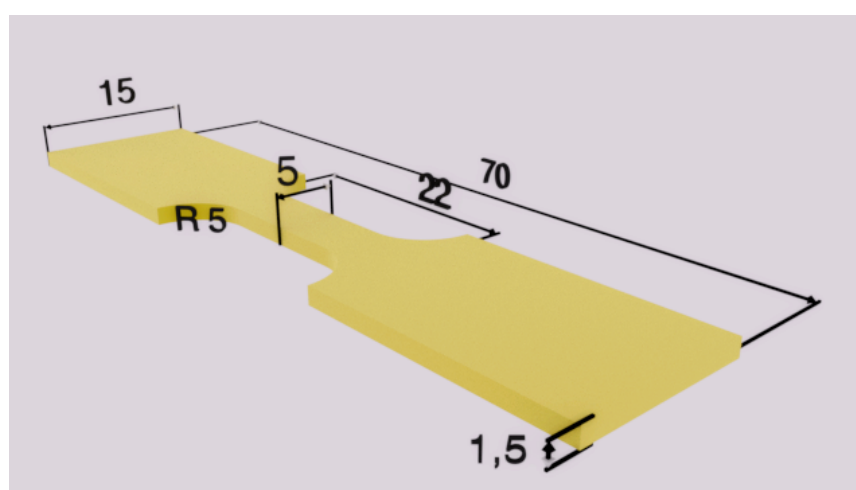
Důležité parametry 3D tiskárny jsou seřazeny v následující tabulce 5.

Tabulka 5: Vybrané parametry 3D tiskárny

Rozměry 3D tiskárny [mm]	278 × 408 × 424
Rozměr tiskového prostoru [mm]	200 × 200 × 170
Průměr trysky [mm]	0,4
Maximální rychlost pojezdů os X, Y, Z [mm/s]	150
Minimální krok motorů os X a Y [mm]	0,1
Minimální krok motorů osy Z [mm]	0,05

## 2.4 Zkušební tělíska a parametry 3D tisku

Zkušební tělíska byla vymodelována v open-surce 3D editoru Blender dle příslušných norem. Pro zkoušku v tahu byla zvolena, především kvůli úspoře materiálu a času, americká norma ASTM D 1708 – 02a. Tato norma předkládá tvar zkušebního tělíska, tzv psí kosti, o rozměrech, které zobrazuje obrázek 51.



Obr. 51: Rozměry zkušebního tělíska pro zkoušku v tahu dle normy ASTM D 1708 – 02a

Zkouška tvrdosti dle Brinella je dána normou ČSN EN ISO 6506. Tato norma pevné rozměry neukládá, bylo zvoleno zkušební tělísko ve tvaru čtverce o rozměrech 40 × 40 × 2 mm.

Zkušební tělíska byla zhotovena s měnicími se parametry 3D tisku a to s různou rychlostí při různé tloušťce nanášené vrstvy s konstantní hodnotou parametru Flow = 100 %. Důležité parametry 3D tisku jsou popsány v následující tabulce 6.

Tabulka 6: Vybrané parametry 3D tisku

Výšky vrstev [mm]	0,05   0,1   0,15
– Výška počáteční vrstvy [mm]	0,15
– Tloušťka stěny (zvoleny dvě linky 0,4 mm – dáno rozměrem trysky) [mm]	0,8
– Tloušťka spodku tělíska (zvoleny dvě počáteční vrstvy) [mm]	0,3
Rychlosti tisku [mm/s]	50   100   150
– Rychlosti tisku stěny – vnitřní linka	50   100   150
– Rychlosti tisku stěny – vnější linka	25   50   75
– Rychlosti počáteční vrstvy / spodku	25   50   75
Hustota výplně [%]	100
Teplota trysky   tiskové podložky [°C]	195   55
Parametr Flow [%]	100
Retrakce [mm]	2
Vzor tisku	linky

Parametry 3D tisku byly zvoleny na základě parametrů 3D tiskárny, přičemž maximální rychlost tisku činí 150 mm/s a minimální výška nanášené vrstvy je 0,05 mm. Byly tedy zvoleny tyto výchozí hodnoty rychlosti a tloušťky vrstvy. Další hodnoty rychlosti byly zvoleny 100 mm/s a 50 mm/s a další hodnoty tloušťky nanášené vrstvy 0,1 mm a 0,15 mm u všech čtyřech vybraných materiálů. Maximální hodnota rychlosti tisku byla zvolena z důvodu ověření funkčnosti parametru Flow i při extrémní hodnotě rychlosti.

Vzhledem k problematice 3D tisku, přilnavosti materiálu k tiskové podložce a umožnění tak dobrého výtisku je nutné vzít ohled na některé parametry, jako jsou pokročilá nastavení rychlostí jednotlivých částí modelu, či jejich výška. S ohledem na

přilnavost je nutné tisknout spodní vrstvy modelu menší rychlostí. Materiál má tak čas zavadnout a vytvořit dobrý podklad pro další vrstvy. Menší rychlost tisku vnější linky stěny zaručuje přesnější tvar objektu.

Konstantní tloušťka počáteční vrstvy je zapříčiněna skutečností, že před výtiskem je nutné zkalibrovat podložku. Jedná se o vyrovnaní podložky, tak aby byla ve všech místech stelně daleko od trysky. Tato kalibrace se provádí manuálně pomocí utahování šroubů, které drží tiskovou podložku na pojezdu. Kvůli tomu je velmi obtížné pokaždé měnit vzdálenost mezi podložkou a tryskou, navíc při tloušťce 0,05 mm je takřka nemožné srovnat podložku do roviny. Při tak malé výšce první vrstvy hraje roli i teplotní roztažnost hliníku, ze kterého je podložka vyrobena. Podložku se podařilo srovnat na konstantní vzdálenost cca 0,2 mm pod tryskou, což je ideální pro tisk počáteční vrstvou o výšce 0,15 mm.

Tento rozměr počáteční vrstvy však ovlivňuje výslednou výšku modelu. Při tisku tělíska vysokého 1,5 mm výškou vrstvy 0,05 mm by měl být počet vrstev 30. Vzhledem k počáteční vrstvě 0,15 mm, ze které je zhotoven spodek tělíska (což jsou 2 počáteční vrstvy), je počet vrstev 28. Tím je výška tělíska 1,6 mm.

Stejně tak u tisku výškou vrstvy 0,1 mm je počet vrstev 15 a výsledná výška tělíska 1,6 mm. U tisku výškou vrstvy 0,15 mm tvoří výslednou výšku tělíska 10 vrstev, tedy přesných 1,5 mm.

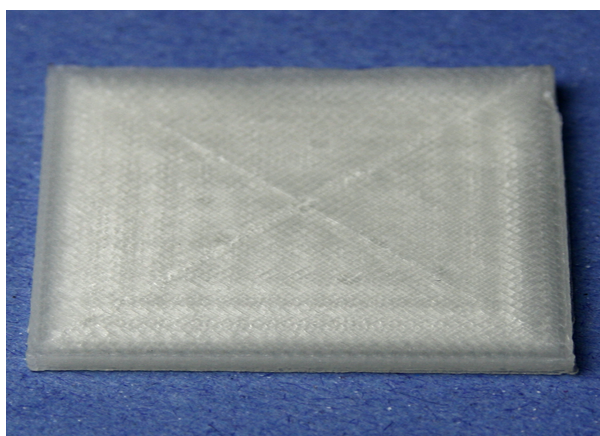
Podobně tomu je i u čtvercových vzorků pro měření tvrdosti dle Brinella. Tělíska mají být 2 mm vysoká, počet vrstev při tisku vrstvou 0,05 mm je 38 a výsledná výška tělíska je 2,1 mm. Při vrstvě 0,1 mm je tělísko tvořeno 20 vrstvami a výsledná výška rovněž 2,1 mm a při tloušťce vrstvy 0,15 mm činí počet vrstev 13 a výsledná výška je 1,95 mm.

Nepřesnosti vzniklé tímto přepočtem jsou však nezbytné pro samotné zhotovení tělísek. Výsledné mechanické vlastnosti se počítají ze skutečných rozměrů tělíska, a proto měření není zatíženo touto chybou. Pro odstranění tohoto nedostatku by bylo nutné překalibrovat 3D tiskárnu nebo přepsat výsledný gcode tak, aby např. poslední vrstvy byly rovněž 0,15 mm. Zde jde však o porovnání pevností tělísek v závislosti na nanášených vrstvách, tudíž je nutno jich v tělísku mít pokud možno nejvíce stejných.



Na následujících obrázcích 52 až 56 jsou vyfotografované zkušební vzorky pro měření tvrdosti dle Brinella. Na obrázku 55 je tělíčko z materiálu Bronzefill po následné úpravě vyleštěním. Tím značně vynikne kovový lesk bronzových částic v materiálu.

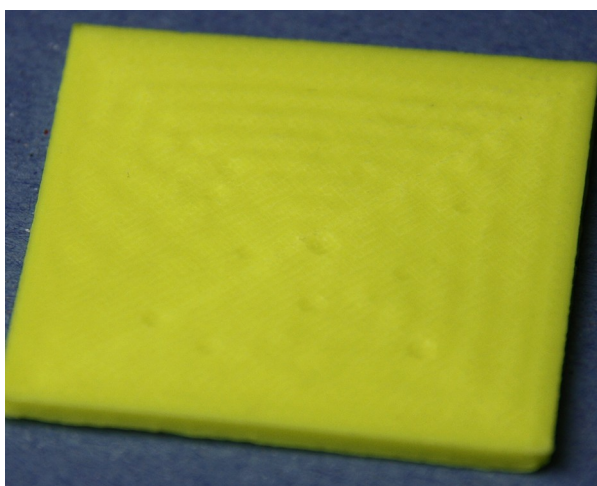
Obrázek 56 ukazuje zkušební tělíčko z materiálu Glow po nasvícení a vložení do tmy. Fosforescenční příměs má za následek zelenou zář.



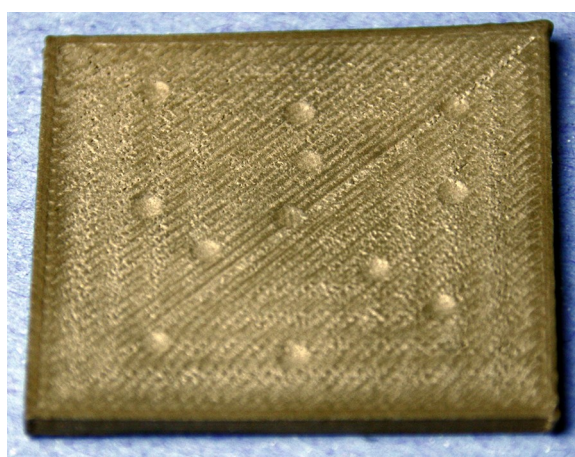
Obr. 52: Zkušební tělíčko pro tvrdost dle Brinella z materiálu Natural



Obr. 53: Zkušební tělíčko pro tvrdost dle Brinella z materiálu Glow



Obr. 54: Zkušební tělíčko pro tvrdost dle Brinella z materiálu PLA/PHA



Obr. 55: Zkušební tělíčko pro tvrdost dle Brinella z materiálu Bronzefill

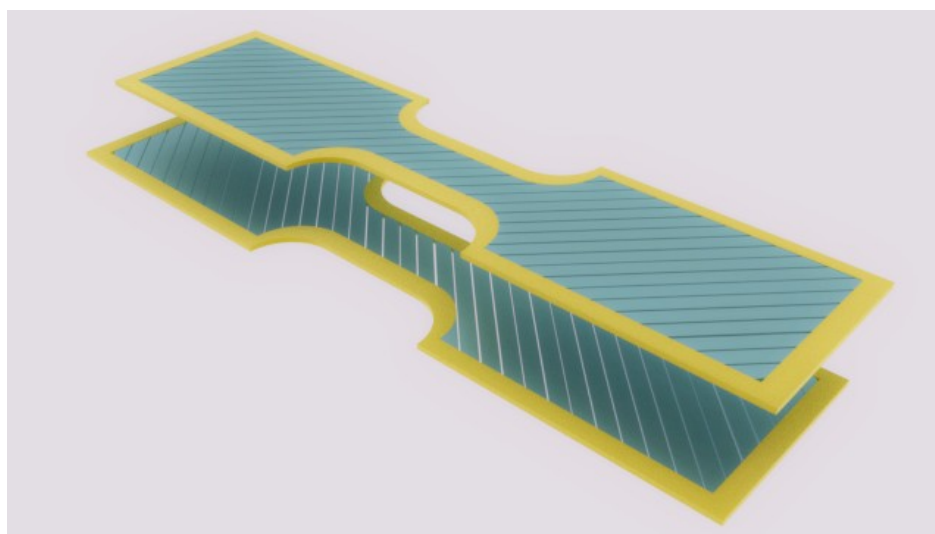


Obr. 56: Zkušební tělísko pro  
tvrdost dle Brinella z materiálu  
Glow fosforeskující ve tmě

## 2.5 3D tisk tělísek

Tělíska byla zhotovena 3D tiskem dle výše zmíněných parametrů při teplotě trysky 195 °C, což je výš než teplota tečení PLA, z důvodů snížení viskozity taveniny. Tisková podložka byla vyhřáta na teplotu 55 °C, tedy na teplotu blízké teplotě skelného přechodu, z důvodu zabránění kroucení výsledného objektu a zlepšení přilnavosti jednotlivých vrstev. Přilnavost povrchu tiskové podložky byla zlepšena papírovou lepicí páskou, při vyšších rychlostech tisku, doplněna o vrstvu lepidla na papír. Problém nastal u materiálu Bronzefill, který kvůli velkému obsahu bronzového prachu nemá přilnavost téměř k žádnému povrchu. Nakonec problém vyřešila textilní lepicí páska.

Samotný 3D tisk je řízen dle automatického propočtu po nejkratší možné trase dle zvoleného vzoru tisku a výplně. Výplň je zde navolena na 100 %, tedy vzor tisku a vzor výplně je stejný. Vzor výplně lze volit z několika možností, např. mřížka, kubický vzor, teraedrický vzor, atd. Vzorů tisku lze rovněž volit více, např. trojúhelníkový, kružnicový, nebo jako v našem případě linky. Vrstvy tvořící stěnu jsou kladeny po kontuře objektu, jedna na druhou po celé výšce objektu. Vrstvy tvořící výplň, zde nastavenou jako linky, jsou kladeny pod úhlem 45° vůči kontuře a skládány jsou kolmo na sebe. Tedy každá druhá je nanášena přes první. Proces 3D tisku je přiblížen na obrázku 57. Trhací stroj tedy bude namáhat jak vrstvy tělíska nanášené na sebe v kluzu, tak i jednotlivé linky tvořící výplň, které bude oddalovat od sebe.



Obr. 57: Proces 3D tisku

Co se časové náročnosti týče, psí kosti tištěné pro zkoušku tahu po šesti až sedmi kusech v sadě a čtvercová tělíska pro tvrdost dle Brinella, byly zhotoveny ve velmi proměnných časech v závislosti na dané tloušťce vrstvy a rychlosti pohybů os, viz tabulka 7.

Tabulka 7: Časová náročnost 3D tisku zkušebních tělísek v závislosti na parametrech 3D tisku

ASTM	
Parametry tloušťka vrstvy[mm]/rychlost [mm/s]	Přibližný čas tisku
0,05/50	4 h
0,1/50	2 h
0,15/50	90 min
0,05/100	2 h
0,1/100	1 h
0,15/100	45 min
0,05/150	90 min
0,1/150	50 min
0,15/150	30 min

Brinell	
Parametry tloušťka vrstvy[mm]/rychlost [mm/s]	Přibližný čas tisku
0,05/50	1 h
0,1/50	30 min
0,15/50	20 min
0,05/100	30 min
0,1/100	20 min
0,15/100	15 min
0,05/150	20 min
0,1/150	12 min
0,15/150	8 min

## 2.6 Stanovení a metody testování

Na počátku experimentální části byl stanoven index toku taveniny u všech materiálů a zároveň byl stanoven obsah nespalitelných částic u materiálu Bronzefill. Pro měření mechanických vlastností materiálů byla zvolena zkouška v tahu dle normy ASTM D 1708 – 02a a zkouška tvrdosti dle Brinella dle normy ČSN EN ISO 6506.

### 2.6.1 Stanovení indexu toku taveniny

Index toku taveniny udává množství taveniny, které proteče tryskou za 10 minut při předepsaných podmínkách a to buď v g (MFR – hmotnostní index toku [g/10 min]) nebo v cm<sup>3</sup> (MVR – objemový index toku [cm<sup>3</sup>/10 min]). Stanovení spočívá v měření času, za který se vytlačí dané množství roztaveného termoplastu komory. Vytlačený materiál se zváží. Stanovení podléhá normě ČSN EN ISO 1133.

Výsledný index toku se vypočítá podle vzorců:

$$MFR = \frac{2,54 \cdot 427 \cdot d}{t} \quad d = \frac{m}{1,804}$$

$$MVR = \frac{2,54 \cdot 427}{t}$$

kde  $t$  je čas,  $d$  je hustota a  $m$  je hmotnost. Podmínky stanovení: závaží 5 kg, 190 °C, čtecí kruh 2,54 cm, konstanta komory 427.

### 2.6.2 Stanovení obsahu nespalitelných částic

Stanovení obsahu nespalitelných částic se provádí v peci při 600 °C, kdy se do dvou vyžíhaných porcelánových kelímků předloží vzorek materiálu, předem zvážený na analytických vahách a vloží se do pece na 1 hodinu. Poté se kelímky vyjmou z pece a po zchlazení zvaží. Obsah nespalitelných částic se vypočítá dle následujícího vzorce a výsledek se zprůměruje.

$$\% = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100$$

$m_2$  = navážka po spálení,  $m_1$  = navážka před spálením

### 2.6.3 Zkouška v tahu – trhačka INSTRON 5500R

Trhací stroj INSTRON 5500R je jednoduchý, kompaktní a praktický přístroj pro testování všech materiálů, jejichž pevnost v tahu nepřekračuje 5kN. Vyznačuje se četnými možnostmi připojení k periferním zařízením (zapisovač, tiskárna). Ovládat přístroj je možno, jednak manuálně na digitálním displeji, tak také pomocí počítače se speciálním softwarem a s možností vytvoření různých programů pro jednotlivá měření a různé typy vzorků. Přístroj je jednofázový 220V, 50Hz, 5A. Přístroj má pracovní prostor o maximální síle 5 kN v tahu i tlaku.

Měření zátěže se provádí pomocí 5 vzájemně zaměnitelných čidel, přesnost měření zátěže je  $\pm 0,5\%$  z dané hodnoty nebo 0,1% z plné výchylky čidla. Trhačka splňuje požadavky norem NF. A. 03-501, třída O, DIN 51220 třída 0,5, BS 1610 A1 a ASTM E4. Rozsah rychlosti je 0,001 až 500 mm/min programovatelná klávesnicí v krocích 0,1 mm/min, s přesností 0,1%. Automatická rychlost zpět je 500 mm/min, s pomalým dojezdem do výchozí polohy. Čelisti jsou pneumatické na stlačený vzduch s tlakem 0,6 MPa.

Stanovené tahové vlastnosti – zvolené podmínky odpovídající dané normě:

upínací hlava: 1 kN (pneumatické upínání – 0,6 MPa); upínací délka: 22 mm;  
měřicí rychlost: 1 mm/min

Celkem bylo provedeno 6 až 7 měření a z průměrů byla zjištěna mez pevnosti v tahu (N, MPa), modul pružnosti (MPa) a tažnost (% , mm).

#### 2.6.4 Tvrdost dle Brinella

Metoda měření tvrdosti dle Brinella je založena na principu vtlačování ocelové kuličky do zkušebního materiálu. Tvrdost je dána přepočtem mezi silou vtlačování kuličky a hloubkou důlku, který kuličky vytlačí. Vztah pro výpočet tvrdosti má tvar:

$$HK = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h}$$

kde F je síla [N], S plocha důlku (kulového vrchlíku) [mm<sup>2</sup>] D průměr kuličky [mm], v našem případě 5 mm a h je hloubka důlku [mm].

Měření se provádí 10x po 10 a 60 sekundách při zátěži 31,25 kg (306,56 N).

### 3 VÝSLEDKY A DISKUZE

#### 3.1 Stanovení Indexu toku taveniny a obsahu nespalitelných částic

Stanovení probíhalo dle normy a to při 190 °C a 5 kg zatížení. Naměřené hodnoty jsou seřazeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Hmotnostní a objemový index toku taveniny materiálů pro 3D tisk

Materiál	MFR [g/10 min]	MVR [cm <sup>3</sup> /10 min]
Natural	8,1	12,6
Glow	24,1	34,7
PLA/PHA	12,6	15,4
Bronzefill	19,6	15,7

Z výše uvedené tabulky vyplývají rozdílné tokové vlastnosti napříč všemi vybranými materiály. Vezmou-li se v potaz hodnoty obou toků taveniny, jasně převyšuje materiál Glow. U objemového toku taveniny si lze povšimnout téměř shodných hodnot materiálu Bronzefill a kopolymeru PLA/PHA.

Pro 3D tisk jsou výhodnější nižší hodnoty indexu toku taveniny, neboť roztavený materiál nevytéká z trysky sám, což nezpůsobuje problém při najetí tisku. Je-li index toku velký, tavenina v trysce má tendenci samovolně vytékat a krokový motor chvíli posouvá filament bez extrudování. Tato prodleva představuje závažnější problém při tisku malých modelů, neboť režim skirt nemusí stačit k rozjetí tisku.

Například materiál Natural s malými hodnotami indexu toku taveniny nezpůsobil při 3D tisku žádný problém, extruze materiálu byla plynulá, zatímco materiál Bronzefill vytékal téměř samovolně a při samotném tisku byly pozorovány diskontinuity. To však z velké části proto, že je to materiál s vysokým podílem pevných částic bronzu.

Tabulka 9: Obsah nespalitelných částic materiálu Bronzefill

Bronzefill	
Vzorek 1	89,5 %
Vzorek 2	90,5 %
Průměr	90 %

Obsah pevných částic (tabulka 9) u materiálu Bronzefill byl stanoven metodou nespalitelných částic, kdy tento podíl vyšel v průměru 90 %. Takovéto množství způsobuje značné potíže při 3D tisku. Kohezní a adhezní vlastnosti jsou velmi malé, proto bylo nutné použít textilní pásku s větším měrným povrchem vůči papírové ke zlepšení přilnavosti. Dále musel být zvětšen přítlak podložky k trysce, kvůli nesoudržnosti jednotlivých vrstev. Respektive adheze vrstev k sobě je dobrá, nicméně koheze extrudovaného vlákna nevyhovuje. To je však daň za to, že po úspěšném zhotovení výrobku, lze jeho povrch vhodnou metodou upravit pro bronzový lesk.

### 3.2 Tvrdost dle Brinella

V následujících tabulkách 10 až 13 jsou seřazeny výsledky měření tvrdosti dle Brinella pro jednotlivé materiály. Bylo zhotoveno devět zkušebních tělísek o tloušťkách vrstvy 0,05; 0,1 a 0,15 mm při rychlostech 50, 100 a 150 mm/s. Stanovení probíhalo dle normy vtlačováním kuličky o průměru 5 mm při zátěži 31,25 kg po dobu 10 a 60 s.

Tabulka 10: Tvrdost dle Brinella materiálu Natural

Natural	Výška nanášené vrstvy [mm]	
	0,05	
Rychlosti tisku [mm/s]	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
50	166,57 ± 10,9	148,89 ± 10,0
100	139,03 ± 3,3	124,66 ± 3,6
150	123,02 ± 6,2	109,74 ± 5,1



0,1		
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
50	164,42 ± 11,8	144,35 ± 11,9
100	133,58 ± 7,0	120,16 ± 5,2
150	137,22 ± 9,2	121,82 ± 7,9
0,15		
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56 /60
50	148,70 ± 9,9	133,51 ± 9,9
100	125,82 ± 5,7	112,28 ± 6,2
150	119,09 ± 5,7	105,16 ± 5,3

Tabulka 10 zobrazuje jistou nerovnoměrnou klesající závislost tvrdosti na zvyšující se rychlosti tisku. Tento trend však neplatí u tělísek zhotovených tloušťkou 0,1 mm. Tam prostřední hodnota rychlosti jeví nejnižší tvrdost. S rostoucí rychlostí tisku lze předpokládat nižší tvrdost, vzhledem k rychlému kladení vrstev k sobě a na sebe. Materiál tak nemá dosti času na ustálení.

Dále je vidět téměř shodná hodnota tvrdosti u vzorků 0,05/100 a 0,1/100. Lze tedy teoreticky říci, že při tisku materiálem Natural do rychlosti 100 mm/s, by tloušťka nanášené vrstvy do 0,1 mm neměla mít na tvrdost vliv. Jinými slovy parametr Flow zde kompenzuje rychlost vůči tloušťce dle předpokladů. Tím by se především z časového hlediska vyplatilo tisknout větší tloušťkou. Větší tloušťka však znamená větší reliéf povrchu, což se nemusí jevit pozitivně z hlediska estetiky.

Nutno dodat že tato metoda je zatížena chybou měření, kdy se kulička může vtlačit mezi jednotlivé vrstvy a ne do nich. Jestliže se kulička vtlačí mezi kladené vrstvy, může se tělísko zdát měkčí, než tomu ve skutečnosti je. Tento jev byl pozorován při stanovování, hodnoty hloubky vytlačovaného důlku se mnohdy lišili až o čtvrtinu. Tímto lze vysvětlit propad tvrdosti tělíska zhotoveného při 100 mm/s tloušťkou vrstvy 0,1 mm.

Tabulka 11: Tvrdost dle Brinella materiálu Glow

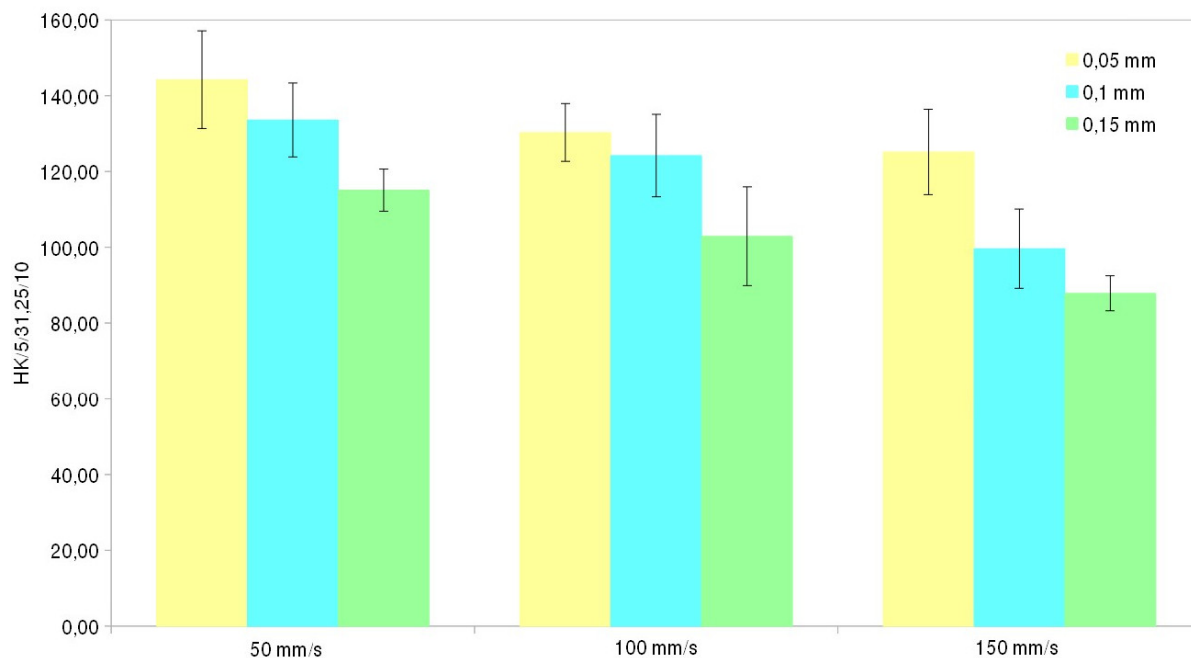
Glow	Výška nanášené vrstvy [mm]	
	0,05	
Rychlosti tisku [mm/s]	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
50	183,94 ± 11,4	166,78 ± 10,7
100	158,64 ± 11,7	139,41 ± 8,3
150	110,93 ± 10,3	101,21 ± 8,7
	0,1	
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
50	190,13 ± 7,7	170,28 ± 7,3
100	185,74 ± 3,6	169,92 ± 3,0
150	130,65 ± 10,3	117,49 ± 10,2
	0,15	
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
50	176,62 ± 5,6	159,31 ± 4,7
100	147,48 ± 13,0	132,45 ± 11,0
150	115,30 ± 4,6	103,39 ± 4,0

Data tvrdosti materiálu Glow v tabulce 11 vykazují klesající závislost na rychlosti v případě srovnání hodnot tvrdosti při jednotlivých tloušťkách. Při srovnání všech tlouštěk, vykazuje nejvyšší tvrdost vzorek 0,1/50. Avšak nelze konstatovat, že by materiál Glow jevil nějaké shodné tvrdosti při jedné rychlosti. Platí však maximální hodnota tvrdosti při nejnižší rychlosti u všech tlouštěk.

Tabulka 12: Tvrdost dle Brinella materiálu PLA/PHA

PLA/PHA	Výška nanášené vrstvy [mm]	
		0,05
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
Rychlosti tisku [mm/s]	144,23 ± 12,9	125,28 ± 11,3
	130,30 ± 7,6	114,38 ± 7,3
	125,15 ± 11,3	110,13 ± 9,0
	0,1	
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
	133,59 ± 9,8	117,73 ± 8,7
	124,21 ± 10,9	108,01 ± 9,7
	108,01 ± 10,5	86,17 ± 9,8
	0,15	
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
	115,08 ± 7,7	100,23 ± 4,8
	102,90 ± 10,0	91,25 ± 6,4
	87,85 ± 6,6	78,24 ± 5,4

Hodnoty v tabulce 12 jeví opět klesající trend závislosti tvrdosti na rychlosti ve všech případech, jak je patrné i z grafu na obrázku 58. A to jak při srovnání údajů tvrdosti při jedné tloušťce, tak i mezi všemi tloušťkami. Opět nelze srovnat tvrdosti při jedné rychlosti. Výsledky jsou velmi různorodé. Při srovnání tohoto kopolymeru PLA/PHA s nemodifikovaným materiálem Natural, si lze povšimnout nižších hodnot tvrdosti. Což splňuje tvrzení výrobce, že se jedná o materiál se zvýšenou houževnatostí.

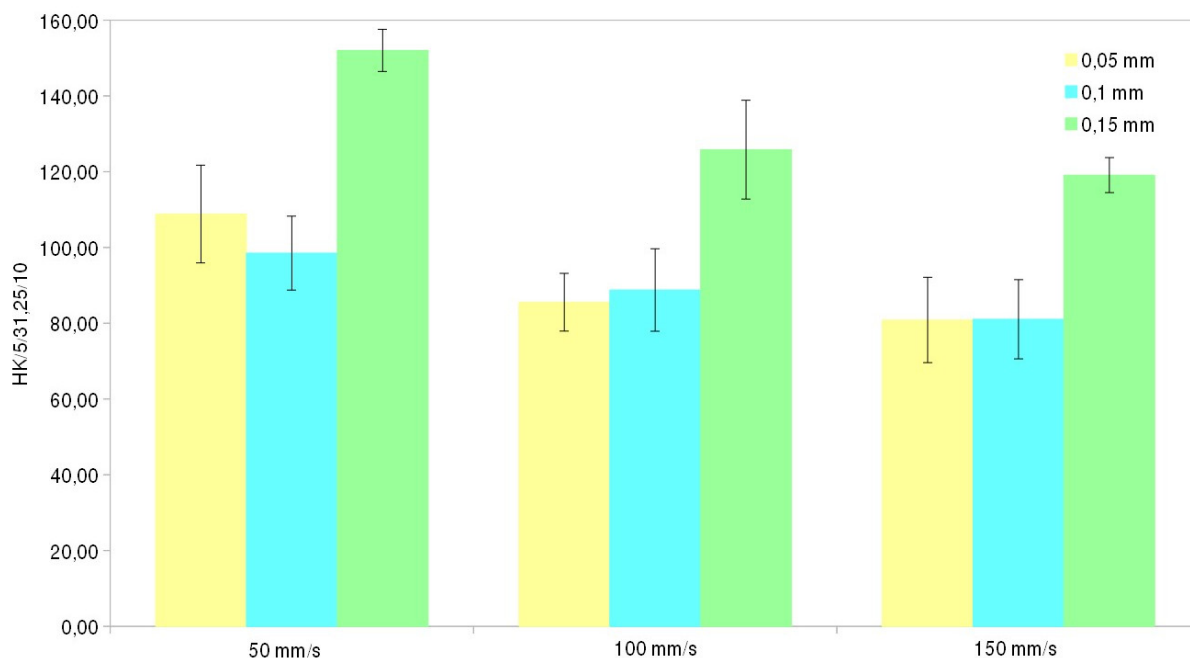


Obr. 58: Graf závislosti tvrdosti dle Brinella při 10 s na parametrech 3D tisku materiálu PLA/PHA

Tabulka 13: Tvrdost dle Brinella materiálu Bronzefill

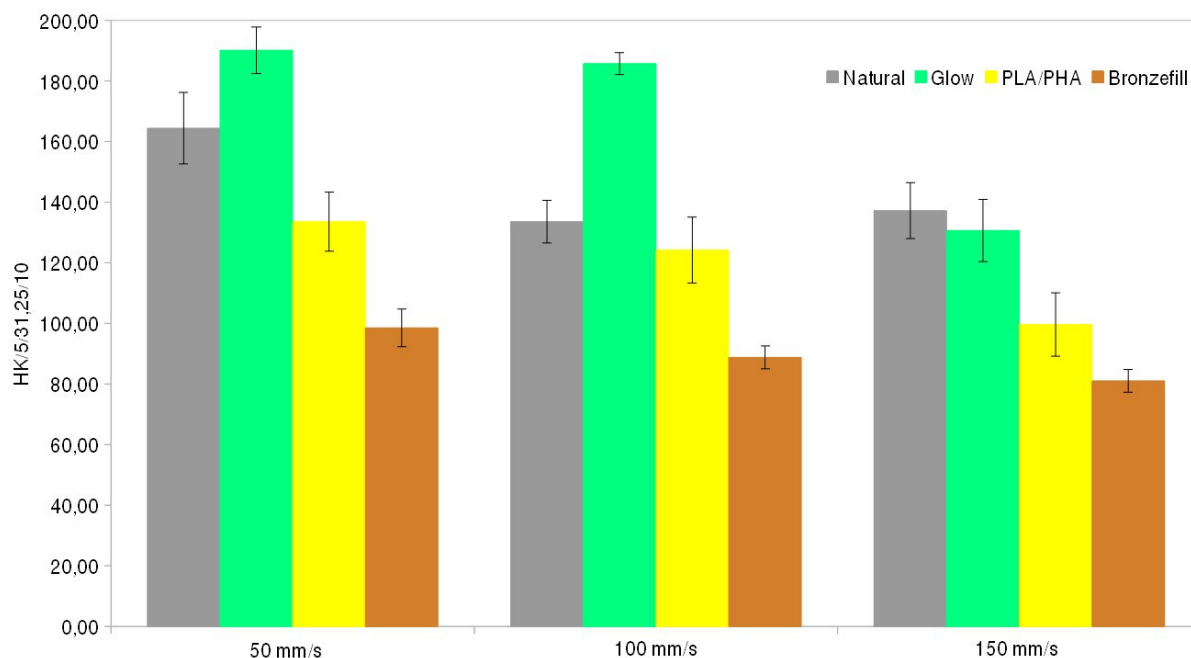
Bronzefill	Výška nanášené vrstvy [mm]	
	0,05	
Rychlosti tisku [mm/s]	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
50	108,83 ± 7,1	96,45 ± 7,6
100	85,55 ± 7,0	77,00 ± 6,4
150	80,86 ± 5,3	71,96 ± 4,8
	0,1	
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
50	98,52 ± 6,2	87,74 ± 4,7
100	88,77 ± 3,8	79,63 ± 3,1
150	81,05 ± 3,8	72,81 ± 3,2
	0,15	
	HK/5/306,56/10	HK/5/306,56/60
50	152,01 ± 9,0	134,95 ± 10,4
100	125,82 ± 5,7	112,20 ± 6,1
150	119,09 ± 5,7	105,16 ± 5,3

Naměřené údaje v tabulce 13 odrážejí zajímavé chování materiálu Bronzefill. Zde neplatí klesající trend a naopak nejvyšší tvrdost vykazuje vzorek s nejvyšší tloušťkou vrstvy, jak názorně ukazuje graf na obrázku 59. Dále lze pozorovat shody hodnot při rychlosti 100 mm/s u tloušťek 0,05 a 0,1 mm. Opět by šlo tvrdit, že do rychlosti 100 mm/s a do tloušťky vrstvy 0,1 mm nezáleží na sledovaných parametrech tisku. Parametr Flow zde opět celkem přesně kompenzuje průtok materiálu tryskou. Lze předpokládat že nad tloušťku nanášené vrstvy 0,15 mm se chování materiálu Bronzefill zcela změní. Velký podíl pevných částic by mohl způsobit výrazné zvýšení tvrdosti při vyšší tloušťce nanášené vrstvy. Nutno však brát na vědomí zvýšený přítlak trysky k podložce, z důvodů soudržnosti materiálu Bronzefill.



Obr. 59: Graf závislosti tvrdosti dle Brinella při 10 s na parametrech 3D tisku materiálu Bronzefill

Srovnají-li se výsledky měření tvrdosti napříč materiály tak, jak znázorňuje graf na obrázku 60, nejměkčí materiál bude právě bronz, z důvodů vysvětlených výše. Nejtvrdší materiál se zdá být Glow a to při rychlosti tisku 50 mm/s a tloušťce vrstvy 0,1 mm. Z grafu je také patrné že hodnoty tvrdosti například materiálu PLA/PHA jsou v rámci směrodatných odchylek přibližně stejné, tedy kompenzace parametru Flow pracuje celkem přesně i při maximální rychlosti krokových motorů, tedy při 150 mm/s



Obr. 60: Graf závislosti tvrdosti dle Brinella při 10 s na tloušťce nanášené vrstvy 0,1 mm napříč materiály

Zkouška tvrdosti dle Brinella však nemůže být brána objektivně, právě z důvodů zmiňovaných v předchozím textu. Tvrdosti takto změřené nepoukazují přímo na tvrdost materiálů, ale spíše na preciznost 3D tisku. Lze tedy vyvodit že, pokud jsou hodnoty tvrdosti při nižších rychlostech větší, proces 3D tisku je preciznější. Jednotlivé vrstvy jsou na sebe kladeny precizněji a stejně tak vrstvy jsou „přesněji“ nanášeny vedle sebe a materiál má tak čas přizpůsobit se nanášení. Jednotlivé vrstvy jsou poté homogenější než vrstvy zhotovené vyššími rychlostmi. Je tedy potřebné najít kompromis mezi rychlostí a nanášenou vrstvou pro dané použití, kde může hrát roli i estetika povrchu.

### 3.3 Zkouška v tahu

Následující tabulky 14 až 16 obsahují výsledky zkoušky v tahu pro jednotlivé vzorky. Bylo zhotoveno devět sad zkušebních tělísek po šesti až sedmi kusech (při vyšších rychlostech stoupá pravděpodobnost chyby) o tloušťkách vrstvy 0,05; 0,1 a 0,15 mm při rychlostech 50, 100 a 150 mm/s. Stanovení probíhalo dle normou daných podmínek: upínací délka 22 mm, měřicí rychlost 1 mm/min.

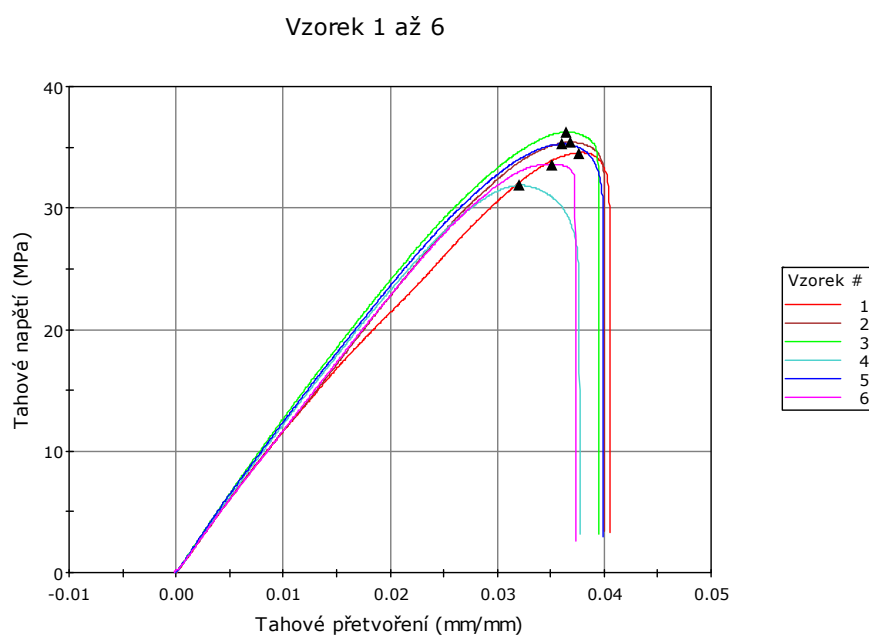
Tabulka 14: Zkouška v tahu materiálu Natural

Natural	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Zatížení při mezi pevnosti v tahu [N]
0,05 mm / 50mm/s	1 458,38 ± 57,71	52,35 ± 1,00	395,29 ± 8,35
0,05 mm / 100mm/s	1 283,22 ± 76,51	39,08 ± 2,88	326,35 ± 18,58
0,05 mm / 150mm/s	1 236,27 ± 59,81	35,65 ± 1,95	298,35 ± 11,67
0,1 mm / 50mm/s	1 364,20 ± 54,04	42,13 ± 2,24	354,21 ± 13,69
0,1 mm / 100mm/s	1 319,42 ± 37,91	38,98 ± 2,71	323,58 ± 20,99
0,1 mm / 150mm/s	1 311,82 ± 54,98	37,32 ± 2,05	307,51 ± 15,62
0,15 mm / 50mm/s	1 318,15 ± 81,11	37,47 ± 2,87	303,30 ± 18,02
0,15 mm / 100mm/s	1 237,81 ± 42,52	34,49 ± 1,56	288,53 ± 12,98
0,15 mm / 150mm/s	1 230,26 ± 59,90	33,70 ± 1,21	297,58 ± 9,29
	Protažení v tahu [%]	Protažení v tahu [mm]	
0,05 mm / 50mm/s	5,04 ± 0,11	1,11 ± 0,02	
0,05 mm / 100mm/s	4,34 ± 0,18	0,95 ± 0,04	
0,05 mm / 150mm/s	4,03 ± 0,21	0,89 ± 0,05	
0,1 mm / 50mm/s	4,05 ± 0,24	0,89 ± 0,05	
0,1 mm / 100mm/s	3,91 ± 0,26	0,86 ± 0,06	
0,1 mm / 150mm/s	3,54 ± 0,18	0,78 ± 0,04	
0,15 mm / 50mm/s	3,79 ± 0,25	0,83 ± 0,05	
0,15 mm / 100mm/s	3,57 ± 0,20	0,78 ± 0,04	
0,15 mm / 150mm/s	3,61 ± 0,21	0,79 ± 0,05	



Tabulka 14 obsahuje hodnoty zkoušky v tahu materiálu Natural. Na první pohled si lze všimnout hodnot tahových vlastností prvního vzorku 0,05/50; které značně převyšují všechny ostatní, více méně neměnné hodnoty. Tento nárůst je však diskutabilní, jedná se o příliš vysokou hodnotu, převyšující všechny ostatní.

U ostatních testovaných tělísek jsou hodnoty modulů pružnosti a protažení velmi podobné. To naznačuje velmi dobrou kompenzaci průtoku materiálu tryskou díky parametru Flow. Toto tvrzení je navíc podpořeno grafem na obrázku 61, který znázorňuje průběh testování jedné náhodné sady vzorků, konkrétně tělísek zhotovených rychlostí 100 mm/s a tloušťkou vrstvy 0,15 mm, kde je vidět pouze minimální rozptyl protažení jednotlivých tělísek. Takovéto shody dosahovala všechna měřená tělíška. Navíc je z tohoto grafu názorný křehký lom tělísek při maximálním protažení.



Obr. 61: Graf průběhu zkoušky v tahu materiálu Natural – závislost napětí na protažení vzorku 0,15/100 jako příklad

Z tabulky lze dále pozorovat nepatrný klesající trend meze pevnosti v tahu [MPa], který se však vlivem směrodatných odchylek vyrovná v rámci jedné tloušťky. Podobně se chovají i hodnoty protažení. Hodnoty tahových veličin klesají se zvyšujícími se hodnotami rychlostí i tlouštěk nanášených vrstev. Vzorek s nejvyšší rychlostí a nejvyšší vrstvou (0,15/150) jeví nejmenší hodnoty všech tahových vlastností.

Po zprůměrování hodnot tahových vlastností i odchylek, příklad uveden na modulu pružnosti [MPa], vyšla hodnota 1306,61 a průměr směrodatné odchylky 58,28. Dále byla vypočítána průměrná procentuální odchylka dle vztahu:

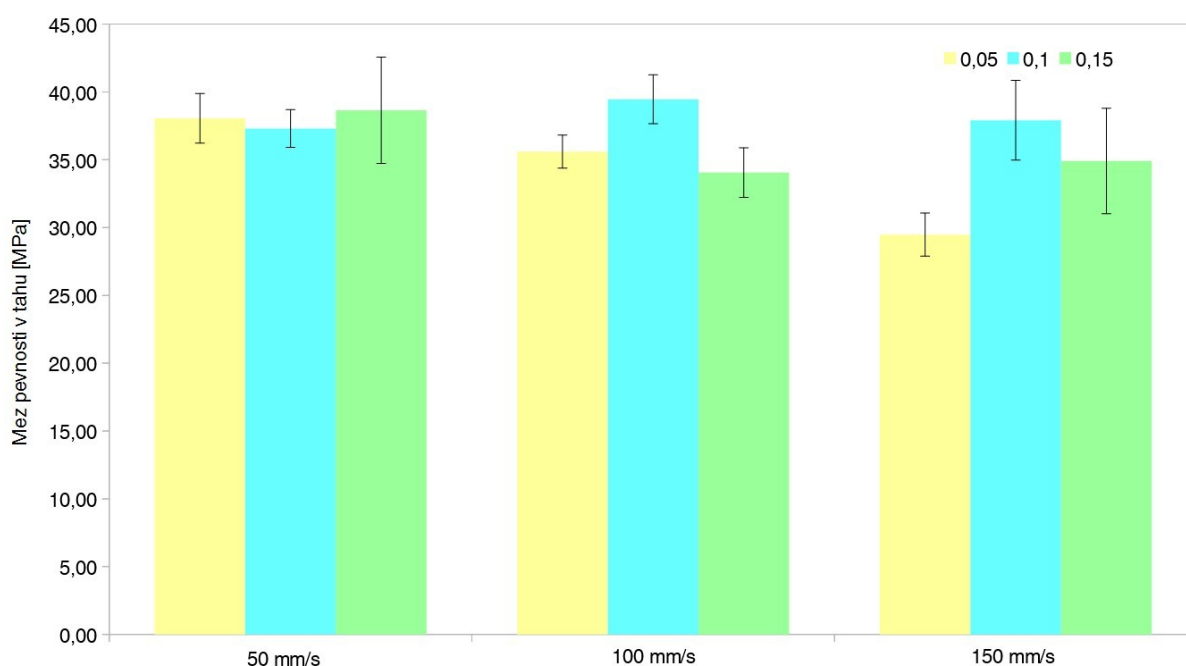
$$\% = \frac{100 \cdot \text{STDV}}{\text{Průměr}}$$

kde STDV je průměr směrodatných odchylek. Procentuální hodnota odchylky meze pevnosti [MPa] činí 4,46 %. U ostatních tahových vlastností je to velmi podobné. Procentuální odchylka nepřesahuje 10 %, z toho tedy vyplývá, že kompenzace průtoku materiálu tryskou parametrem Flow funguje velmi obstojně.

Tabulka 15: Zkouška v tahu materiálu Glow

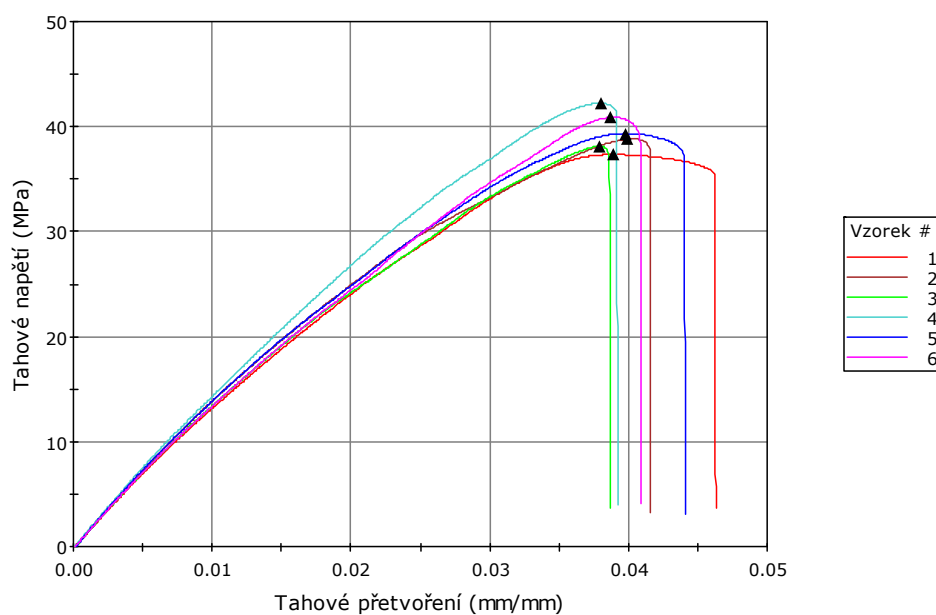
Glow	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti v tahu (MPa)	Zatížení při mezi pevnosti v tahu [N]
0,05mm / 50mm/s	1 200,91 ± 139,41	38,05 ± 1,83	318,73 ± 13,72
0,05mm / 100mm/s	1 283,49 ± 99,05	37,30 ± 1,39	309,87 ± 12,98
0,05mm / 150mm/s	1 463,47 ± 62,68	38,65 ± 3,92	307,89 ± 29,46
0,1mm / 50mm/s	1 314,03 ± 32,84	35,60 ± 1,22	317,08 ± 12,55
0,1mm / 100mm/s	1 427,61 ± 40,78	39,46 ± 1,80	327,68 ± 14,59
0,1mm / 150mm/s	1 314,36 ± 37,02	34,05 ± 1,83	290,18 ± 13,80
0,15mm / 50mm/s	1 246,34 ± 67,14	29,48 ± 1,59	260,74 ± 15,84
0,15mm / 100mm/s	1 383,13 ± 58,83	37,91 ± 2,94	303,85 ± 19,72
0,15mm / 150mm/s	1 330,69 ± 88,48	34,91 ± 3,89	292,61 ± 23,39
	Protažení v tahu [%]	Protažení v tahu [mm]	
0,05 mm / 50mm/s	4,09 ± 0,27	0,90 ± 0,06	
0,05 mm / 100mm/s	3,77 ± 0,18	0,83 ± 0,04	
0,05 mm / 150mm/s	3,73 ± 0,34	0,82 ± 0,07	
0,1 mm / 50mm/s	3,75 ± 0,12	0,82 ± 0,03	
0,1 mm / 100mm/s	3,89 ± 0,09	0,86 ± 0,02	
0,1 mm / 150mm/s	3,66 ± 0,16	0,80 ± 0,03	
0,15 mm / 50mm/s	3,30 ± 0,33	0,73 ± 0,07	
0,15 mm / 100mm/s	3,83 ± 0,27	0,84 ± 0,06	
0,15 mm / 150mm/s	3,84 ± 0,20	0,84 ± 0,04	

Ve výše uvedené tabulce 15 jsou seřazeny výsledné hodnoty zkoušky v tahu materiálu Glow. Tahové vlastnosti fluorescenčního materiálu vykazují specifické chování. Nejvyšších hodnot dosahují vzorky zhotovené při středních nastavených hodnotách rychlosti, tedy při 100 mm/s. Nejvyšší je právě vzorek 0,1/100. Názorněji ukazuje graf na obrázku 62. Nicméně po uvážení směrodatných odchylek se hodnoty téměř vyrovnají a lze tak opět říci, že parametr Flow zajišťuje dobrou kompenzaci průtoku materiálu tryskou, což je znovu potvrzeno i grafem z obrázku 63, který znázorňuje opět minimální rozptyl protažení testovaných tělísek. Zajímavý je také fakt, že s rostoucí tloušťkou vrstvy jeví hodnoty větší rozptyl se zvětšující se rychlostí. Ale ani tak nepřesáhne rozptyl 10 %.



Obr. 62: Graf závislosti meze pevnosti v tahu [MPa] na parametrech 3D tisku materiálu Glow

Vzorek 1 až 6



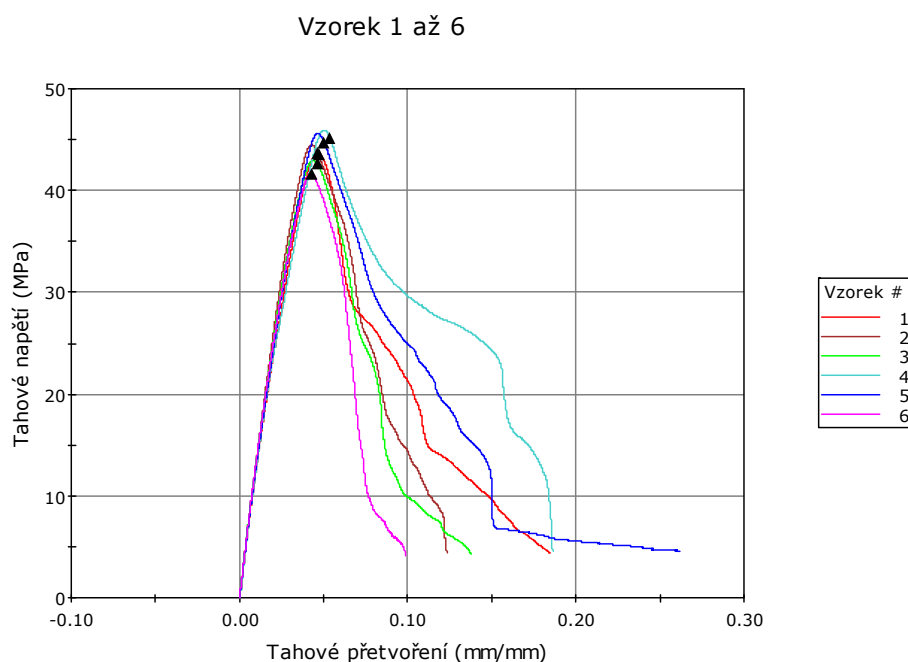
Obr. 63: Graf průběhu zkoušky v tahu materiálu Glow – závislost napětí na protažení vzorku 0,1/100 jako příklad

Tabulka 16: Zkouška v tahu materiálu PLA/PHA

PLA/PHA	Modul [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Zatížení při mezi pevnosti v tahu [N]
0,05mm / 50mm/s	1 353,00 ± 31,52	43,61 ± 1,32	335,77 ± 9,11
0,05mm / 100mm/s	1 313,15 ± 78,38	41,35 ± 1,64	318,79 ± 9,40
0,05mm / 150mm/s	1 249,16 ± 46,16	36,54 ± 2,97	283,71 ± 18,08
0,1mm / 50mm/s	1 120,68 ± 20,69	32,68 ± 1,46	291,84 ± 10,90
0,1mm / 100mm/s	1 270,56 ± 45,05	36,63 ± 1,23	302,37 ± 13,57
0,1mm / 150mm/s	1 211,14 ± 31,92	35,71 ± 2,08	295,07 ± 13,82
0,15mm / 50mm/s	1 259,80 ± 20,28	36,36 ± 1,94	287,09 ± 15,39
0,15mm / 100mm/s	1 211,79 ± 39,47	33,27 ± 1,26	273,29 ± 5,25
0,15mm / 150mm/s	1 184,10 ± 55,99	34,06 ± 2,51	282,31 ± 12,58
	Přetvoření v tahu [%]	Protážení v tahu [mm]	
0,05mm / 50mm/s	4,77 ± 0,38	1,05 ± 0,08	
0,05mm / 100mm/s	4,26 ± 0,24	0,94 ± 0,05	
0,05mm / 150mm/s	3,98 ± 0,33	0,88 ± 0,07	
0,1mm / 50mm/s	4,00 ± 0,13	0,88 ± 0,03	
0,1mm / 100mm/s	3,95 ± 0,39	0,87 ± 0,09	
0,1mm / 150mm/s	3,80 ± 0,24	0,84 ± 0,05	
0,15mm / 50mm/s	4,17 ± 0,39	0,92 ± 0,09	
0,15mm / 100mm/s	3,91 ± 0,32	0,86 ± 0,07	
0,15mm / 150mm/s	3,77 ± 0,19	0,83 ± 0,04	

Hodnoty tahových vlastností kopolymeru PLA/PHA v tabulce 16 nevykazují přímo závislost s měnicími se parametry 3D tisku. Nejvyšší hodnoty tahových vlastností byly změřeny u vzorku 0,05/50. Po zvážení směrodatných odchylek, je však opět zřejmá shoda hodnot tahových vlastností, tudíž parametr Flow i v tomto případě pracuje velmi obstojně. Zajímavější je však fakt vyplývající z grafu na obrázku 64. U tohoto materiálu byl pozorován vůbec nejmenší rozptyl protážení tělísek ze všech vzorků. Kopolymer PHA/PLA se zdá být pro 3D tisk nejlepší volbou z uvedených materiálů a to jak

z pohledu fyzikálně-mechanických vlastností, tak i z pohledu procesu 3D tisku. Dále lze potvrdit tvrzení výrobce, že se jedná o materiál se zvýšenou houževnatostí. Z pracovní křivky zkušebních tělísek, obzvláště vzorku 6, lze vidět výraznější deformaci než u předchozích materiálů.



Obr. 64: Graf průběhu zkoušky v tahu materiálu PLA/PHA – závislost napětí na protažení vzorku 0,05/50 jako příklad

Při srovnání tahových vlastností všech materiálů nelze bezpečně říci, který dopadl nejlépe. Nejvyšší mez pevnosti v tahu [MPa] (vyjma vzorku Natural 0,05/50) vykazuje vzorek PLA/PHA 0,05/50. Obecně lze říci, že čím více jemnějších vrstev tělísko obsahuje tím jsou tahové vlastnosti lepší. Obdobně čím menší rychlost pohybů os, tím lepší tahové vlastnosti. Na druhou stranu se najdou i velmi shodné hodnoty tahových vlastností při různých parametrech, např. Natural 0,1/150 a 0,15/50, Glow 0,05/50 a 0,15/100 či PLA/PHA 0,05/150 a 0,1/100. U těchto příkladů vzorečků nezáleží na nastavení parametrů, díky kompenzaci parametru Flow. Lze si tak vybrat parametry dle požadavků aplikace při zachování vlastností.

U zkoušky v tahu se daleko lépe projevila funkčnost parametru Flow, díky zaměření zkoušky spíše na soudržnosti materiálu a ne tolik na preciznosti tisku. Lokální miniaturní vady soudržnosti linek byly buď zanedbány, nebo se projeví pouze

nepatrně. Linky výplně tělíska byly orientovány pod úhlem  $45^\circ$  vůči ose trhacího stroje, takže se nejen protahovaly ale také oddalovaly. To znamená, že byla měřena jak soudržnost materiálu, tedy koheze, tak přilnavost vrstev v tělísku, tedy adheze.

Co se týče materiálu Bronzefill, zkušební tělíska pro zkoušku v tahu se z technických důvodů nepodařilo vytisknout.

## ZÁVĚR

## 4 ZÁVĚR

Se zaměřením 3D tisku na materiál PLA, surový i modifikovaný, z něhož byla zhotovena testovací tělíska pro měření fyzikálně-mechanických vlastností a to tvrdost dle Brinella a zkouška v tahu, byl předpoklad optimalizace procesu 3D tisku tak, aby bylo možné jej urychlit a přitom výrazně neztratit kvalitu výrobku z hlediska pevnosti nebo estetiky.

Parametry 3D tisku byly zvoleny dle maximální rychlosti krokovacích motorů, tedy od 150 mm/s, přes 100 mm/s po 50 mm/s, a nejmenší možné tloušťky nanášené vrstvy, tedy od 0,05 mm, přes 0,1 mm po 0,15 mm. Tyto vybrané hodnoty pokrývají celý rozsah sledovaných parametrů, od minimálního extrému přes střední, nejvíce prakticky používanou hodnotu, až po maximální extrém. Celý proces 3D tisku je řízen parametrem Flow, nastavený na 100 %, který kompenzuje průtok materiálu tryskou, aby bylo dosaženo homogenní vrstvy o přesné tloušťce.

Porovnání fyzikálně mechanických vlastností 3D tiskem zhotovených tělísek vedlo k optimalizování procesu 3D tisku vybraných materiálů na konkrétní 3D tiskárně typu open-source RepRap. Optimalizace spočívá v nanášení vrstev materiálu s přesností na 0,05 mm i při maximální rychlosti, to bylo ověřeno z rozměrů jednotlivých tělísek. Ale jak bylo dokázáno, při vyšších rychlostech tisku jsou tahové vlastnosti i tvrdost nepatrně sníženy a místy lze pozorovat jistý klesající trend s rostoucí rychlostí. Dále byla zjištěna relativně malá odchylka fyzikálně-mechanických vlastností, zejména tahových, v závislosti na nanášené vrstvě při jedné rychlosti. Za přibližnou stálost hodnot tahových vlastností může parametr Flow, jenž velmi dobře kompenzuje průtok materiálu tryskou. Procentuální odchylky tahových vlastností byli nižší než 10 %.

Některé zkušební vzorky vykazovaly natolik shodné hodnoty, že lze tvrdit, budou-li se měnit parametry 3D tisku do určitých mezí, na jejich hodnotě nezáleží, výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti zůstanou neměnné díky kompenzaci parametru Flow. Tím lze zvolit vyšší rychlost pohybů os a nevádí-li to estetice tak i tloušťku nanášené vrstvy, což bude mít za následek značné ušetření času potřebného na zhotovení objektu.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Hull, C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography; číslo publikace: US4575330 A; číslo žádosti: US 06/638,905; 11. březen 1986; dostupné z: <https://www.google.com/patents/US4575330>
- [2] Machine design; What's the Difference Between Stereolithography and Selective Laser Sintering? [online] 2015 [2. 1. 2017] dostupné z: <http://machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between-stereolithography-and-selective-laser-sintering>
- [3] 3D SYSTEMS; Stereolithography (SLA®) [online] 2015 [2. 1. 2017] dostupné z: <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/stereolithography/sla>
- [4] 3D SYSTEMS; Stereolithography (SLA) [online] 2016 [2.1. 2017] <https://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/stereolithography-sla>
- [5] ZÁKLADY 3D TISKU; Průša, J.; Průša M.; [online] 2014 [29. 10. 2016] dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [6] Choi, G.; Kim, S.; Adaptive modeling method for 3-D printing with various polymer materials; vydavatelství: KOREAN FIBER SOC; svazek: 17; číslo: 7; strana: 977 - 983; červenec 2016; Jižní Korea
- [7] Aniwaa; ProJet 6000 HD 3D Systems - 3D printer [online] 2016 [2. 1. 2017] dostupné z: <http://www.aniwaa.com/product/3d-printers/3d-systems-projet-6000-hd/>
- [8] Vimeo, Josef Průša - Open source hardware [online] 2011 [30. 10. 2016] dostupné z: <https://vimeo.com/31900883>
- [9] Pearce, J. M.; Blair, C. M.; Laciak K. J.; Andrews, Nosrat A.; Zelenika-Zovko I; 3-D Printing of Open Source Appropriate Technologies for Self-Directed Sustainable Development; vydavatelství: Journal of Sustainable Development; svazek: 3; číslo: 4; strana: 17-29; 2010; Canada
- [10] Lanzotti, A.; Grasso, M.; Staiano, G.; Martorelli, M.; The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer; vydavatelství: EMERALD GROUP PUBLISHING LTD; svazek: 21; číslo: 5; strana: 604-617; 2015; Anglie
- [11] Stratasys; FDM Technology, 3D print durable parts with real thermoplastic [online] 2016 [30. 12. 2016] dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
- [12] Youtube; Ultimaker PVA Explained - Water-soluble support material [online] 2016 [30. 12. 2016] dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=0ENgGkPP94w>
- [13] Fused deposition modelling [online] 2008 [30. 12. 2016] dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fused\\_deposition\\_modeling#/media/File:FDM\\_by\\_Zureks.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling#/media/File:FDM_by_Zureks.png)
- [14] HSBNE Wiki Darwin [online] 2016 [31. 10. 2016] <http://wiki.hsbne.org/darwin>
- [15] RepRapPro Mendel [online] 2013 [31. 10. 2016] dostupné z: [http://reprap.org/wiki/RepRapPro\\_Mendel](http://reprap.org/wiki/RepRapPro_Mendel)

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [16] Josef Průša; Co je to RepRap [online] 2015 [29. 10. 2016] dostupné z: <http://josefprusa.cz/co-je-reprap/>
- [17] ALL3DP; Best RepRap Prusa i3 Kit – Buyer's Guide to 33 Kits incl. the MK2 [online] 2016 [30. 12. 2016] dostupné z: <https://all3dp.com/best-reprap-prusa-i3-kit-3d-printer-buy/>
- [18] Robot club Rychnov; 3D tiskárna REBEL 2 [online] 2014 [30. 12. 2016] dostupné z: <http://robotika.vosrk.cz/articles/rebel/cs>
- [19] Ultimaker; Ultimaker 3 Professional 3D printing made accessible [online] 2016 [30. 12. 2016] <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-3>
- [20] CAD House; Sense 3D scanner [online] 2015 [13. 1. 2017] dostupné z: <http://www.cad-house.co.za/sense-3d-scanner.html>
- [21] Lalit Narayan, K.; Mallikarjuna Rao, K.; Sarcar, M. M. M.; Computer Aided Design and Manufacturing; vydavatelství: Prentice-Hall of India; 2008; New Delhie; ISBN: 9788120333420
- [22] Ultimaker Stringing [online] 2016 [30. 11. 2016] dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/19504-stringing>
- [23] Kabasci, S.; Bio-Based Plastics; vydavatelství: Wiley; 2014; Německo; ISBN 978-1-119-99400-8
- [24] Wikipedie; Tea bags made of PLA. Peppermint tea is enclosed [online] 2009 [19. 1. 2017] dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic\\_acid#/media/File:Teebeutel\\_Polylactid\\_2009.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid#/media/File:Teebeutel_Polylactid_2009.jpg)
- [25] Cellulac; Consortium of Irish Biomedical companies in €3m joint venture to deliver biodegradable implants from 2nd generation biochemicals [online] 2013 [19. 1. 2017] dostupné z: <http://cellulac.com/sf/consortium-of-irish-biomedical-companies-in-e3m-joint-venture-to-deliver-biodegradable-implants-from-2nd-generation-biochemicals/>
- [26] Šňupárek, J.; Mleziva J.; Polymery výroba, struktura vlastnosti a použití; vydavatelství: Sobotáles; 2000; Česká republika. ISBN: 80-85920-72-7
- [27] Svět3Dtisku; TISKOVÉ STRUNY 1,75 MM [online] 2017 [19. 1. 2017] dostupné z: <https://eshop.svet-3d-tisku.cz/tiskove-struny-1-75-mm/>
- [28] 3D SYSTEMS; WHAT IS MJP (MULTIJET PRINTING)? [online] 2016 [3. 1. 2017] dostupné z: <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/multi-jet-printing/mjp>
- [29] Youtube; PolyJet Technology [online] 2013 [3. 1. 2017] dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Som3CddHfZE&feature=youtu.be>
- [30] CAMTECS engineering; Impression 3D par UV, le processus Polyjet – Imprimante Objet Eden 260V [online] 2016 [3. 1. 2017] dostupné z: <http://camtecs.com/3D/impression-3d-par-uv-le-processus-polyjet/>
- [31] Youtube; CJP - ColorJet Printing Process [online] 2013 [3. 1. 2017] dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=8l0jtgZyjcE&feature=youtu.be>
- [32] 3D SYSTEMS; ColorJet Printing (CJP) [online] 2016 [3. 1. 2017] dostupné z: <https://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/colorjet-printing-cjp>
- [33] Solidscape; [online] 2016 [3. 1. 2017] dostupné z: <http://www.solid-scape.com>

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [34] Fabaloo; Stratasys' Astonishing New J750 Color 3D Printer: Evolutionary AND Revolutionary [online] 2016 [3. 1. 2017] dostupné z: <http://www.faballoo.com/blog/2016/4/4/stratasys-astonishing-new-j750-color-3d-printer-evolutionary-and-revolutionary>
- [35] 3D SYSTEMS; ProJet® MJP 3600 Max [online] 2016 [3. 1. 2017] <https://www.3dsystems.com/media/projetr-mjp-3600-max>
- [36] Aniwaa; ProJet 360 3D Systems - 3D printer [online] 2016 [3. 1. 2017] dostupné z: <http://www.aniwaa.com/product/3d-printers/3d-systems-projet-360/>
- [37] Rapidreadytec; Solidscape Launches Max2 Wax Pattern Additive Manufacturing System [online] 2014 [3. 1. 2017] dostupné z: <http://www.rapidreadytech.com/2014/05/solidscape-launches-max2-wax-pattern-additive-manufacturing-system/>
- [38] Stratasys; PolyJet Materials [online] 2016 [3. 1. 2017] dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/polyjet>
- [39] 3D SYSTEMS, MULTIJET PRINTING MATERIAL PROPERTIES [online] 2016 [3. 1. 2017] dostupné z: <https://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/multijet-printing-mjp/materials>
- [40] 3D SYSTEMS; Selective Laser Sintering (SLS®) [online] 2016 [4. 1. 2017] dostupné z: <https://www.3dsystems.com/resources/information-guides/selective-laser-sintering/sls>
- [41] Youtube; 3D Systems Selective Laser Sintering Process [online] 2013 [4. 1. 2017] dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=6s09pfILV8Y>
- [42] 3D SYSTEMS; Selective Laser Sintering (SLS) [online] 2016 [4. 1. 2017] dostupné z: <http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/selective-laser-sintering-sls>
- [43] Interactive; ProX 800 [online] 2016 [4. 1. 2017] dostupné z: <https://www.icu3d.com/product/prox-800/>
- [44] Youtube; What if 3D printing was 100x faster? | Joseph DeSimone [online] 2015 [6. 1. 2017] dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ihR9SX7dgRo>
- [45] 3D Printing Industry; Breakthrough! Layerless 3D Printing! 25-100x Faster Prints! [online] 2015 [6. 1. 2017] dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/news/breakthrough-layerless-3d-printing-25-100x-faster-prints-44646/>
- [46] Architect Technology; Carbon3D's Revolutionary Technology Turns 3D Printing on Its Head [online] 2015 [8. 1. 2017] dostupné z: [http://www.architectmagazine.com/technology/carbon3ds-revolutionary-technology-turns-3d-printing-on-its-head\\_o](http://www.architectmagazine.com/technology/carbon3ds-revolutionary-technology-turns-3d-printing-on-its-head_o)
- [47] 3D Printing Industry; Carbon Finally Unveils First Commercial CLIP 3D Printer; [online] 2016 [6. 1. 2017] dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/carbon3d-finally-unveils-first-commercial-clip-3d-printer-75675/>
- [48] Carbon; Materials [online] 2016 [6. 1. 2017] dostupné z: <http://carbon3d.com/materials>
- [49] Byramoglu, G.; hbab, I.; Kahraman, M. V.; Gunor, A.; Photocurable cyanate ester containing hybrid coatings by an anhydrous sol-gel technique; vydavatelstv: ELSEVIER SCIENCE SA; svazek: 74; vydání: 3; strana: 511-519; červenec 2012; Švýcarsko

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [50] Večeřa, M.; Prokůpek, L.; Machotová J.; Šňupárek J.; Epoxy – Cyanate Ester as Matrixes for Tagging of Explosives; vydavatelství: Wiley Periodicals, Inc.; svazek: 33; vydání: 2; 2013 Česká republika
- [51] Vodochodský, O.; Modifikace pryskyřice kyanátového typu jako nosiče pro identifikační tělíska; Pardubice, 2012. 90 s.; Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta Chemicko-technologická; Vedoucí práce: Ing. Miroslav Večeřa, CSc.
- [52] Javelin; Architecture, Create Your Scale Models Faster [online] 2012 [6. 1. 2017] dostupné z: <http://www.javelin-tech.com/3d-printer/industry/architecture/>
- [53] 3D Printing Industry; 3D Printing Applications [online] 2015 [6. 1. 2017] dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/applications/>
- [54] TurboSquid; Vases Pores Set [online] 2012 [8. 1. 2017] dostupné z: <http://www.turbosquid.com/3d-models/3d-vase/696786>
- [55] Microfabricator; Converting a 3Drag into a Chocolate 3D Printer [online] 2014 [7. 1. 2017] dostupné z: <http://microfabricator.com/articles/view/id/54842609313944c2498b456a/converting-a-3drag-into-a-chocolate-3d-printer>
- [56] All that 3D; 3D Printing in the Field of Medicine [online] 2015 [7. 1. 2017] dostupné z: <https://www.allthat3d.com/3d-printing-medicine/>
- [57] 3D printing News; 12 Year Old Bone Cancer Patient Given 3D Printed Spine Implant [online] 2014 [7. 1. 2017] dostupné z: <http://www.3dprintingnews.co.uk/3dprinting-3/12-year-old-bone-cancer-patient-given-3d-printed-spine-implant/>
- [58] Digital Trends; DUBAI'S GOING TO 3D-PRINT AN OFFICE BUILDING – AND EVERYTHING INSIDE IT [online] 2015 [7. 1. 2017] dostupné z: <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/dubai-3d-printed-office-building/>
- [59] All3DP; World's First 3D Printed Pedestrian Bridge Completed in Madrid [online] 2016 [7. 1. 2017] dostupné z: [https://all3dp.com/3d-printed-pedestrian-bridge/?omhide=true&utm\\_source=Newsletter&utm\\_campaign=e26eaecacf-Newsletter&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_9dfeeddae-e26eaecacf-383112753](https://all3dp.com/3d-printed-pedestrian-bridge/?omhide=true&utm_source=Newsletter&utm_campaign=e26eaecacf-Newsletter&utm_medium=email&utm_term=0_9dfeeddae-e26eaecacf-383112753)
- [60] Shapeways; 3D Printing Shoes with New Balance (VIDEO); [online] 2014 [7. 1. 2017] dostupné z: <http://www.shapeways.com/blog/archives/2510-3d-printing-shoes-with-new-balance-video.html>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ABS	Akrylonitril-Butadien-Styren	MLA	Dimer L a D mléčných kyselin
ASA	Akrylonitril-Butadien-Akrylát	MVR	Objemový index toku taveniny
ATP	Adenosintrifosfát	PDLA	Poly D-mléčná kyselina
CAD	Computer Aided Design	PDLLA	Poly D a L kyselina mléčná
CAM	Computer Aided Manufacturing	PET	Polyethyltereftalát
CE	Cyanate Ester	PETG	Glykol polyethyltereftalát
CJP	ColorJet Printing	PHA	Polyhydroxyalkanoáty
CLIP	Continous Liquid Interface Production	PLA	Kyselina polymléčná
CNC	Computer Numeric Controll	PLLA	Poly L-mléčná kyselina
DLA	Dimer D-mléčných kyselin	PMMA	Polymethylmethakrylát
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	PP	Polypropylen
EPU	Elastic Polyurethane	RepRap	Replication Rapid Prototyper
EPX	Epoxy	RP	Rigid Polyurethane
FDM	Fused Deposition Modeling	SLA	Stereolitografie
FPU	Flexible Polyurethane	SLS	Selective Laser Sintering
LLA	Dimer L-mléčných kyselin	UMA	Urethane Methakrylate
MFR	Hmotnostní index toku taveniny		
MJP	MultiJet Printing		