

# **Stanovení mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk**

František Dynka

---

Bakalářská práce  
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta managementu a ekonomiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta managementu a ekonomiky  
Ústav průmyslového inženýrství a informačních systémů

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: František Dynka  
Osobní číslo: M17351  
Studijní program: B6209 Systémové inženýrství a informatika  
Studijní obor: Řízení výroby a kvality  
Forma studia: Prezenční  
Téma práce: Stanovení mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk

### Zásady pro vypracování

#### Úvod

Definujte cíle práce a použité metody zpracování práce.

#### I. Teoretická část

- Proveďte literární rozbor aditivních technologií, aplikovaného aditivního materiálu a mechanické zkoušky statické tahem.

#### II. Praktická část

- Navrhněte a vyrobte normalizované vzorky, proveďte mechanickou zkoušku statickou tahem.
- Proveďte zpracování a vyhodnocení mechanických vlastností vzorků vyrobených metodou 3D tisku.
- Zhodnoťte použitelnost aditivních testovaných materiálů v procesu výroby z ekonomického hlediska.

#### Závěr

Rozsah bakalářské práce: **cca 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich: Hanser Publishers, 2016, 591 s. ISBN 978-1-56990-582-1.  
CHUA, Che Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.  
KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017, 211 s. ISBN 978-80-251-4876-1.  
SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, 444 s. ISBN 978-1-4987-1477-8.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**  
Ústav průmyslového inženýrství a informačních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **6. ledna 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2020**

L.S.

---

**doc. Ing. David Tuček, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Eva Juříčková, Ph.D.**  
ředitel ústavu

## PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen na elektronickém nosiči v příruční knihovně Fakulty managementu a ekonomiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### Prohlašuji,

1. že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
2. že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

Jméno a příjmení: František Dynka

.....

podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá stanovením mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk, včetně jejich zhodnocení z pohledu použitelnosti v procesu výroby z ekonomického hlediska.

Pro tisk normalizovaných zkušebních vzorků bylo využito metody Fused Deposition Modeling (FDM). Pro každý materiál bylo vytisknuto 5 vzorků dle normy ČSN EN ISO 527. Jednotlivé aditivní materiály byly zkoušeny mechanickou zkouškou statickou tahem.

Vybrané parametry získané z jednotlivých tahových zkoušek byly statisticky zpracovány a zaznamenány v tabulkách a grafech, ze kterých bylo zhotoveno výsledné zhodnocení testovaných materiálů.

**Klíčová slova:** Mechanické vlastnosti, 3D tisk, Fused Deposition Modeling, zkušební tyč, zkouška statická tahem, aditivní materiál, testování.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with a determination of mechanical properties of materials used for 3D printing including their evaluation in the terms of the usability in the production process from an economic point of view.

Fused Deposition Modeling (FDM) was used to print out normalized test samples. Five samples for each material were printed out according to the standard ČSN EN ISO 527. Individual additive materials were tested by a mechanical static tensile test.

Selected parameters collected from individual tensile tests were statistically processed and recorded in tables and graphs, from which the final evaluation of the tested materials has been created.

**Keywords:** Mechanical properties, 3D printing, Fused Deposition Modeling, test sample, tensile test, additive material, testing.

## ***Poděkování***

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu

***panu doc. Ing. Josefu Sedlákovi, Ph.D.***

za odborné vedení, cenné připomínky, rady a pozitivní přístup při vypracování mé  
bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat společnosti

***ALPS Electric Czech, s.r.o.***

za poskytnutí aditivních materiálů a 3D tiskárny.

Taktéž bych chtěl poděkovat

***Univerzitě obrany v Brně***

za spolupráci při zhotovení tahové zkoušky.

V neposlední řadě chci poděkovat

***své rodině a přátelům***

za podporu při studiu a práci.

## ***Motto***

*„Ne každý bude chápat vaši cestu, to je v pořádku, není to jejich cesta, je vaše.“*

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 HISTORIE, SOUČASNOST A BUDOUCNOST 3D TISKU</b> .....	<b>11</b>
<b>2 TECHNOLOGIE 3D TISKU</b> .....	<b>16</b>
2.1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE NA BÁZI FOTOPOLYMERŮ .....	17
2.1.1 Stereolitografie .....	17
2.1.2 Solid Ground Curing .....	18
2.1.3 Digital Light Processing a Liquid Crystal Display .....	19
2.2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE NA BÁZI TUHÝCH MATERIÁLŮ .....	20
2.2.1 Laminated Object Manufacturing .....	20
2.2.2 Multi Jet Modeling .....	21
2.2.3 Fused Deposition Modeling .....	22
2.3 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE NA BÁZI PRÁŠKOVÝCH MATERIÁLŮ .....	23
2.3.1 Selective Laser Sintering .....	23
2.3.2 Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting .....	25
2.3.3 Electronic Beam Melting .....	26
2.4 SHRNUTÍ VYBRANÝCH 3D TISKOVÝCH TECHNOLOGIÍ .....	27
<b>3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ</b> .....	<b>28</b>
3.1 PRUŽNOST .....	28
3.2 PEVNOST .....	28
3.3 PLASTICITA .....	28
3.4 HOUŽEVNATOST .....	28
3.5 ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ .....	29
<b>4 MECHANICKÁ ZKOUŠKA STATICKÁ TAHEM</b> .....	<b>30</b>
4.1 ZKUŠEBNÍ VZORKY A PRINCIP TAHOVÉ ZKOUŠKY .....	30
4.2 PRACOVNÍ DIAGRAM .....	31
4.3 VÝPOČET ZÁKLADNÍCH NORMALIZOVANÝCH PARAMETRŮ .....	33
4.3.1 Smluvní tahový diagram .....	33
4.3.2 Hookův zákon a modul pružnosti .....	35
4.3.3 Mez kluzu .....	35
4.3.4 Mez pevnosti .....	37
4.3.5 Tažnost .....	38
<b>5 CHARAKTERISTIKA POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO 3D TISK METODOU FDM</b> .....	<b>39</b>
5.1 POLYMERNÍ MATERIÁLY (PLASTY) .....	39
5.1.1 PLA (polylaktid – polymléčná kyselina) .....	40
5.1.2 ABS (akrylonitrilbutadienstyren) .....	41
5.1.3 ASA (akrylonitrilstyrenakryl) .....	41
5.1.4 PET-G (polyethylentereftalát-1,4- cyklohexylendimethylentereftalát) .....	42
<b>6 SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>43</b>

<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>44</b>
<b>7 NÁVRH A VÝROBA NORMALIZOVANÝCH VZORKŮ .....</b>	<b>45</b>
7.1 NÁVRH NORMALIZOVANÝCH VZORKŮ .....	45
7.2 TVORBA MODELU ZKUŠEBNÍ TYČE .....	46
7.3 TISK ZKUŠEBNÍCH TYČÍ .....	47
7.3.1 Zkoušené materiály .....	48
7.3.2 Nastavení tiskových parametrů .....	48
<b>8 PROVEDENÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY STATICKÉ TAHEM.....</b>	<b>50</b>
8.1 NASTAVENÍ VSTUPNÍCH PARAMETRŮ V PROGRAMU TESTXPERT .....	51
8.2 PRŮBĚH TAHOVÉ ZKOUŠKY .....	51
<b>9 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TESTOVANÝCH ADITIVNÍCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>53</b>
9.1 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ PLA .....	54
9.1.1 Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PLA Filament-PM .....	54
9.1.2 Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PLA Prusament .....	58
9.1.3 Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PLA Fillamentum .....	61
9.1.4 Vyhodnocení mechanických vlastností materiálů PLA .....	64
9.1.5 Tahové diagramy materiálu PLA .....	66
9.2 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ OSTATNÍCH ADITIVNÍCH MATERIÁLŮ .....	67
<b>10 ZHODNOCENÍ TESTOVANÝCH ADITIVNÍCH MATERIÁLŮ V PROCESU VÝROBY Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA.....</b>	<b>68</b>
10.1 SHRNUÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TESTOVANÝCH ADITIVNÍCH MATERIÁLŮ .....	68
10.2 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ TESTOVANÝCH MATERIÁLŮ .....	69
10.3 ZHODNOCENÍ MODULŮ PRUŽNOSTI V PROCESU VÝROBY Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA .....	70
10.4 ZHODNOCENÍ MEZÍ PEVNOSTI V PROCESU VÝROBY Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA .....	71
10.5 ZHODNOCENÍ TAŽNOSTÍ TESTOVANÝCH MATERIÁLŮ V PROCESU VÝROBY Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA .....	72
10.6 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ TESTOVANÝCH MATERIÁLŮ .....	73
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>74</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>75</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>79</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>83</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>84</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>85</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>86</b>



## ÚVOD

Technologie 3D tisku patří mezi novodobé trendy moderní výroby. Mezi současné trendy patří zejména 3D tisk metodou Fused Deposition Modeling, který je oblíbený jak mezi firmami, tak mezi domácími kutily, a to zejména díky nízkým pořizovacím a provozním nákladům. 3D tisk patří mezi aditivní technologie, které fungují na principu postupného nanášení jednotlivých vrstev materiálu, z čehož vznikne požadovaný objekt. 3D tisk se vyznačuje především schopností vytvářet velmi složité tvary objektů, což je pro běžné metody výroby problém. Jednou z velkých výhod aditivních technologií je produkce minimálního odpadu.

Díky úspoře času, nízké produkci odpadu a rychlosti jsou aditivní technologie ekologické a snižují provozní náklady, které vedou ke zlepšení efektivity a konkurenceschopnosti podniku.

Jednou z klíčových možností pro snížení nákladů výroby v oblasti 3D tisku je volba vhodného materiálu. Kvůli velkému množství výrobců a druhů materiálů je značný problém určit vhodný materiál pro výrobu jednotlivých součástí, a to hlavně z důvodu, že každá součást je zpravidla odlišně namáhána. Z toho plyne, že při výrobě odlišných součástí je nutné přistupovat individuálně a volit materiál nezávisle, tak aby dostatečně splňoval podmínky pro správnou funkčnost dané součásti a v případě, je-li to možné, byl zároveň ekonomický a ekologický. K volbě správného materiálu pro výrobu součástí využívají firmy tzv. zkoušky materiálů, kterými se ověřují zejména mechanické vlastnosti materiálů.

Hlavním důvodem sepsání této bakalářské práce je stanovení mechanických vlastností vybraných aditivních materiálů a jejich ekonomické zhodnocení ve výrobním procesu pro následné využití v praxi.

## CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE

Hlavním cílem této bakalářské práce je zpracování mechanických vlastností vybraných aditivních materiálů a jejich ekonomické zhodnocení z pohledu použitelnosti v procesu výroby.

Teoretická část se opírá zejména o poznatky z odborných článků a literatury z oblasti aditivních technologií. Úlohou teoretické části práce je popsání historie, současnosti a budoucnosti aditivních technologií. Dále zde bude zpracována charakteristika a rozbor jednotlivých technologií 3D tisku a vybraných aditivních materiálů. V závěru teoretické části bude proveden rozbor mechanické zkoušky statické tahem.

Úlohou praktické části této bakalářské práce je návrh normalizovaných vzorků v CAD programu a jejich výroba technologií 3D tisku (FDM). Normalizované vzorky budou následně testovány mechanickou zkouškou statickou tahem, z jejichž výsledků bude provedeno zpracování a vyhodnocení mechanických vlastností testovaných aditivních materiálů. Hlavním cílem praktické části je zhodnocení testovaných materiálu v procesu výroby z ekonomického hlediska.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 HISTORIE, SOUČASNOST A BUDOUCNOST 3D TISKU

Zpočátku se 3D tisk primárně označoval jako Rapid Prototyping (rychlá výroba prototypů) a dodnes se s tímto označením lze setkat. Před příchodem dostupných 3D tiskáren se Rapid prototyping používal především pro výrobu prototypů. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019; Leo Gregurić, 2018)

Prvotní experimenty prováděl Dr. Hideo Kodama roku 1981. Jako první popsal výrobní postup vytvrzování fotopolymerů UV světlem po jednotlivých vrstvách, ale jeho pokusy skončily neúspěšně. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019; Leo Gregurić, 2018)

V roce 1984 při výzkumu Charlese Hulla, jenž zkoumal vliv působení UV světla na fotopolymery, objevil fyzikální vlastnosti, které zapříčinily tuhnutí materiálu. V roce 1986 si nechal Charles Hull patentovat technologii zvanou Stereolitografie. V tomtéž roce založil novou společnost 3D Systems, která roku 1988 vydala první komerční produkt SLA-1 (viz obr. 1). Společnost 3D Systems je i v dnešní době lídrem na trhu. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019; Leo Gregurić, 2018)

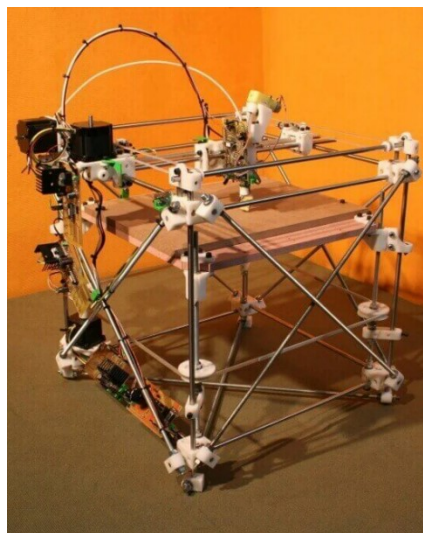


Obr. 1 – SLA-1 (Our Story, 2020)

Postupně na trh pronikaly další technologie 3D tisku. V roce 1988 byla vynalezena nová aditivní technologie zvaná Selective Laser Sintering (SLS). Patent tentokrát podává vysokoškolák Texaské univerzity v Austinu Carl Deckard v roce 1989. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019; Leo Gregurić, 2018)

V dnešní době veřejně nejznámější technologie 3D tisku Fusion Deposition Modeling (FDM) byla předložena až jako čtvrtá v pořadí. Patent byl vydán v roce 1989 společností Stratasys se sídlem v Minnesotě. Mezi prvními odvětvími, která začala používat tuto technologii, byla v 90. letech medicína. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019; Leo Gregurić, 2018)

Rok 2005 byl jeden z nejdůležitějších v novodobé historii 3D tisku. Na University of Bath vznikl projekt RepRap. Myšlenka spočívala ve schopnosti 3D tiskárny tisknout co nejvíce svých vlastních dílů. Projekt byl koncipován veřejně, tak aby bylo do spolupráce zapojeno co nejvíce nadšenců aditivních technologií. V roce 2008 projekt dosáhl úspěchu, když tiskárna RepRap 1.0 (viz obr. 2), známá také jako Darwin, vytiskla více než polovinu svých dílů. (Kloski, Kloski, 2017; The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019)



Obr. 2 – RepRap 1.0 “Darwin”  
(All3DP, 2016)

V roce 2008 dosáhl 3D tisk dalšího úspěchu díky aplikaci první vytisknuté protetické končetiny. Tento lékařský projekt zahrnoval všechny části biologické končetiny. V dnešní době s možností 3D skenování a 3D tiskem jsou pro pacienty vyrobené protetické pomůcky jednou z nejvýhodnějších variant. Vytisknuté protézy jsou stále více optimalizovány a přizpůsobeny morfologii pacienta. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019)

V roce 2009 patenty FDM spadly do veřejné sféry, čímž se otevřela cesta k široké vlně inovací v oblasti 3D tisku pomocí metody FDM. V důsledku toho došlo k výraznému

poklesu ceny stolních 3D tiskáren a technologie byla přístupnější široké veřejnosti. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019)

V roce 2010 se stal Urbee prvním 3D vytisknutým vozem (viz obr. 3). Jeho tělo bylo plně vytisknuto pomocí 3D tiskárny s dostatečným pracovním prostorem. Aktuálně se 3D vytisknutý vůz stává postupně realitou a aditivní výroba zabírá v automobilovém odvětví stále více prostoru. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today. 2019; Jan Horčík, 2013)



Obr. 3 – Urbee (Jan Horčík, 2013)

Lze vidět, že ve 21. století 3D tisk způsobuje revoluci ve velkých odvětvích, jako je automobilový průmysl, architektura, medicína, letectví nebo kosmonautika. Velkým předmětem v oblasti medicíny se stává 3D bioprinting, který je schopen vytvořit různé struktury tkání, jako například lidskou tkáň pro oběti popálenin nebo ledvinovou tkáň, kožní tkáň aj. Je to také způsob, jak vytvářet lidské orgány pro transplantaci. V roce 2013 lékaři úspěšně implantovali vytisknutou ledvinu zvířeti. Vzhledem k nízkému počtu dárců by 3D bioprinting mohl být vynikajícím, rychlým a život zachraňujícím řešením. (The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today, 2019)

3D tisk ve stavebnictví se rovněž zlepšuje. V nadcházejících letech by se mohl skutečně rozrůst. Projekty by byly hotovy dříve, levněji a s nižší spotřebou materiálu. Proces by snižoval provozní náklady podniku a zároveň by byl ekologický. Společnost Icon v roce 2018 vyvinula velkoformátovou 3D tiskárnu Vulcan II, s jejíž pomocí byl ve stejném roce vytisknut první dům v Austinu (viz obr. 4). Dům byl vytisknut za 24 hodin a náklady na výrobu byly 4 000 dolarů (přibližně 90 000 Kč). Společnost Icon se chystá ve spolupráci

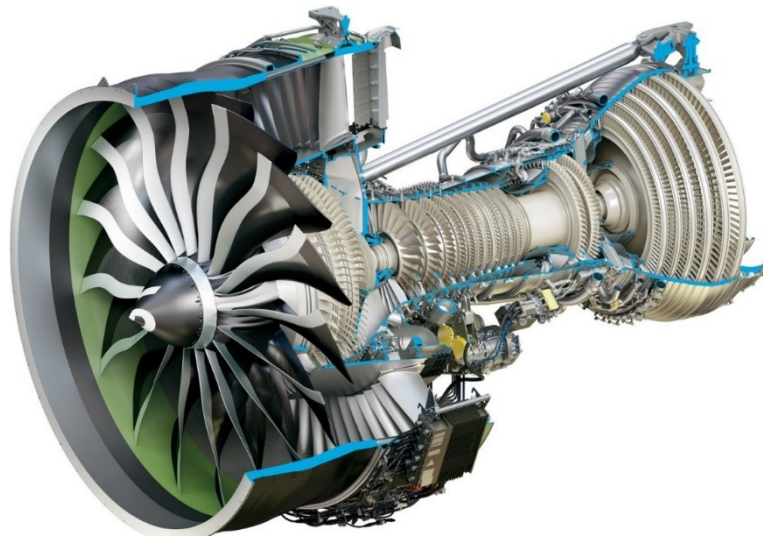
s organizací New Story postavit vesnici v regionu Latinské Ameriky pomocí 3D tiskárny Vulcan II. Nové domy budou určeny výhradně pro rodiny, jejichž příjem dosahuje maximálně 200 dolarů za měsíc. Budoucnost využití domů vytisknutých technologií 3D tisku je v oblastech s možným výskytem přírodních katastrof. (ICON PR, 2018; ICON PR, 2019; Tess Boissonneault, 2019)



Obr. 4 – 3D vytisknutý dům (ICON PR, 2018)

Důkaz, že je 3D tisk revoluční technologií, lze vidět i v náročném leteckém průmyslu, kde se klade vysoký důraz na kvalitu a spolehlivost. Na Northwesternské univerzitě vědci dokázali, že součástky letadel vyrobené technologií 3D tisku mohou snížit celkovou hmotnost až o 7 %. Díky úspoře odpadu, který v leteckém průmyslu představují kovy jako např. hliník, nikl nebo titan, se sníží negativní dopad na životní prostředí (při konvenční výrobě jedné součástky se spotřebuje až desetinásobek potřebného materiálu). Na začátku roku 2020 byl proveden první let Boeingu 777x s motory GE9X (viz obr. 5). Díky 10% snížení spotřeby paliva a emisí se Boeing 777x stal největším a nejvýkonnějším dvoumotorovým tryskovým letadlem. Každý motor GE9X obsahuje přes 300 vytisknutých dílů, které byly vyrobeny technologickým centrem GE Additive v Ohiu a týmem v Avio Aero v Itálii. Boeing 777x soutěží s Airbusem A350 XWB, který již obsahuje více než 1000 vytisknutých dílů, jež jsou vyráběny společností Stratasys. (3D tisk šetří náklady při výrobě letadel, 2020; Charles Alcock, 2014; Michael Molitch-Hou, 2020)





Obr. 5 – GE9X (Charles Alcock, 2014)

Technologie 3D tisku mají své zastoupení i v gastronomii, kde jsou nejrozšířenější v oblasti výroby čokolád a cukrovinek. Využívá se zde zejména technologie FDM. Další oblastí využití 3D tisku v gastronomii je bioprinting masa, kterým se zabývá společnost Redefine Meat založená roku 2018. Společnost si dala za úkol vytvořit novou technologii 3D tisku, která by dokázala vyrábět maso na míru, a to přesně podle sezónní poptávky a preferencí zákazníků. Společnost dělá pokroky a na konci roku 2019 bylo v izraelské luxusní restauraci servírováno jídlo s masem vyrobeným pomocí 3D tiskárny Redefine Meat 3D printer. Maso Redefine Meat se vyrábí ze třech zdrojů, a to z rostlinných bílkovin, tuku a vody. (Tia Vialva, 2019; Catherine Lamb, 2019)

3D tisk se hojně využívá i v kosmonautice. Používá se především ke snížení plýtvání a nákladů na výrobu raket přímo na zemi. Do budoucna jsou ovšem přednosti 3D tisku zřetelné a pravděpodobně se bude ve vesmíru testovat tisk potravin a objektů. Na stanici ISS v roce 2014 transportovali 3D tiskárnu společnosti Made In Space, která využívala technologii FDM. Tiskárna vyprodukovala mnoho prototypů z plastu. Vědci je následně analyzovali a porovnali se stejnými prototypy, které byly vytisknuty na zemi. Analýza odhalila, že mikrogravitace neměla žádný významný vliv, což dokázalo, že 3D tiskárna pracuje normálně i ve vesmíru. NASA se nyní chystá využít technologii 3D tisku k výrobě satelitů přímo na oběžné dráze. Měla by se o to postarat 3D tiskárna společnosti Made In Space. (Lee Mohon, 2014)



## 2 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Technologie 3D tisku, označovaná jako Rapid Prototyping (RP), patří mezi aditivní výrobní procesy. 3D tisk funguje na principu nanášení jednotlivých vrstev materiálů ve stejné tloušťce. Z těchto vrstev se postupně vytvoří výsledný objekt. 3D tisk nepotřebuje žádné nástroje související s výrobou, tudíž snižuje plýtvání časem při jejich potencionální výměně. Vlastnosti materiálu jsou generovány během procesu tisku, záleží zde na prostředí, zejména na vlhkosti a teplotě. Objekty není třeba upínat jako u subtraktivní výroby, ale jsou stavěny na tiskové desce (platformě). Proces 3D tisku potřebuje podpurné struktury, které je třeba po vytisknutí odstranit speciálními metodami. 3D modely se převádějí z CAD programu do formátu STL nebo 3MF a mohou být vytisknuty na libovolné 3D tiskárně z různých materiálů. (Gebhardt a Hötter, 2016; Srivatsan a Sudarshan, 2016; Kloski a Kloski, 2017)

RP se využívá v mnoha odvětvích, jako je automobilový a letecký průmysl nebo medicína. V průmyslu se technologie RP používá pro výrobu prototypů součástí. Díky ní je možné ověřit funkčnost součásti bez nutnosti výroby forem, jejichž výroba je nákladná. V medicíně se používá zejména pro výrobu implantátů a protéz. (Michal Vrbický, 2020)

### **Aditivní technologie lze rozdělit na několik skupin:**

- Aditivní technologie na bázi fotopolymerů  
Stereolitografie (SLA), Solid Ground Curing (SGC), Digital Light Processing (DLP) a Liquid Crystal Display (LCD).
- Aditivní technologie na bázi tuhých materiálů  
Fused Deposition Modeling (FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM), Multi Jet Modeling (MJM).
- Aditivní technologie na bázi práškových materiálů  
Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting (DMLS/SLM), Electronic Beam Melting (EBM).

## 2.1 Aditivní technologie na bázi fotopolymerů

Jedná se o technologie, které po vrstvách vytvrzují materiál v podobě tekutého polymeru pomocí ultrafialového světla. Model se tvoří v nádobě, která je naplněna polymerem. Patří zde technologie Stereolitografie (SLA), Solid Ground Curing (SGC), Digital Light Processing (DLP) a Liquid Crystal Display (LCD). (3D tisk fotopolymerizací, 2020; Solid Ground Curing (SGC), 2017)

### 2.1.1 Stereolitografie

SLA (viz obr. 6) je technologie 3D tisku na bázi fotopolymerů, která byla vyvinuta společností 3D Systems. Byl to první nejrozšířenější proces výroby prototypů. Patent SLA byl udělen v roce 1986 Charlesu Hullovi. Jde o proces založený na vytvrzování tekutého fotopolymeru (pryskyřice) za pomoci ultrafialového paprsku. Využívá se zejména v medicíně, automobilovém průmyslu a modelářství. Předností SLA je rychlost, přesnost a možnost rozměrného tisku v porovnání s ostatními metodami 3D tisku. Dodnes je jednou z nejpřesnějších aditivních technologií. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt a Hötter, 2016; Michal Vrbický, 2020; 3D tisk, principy, technologie, 2014.)

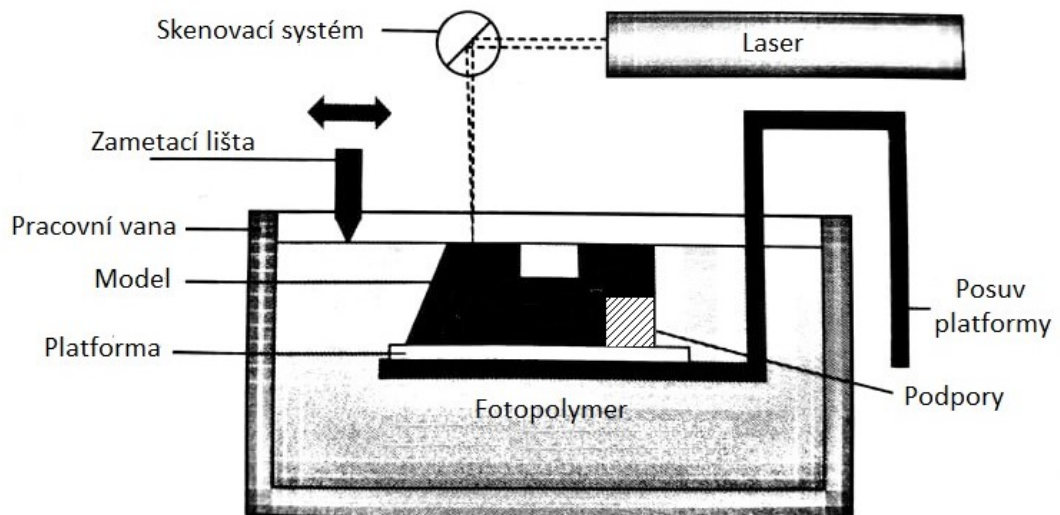
Jednotlivé řezy obsahují všechny potřebné informace pro danou vrstvu. Tloušťka vrstvy se pohybuje v intervalu 0,05 až 0,15 mm, záleží především na použitém zařízení. V nádobě s tekutou pryskyřicí je umístěna platforma, která slouží jako podstava vyráběného kusu. Platforma se spouští vždy po vytvrzení jednotlivých vrstev ultrafialovým paprskem o tloušťku dané vrstvy. Po dokončení procesu je přebytečná pryskyřice odčerpána a znovu použita. Zhotovený model je třeba omýt a k definitivnímu vytvrzení prototypu je model umístěn do UV komory. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt a Hötter, 2016; Michal Vrbický, 2020; 3D tisk, principy, technologie, 2014)

Výhody:

Velké množství materiálů, jedna z nejpřesnějších technologií 3D tisku, výroba objemných modelů, nevyžaduje obsluhu. (All3DP, 2019)

Nevýhody:

Vyžaduje podpory pro stabilizaci modelu při procesu výroby, dlouhý proces tvrzení polymeru, vysoké provozní náklady, post procesing. (All3DP, 2019)



Obr. 6 – Technologie SLA (Chua, Leong a Lim, 2010, s. 41)

### 2.1.2 Solid Ground Curing

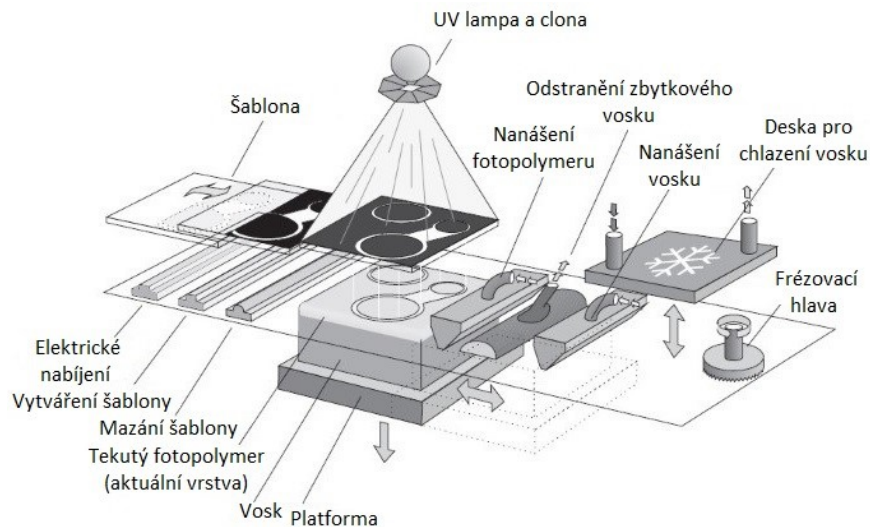
SGC patří mezi technologie 3D tisku, se kterými se lze setkat spíše vzácně. Technologie SGC (viz obr. 7) je poměrně složitá a časově náročná metoda 3D tisku. Byla vyvíjena izraelskou společností Cubital Ltd. Metoda SGC funguje na principu vytvrzování fotopolymerů pomocí UV světla. K tvorbě objektu je nutné vytvořit skleněné destičky (šablony), které představují jednotlivé vrstvy modelu. Šablony jsou v kontuře modelu potisknuty tonerem. Nad tenkou vrstvou polymeru se umístí šablona a pod nepotisknutou částí šablony působením UV lampy polymer ztvrdne. Nevytvrzený polymer je následně odsán a do prázdného prostoru je vstříknut roztavený vosk. Po ochlazení vosku se vrstva přebrousí a celý proces se opakuje až do dokončení modelu. (Gebhardt a Hötter, 2016; Dave, 2018)

Výhody:

Malé smrštění modelu během procesu chlazení, přesnost, nevyžaduje další podpory. (Dave, 2018)

Nevýhody:

Vysoké množství odpadu, nadměrné plýtvání, vysoké provozní náklady, velké rozměry zařízení, hlučnost. (Dave, 2018)



Obr. 7 – Technologie SGC (Dave, 2018)

### 2.1.3 Digital Light Processing a Liquid Crystal Display

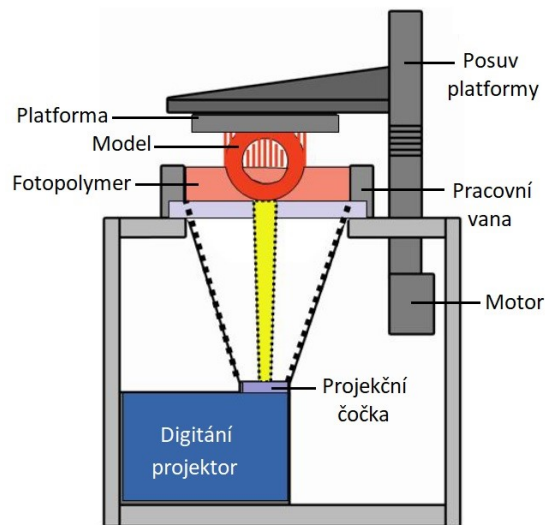
Technologie DLP (viz obr. 8) a LCD patří mezi nejnovější metody 3D tisku. Technologie využívají fotopolymery pro vytváření objektů a stejně jako u SLA staví vrstvu po vrstvě. U DLP se využívá ultradetailního projektoru, zatímco u LCD se používá obrazovka. Vrstvy se ozařují celé najednou, technologie jsou tedy rychlejší než SLA, kde se jednotlivé vrstvy vykreslují bod po bodu. Technologie DLP a LCD jsou schopné tisknout s přesností v mikrometrech. (Gebhardt a Hötter, 2016; DLP a LCD 3D tisk, 2020)

Výhody:

Vyšší rychlost v porovnání s technologií SLA, jednoduchá údržba cenová dostupnost, možnost tisku rozměrnějších modelů, přesnost. (Gebhardt a Hötter, 2016; DLP a LCD 3D tisk, 2020)

Nevýhody:

Vysoké provozní náklady, vyžaduje podpory pro stabilizaci modelu při procesu výroby, nutný post-processing. (Gebhardt a Hötter, 2016; DLP a LCD 3D tisk, 2020)



Obr. 8 – Technologie DLP

(Gebhardt a Hötter, 2016, s. 129)

## 2.2 Aditivní technologie na bázi tuhých materiálů

Řadí se zde technologie 3D tisku využívající materiál v tuhé fázi. Materiály jsou obvykle plasty ve formě drátu, svitku nebo fólie. Patří zde metody Laminated Object Manufacturing (LOM), Multi Jet Modeling (MJM) nebo Fused Deposition Modeling (FDM). (Chua, Leong a Lim, 2010)

### 2.2.1 Laminated Object Manufacturing

Aditivní technologie LOM byla vyvíjena společností Helisys. Patent byl udělen roku 1988. Technologie využívá materiálů, které jsou v podobě tenké fólie. Používaným materiálem je většinou papír, plast nebo keramika. V některých případech se můžeme setkat i s kovovými materiály, jejichž řezání pomocí laseru je ovšem značně komplikované. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt a Hötter, 2016)

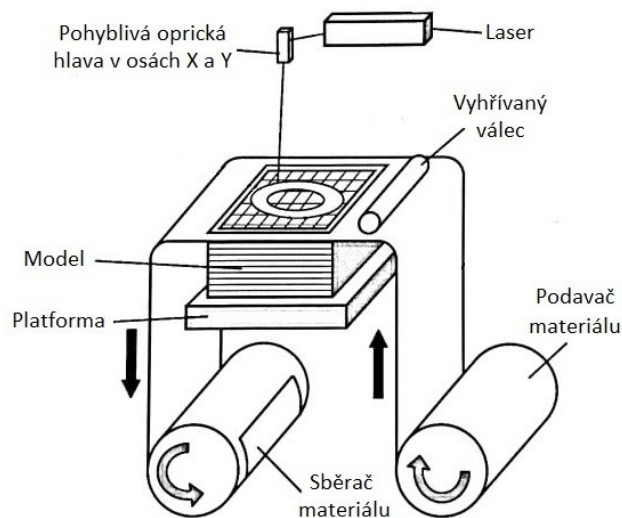
U technologie LOM (viz obr. 9) se 3D model tvoří nanášením jednotlivých fólií, které mají na jedné straně vrstvu lepidla. Každá vrstva se po nanesení přejede vyhřívaným válcem, čímž se přilepí k předchozí vrstvě. Následně je pomocí laseru každá nalepená vrstva vyřezána v konturu modelu a přebytečný materiál rozřezán na čtverce. Laser je nastavený tak, aby prořezal pouze vrchní vrstvu fólie. Platforma se následně posune o tloušťku fólie dolů a proces se opakuje do vytvoření 3D modelu. Prototypy vytisknuté technologií LOM mohou být následně subtraktivně obráběny (vrtáním, frézováním, soustružením a podobně). (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt a Hötter, 2016)

Výhody:

Rychlost, nízké provozní náklady, technologie nevyžaduje dodatečné podpory, nevznikají deformace během výrobního procesu. (Srivatsan a Sudarshan, 2016)

Nevýhody:

Nízká jakost, pevnost je omezená použitým pojivem, metoda není vhodná pro výrobu funkčních dílů, nadměrné plýtvání – přebytečný materiál se nedá znovu použít. (Srivatsan a Sudarshan, 2016)



Obr. 9 – Technologie LOM

(Chua, Leong a Lim, 2010, s. 156)

### 2.2.2 Multi Jet Modeling

MJM je aditivní výrobní proces, který pro tisk termoplastů využívá tiskovou hlavu s vysokým počtem lineárně uspořádaných trysek. Termoplasty se v tiskové hlavě roztaví a poté se polymerizují pomocí UV světla. UV lampy, umístěny přímo na tiskové hlavě, vytvrzují polymery ihned po nanesení na tiskovou desku. Intenzita UV světla je nastavena tak, aby nejvyšší vrstva zcela nevytvrkla, čímž se dosáhne stabilního spojení mezi překrývajícími se vrstvami. U složitých tvarů vyžaduje MJM stavbu podpor, které se konstruují pomocí podpůrného materiálu, ten je po vytisknutí modelu oddělen. (Chua, Leong a Lim, 2010; Material Jetting (MJ), 2020)

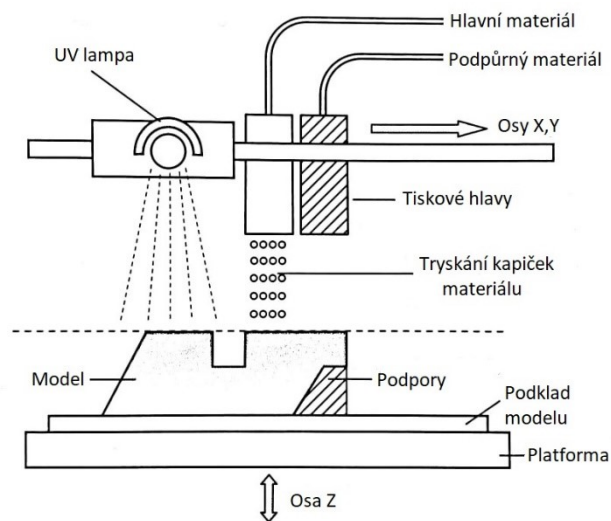
Technologie MJM (viz obr. 10) se využívá především pro výrobu prototypů, ale i funkčních prototypů nebo odlitků. (Chua, Leong a Lim, 2010; Material Jetting (MJ), 2020)

Výhody:

Rychlost, rozměrová stabilita, velmi jemné detaily, složitost nezvyšuje provozní náklady, ekonomická výroba. (Chua, Leong a Lim, 2010; Material Jetting (MJ), 2020)

Nevýhody:

Omezená volba materiálu, vyžaduje stavbu podpory, nutný post-processing, rozměrově omezená výroba (Chua, Leong a Lim, 2010; Material Jetting (MJ), 2020).



Obr. 10 – Technologie MJM  
(Chua, Leong a Lim, 2010, s. 169)

### 2.2.3 Fused Deposition Modeling

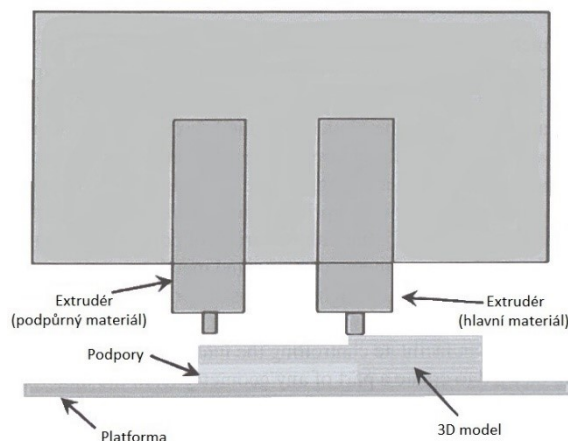
Metoda FDM je nejrozšířenější technologie 3D tisku. Je vhodná pro výrobu prototypů, ale také funkčních dílů. Technologie byla vyvíjena společností Stratasys od roku 1988. FDM využívá zejména termoplastické materiály polyamid (PA), polyethylen (PE), polylaktid (PLA), polykarbonát (PC), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polyfenylsulfon (PPSF), směs PC-ABS, ale také polykarbonát lékařské kvality, vosk, kovy a keramiku. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt a Hötter, 2016)

Aditivní technologie FDM využívá pro stavbu modelu zpravidla jedné tiskové trysky (extrudéru). V posledních letech byla vyvinuta zařízení se dvěma tryskami (viz obr. 11), kdy jedna tryska slouží pro tisk termoplastu a druhá tryska staví podpory z pomocného materiálu, který se snadněji oddělí od finálního modelu, aniž by to významně narušilo jakost povrchu. Při této technologii je termoplastický materiál taven v extrudéru a nanášen v tenkých

vrstvách na tiskovou desku. V zásadě je materiál zahříván o 1 °C nad bodem tání. Materiál se „svaží“ s předchozí vrstvou téměř okamžitě po nanesení. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt a Hötter, 2016)

Výhody: Cenová dostupnost, výroba funkční dílů, odpad tvoří pouze podpory. (Srivatsan a Sudarshan, 2016)

Nevýhody: Vyžaduje stavbu podpor, dlouhá doba výroby, omezená přesnost. (Srivatsan a Sudarshan, 2016)



Obr. 11 – Technologie FDM

(Srivatsan a Sudarshan, 2016, s. 9)

## 2.3 Aditivní technologie na bázi práškových materiálů

Tyto technologie se vyznačují tím, že využívají materiály v podobě jemného prášku, které se vytvrzují slinováním (spékáním). Jedná se většinou o kovové, keramické nebo plastové materiály. Mezi nejznámější technologie využívající práškové materiály patří Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) / Selective Laser Melting (SLM) a Electronic Beam Melting (EBM). (3D tisk spékáním práškové vrstvy, 2020)

### 2.3.1 Selective Laser Sintering

Aditivní technologie SLS je nejvíce využívána v odvětvích automobilového a leteckého průmyslu, kde slouží především k výrobě forem a nástrojů, které slouží pro výrobu kovových, plastových nebo keramických výrobků, ale také funkčních dílů. Tato metoda umožňuje vytvářet složité díly, které jsou často odolnější a poskytují lepší funkčnost ve srovnání s jinými stávajícími a přednostně používanými aditivními výrobními procesy. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; SLS (Selective Laser Sintering), 2020; Chua, Leong a Lim, 2010)



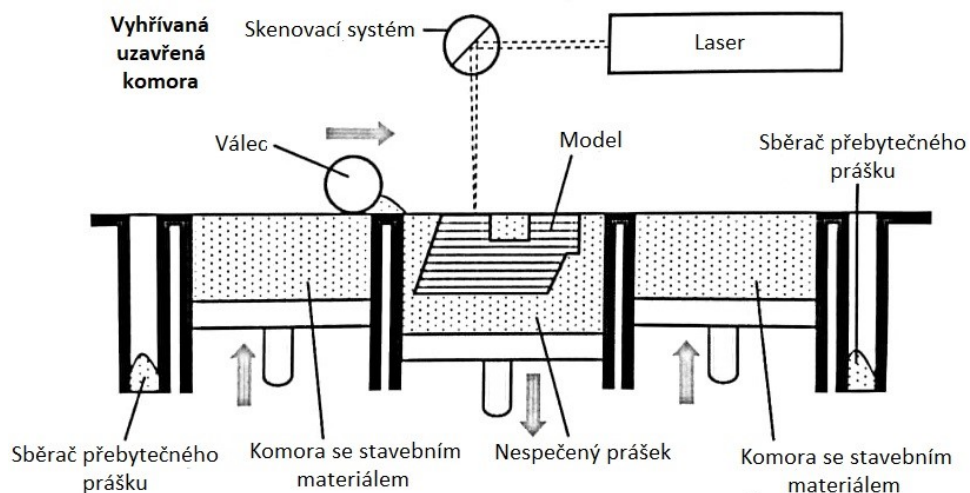
Proces SLS (viz obr. 12) využívá k výrobě dílů výkonný CO<sub>2</sub> laser, který spéká práškové materiály v podobě kovů, plastů nebo keramiky. Na platformu je nanášena pomocí válce rovnoměrná vrstva práškového materiálu. Následně se pomocí laseru materiál zahřívá, a to těsně pod bodem tání v definovaných prostorech 3D modelu, čímž se prášek slinuje a vytváří pevnou strukturu. Slinovaný materiál tvoří součást a neslinovaný prášek zde zůstává a slouží jako podpora pro další vrstvu. Po kompletním slinování vrstvy se stůl posune o její výšku dolů a proces se opakuje do zhotovení modelu. Po dokončení výroby se nespečený prášek recykluje. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; SLS (Selective Laser Sintering), 2020; Chua, Leong a Lim, 2010)

Výhody:

Nevyžaduje další podpory, výtisk je obklopen nespečeným materiálem. Výroba složitých funkční a pevných dílů. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; SLS (Selective Laser Sintering), 2020; Chua, Leong a Lim, 2010)

Nevýhody:

Nákladné čištění stroje a výtisku od jemného prášku, post-processing, vysoká cena 3D tiskáren, drahý materiál, vysoké provozní náklady. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; SLS (Selective Laser Sintering), 2020; Chua, Leong a Lim, 2010)



Obr. 12 – Technologie SLS (Chua, Leong a Lim, 2010, s. 202)

### 2.3.2 Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting

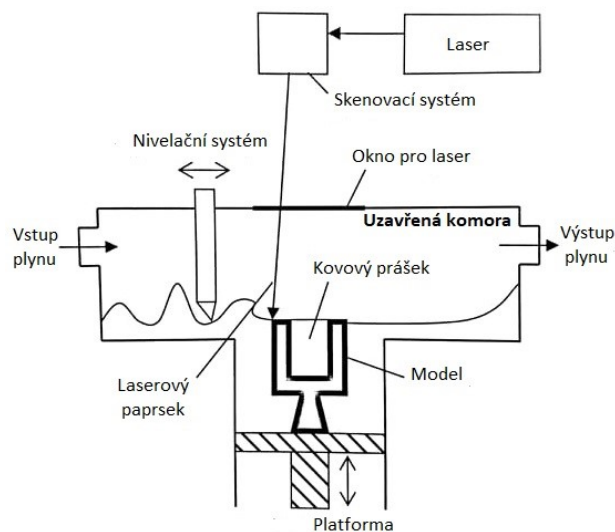
Tato technologie je podobná technologii SLS (viz kapitola 2.3.1). Rozdíl mezi technologií SLS a DMLS/SLM je, že nedochází ke slinování prášku, ale k jeho úplnému roztavení. Výhoda spočívá v tom, že výtisk není tvořen jednotlivými částicemi spečenými dohromady, ale díky úplnému roztavení vzniká homogenní výrobek s lepšími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Tisknout je možné z různých materiálů, které jsou v podobě jemného prášku. Nejpoužívanější materiály jsou měď, hliník, chirurgická ocel, kobalt, chrom, titan, platina nebo wolfram. DMLS/SLM (viz obr. 13) je metoda 3D tisku vhodná zejména pro profesionální využití v automobilovém a leteckém průmyslu. Vyznačuje se vysokými cenami 3D tiskáren. Na českém trhu se s nimi lze potkat ojediněle. Slouží pro tisk funkčních dílů, forem a nástrojů v různorodé výrobě. (Gebhardt a Hötter, 2016; SLM (Selective Laser Melting), 2020)

Výhody:

Nevyžaduje další podpory, výtisk je obklopen nespečeným materiálem. Výroba unikátních struktur, vysoce odolných funkčních a pevných dílů. Lze používat slitiny, minimální odpad. (SLM (Selective Laser Melting), 2020)

Nevýhody:

Výrobek lze tisknout pouze z jednoho materiálu. Vysoké ceny tiskáren, materiálu a provozních nákladů. Omezená velikost, doba tisku. Nevhodná technologie pro velkovýrobu. (SLM (Selective Laser Melting), 2020)



Obr. 13 - Technologie DMLS/SLM

(Chua, Leong a Lim, 2010)

### 2.3.3 Electronic Beam Melting

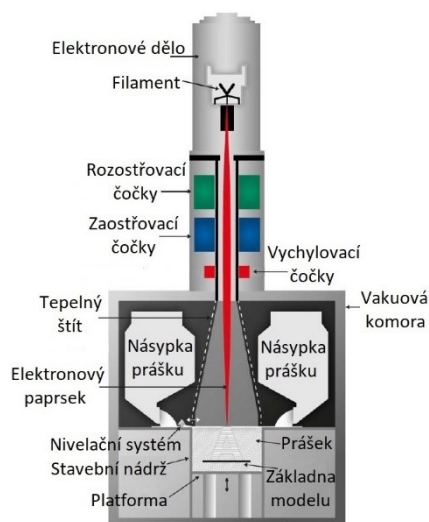
Metoda EBM (viz obr. 14) je relativně inovativní proces aditivní výroby, který byl vyvinut švédskou společností Arcam. Tisk probíhá ve vakuové komoře. Materiál v podobě kovového prášku se taví vrstvu po vrstvě na teplotu až 2000 °C pomocí elektronového paprsku. Technologie je vhodná zejména pro výrobu součástek z drahých materiálů, jako je např. titan nebo niob. Výtisky z EBM tiskáren se využívají pouze pro profesionální použití, a to zejména v implantologii a kosmonautice. Další využití je v leteckém a automobilovém průmyslu. (Chua, Leong a Lim, 2010; Srivatsan a Sudarshan, 2016; EBM (Electron Beam Melting), 2020)

Výhody:

Vysoká přesnost a odolnost výtisků, vysoká kontrola nad porézností výtisku, vlastnosti materiálů, rychlost tisku. (Chua, Leong a Lim, 2010; EBM (Electron Beam Melting), 2020)

Nevýhody:

Extrémně vysoké ceny tiskáren, velmi nákladný proces, omezený výběr materiálů, nutný post-processing. Proces probíhá ve vakuové komoře. (Chua, Leong a Lim, 2010; EBM (Electron Beam Melting), 2020)



Obr. 14 – Technologie EBM  
(Gebhardt a Hötter, 2016)

## 2.4 Shrnutí vybraných 3D tiskových technologií

Technologie 3D tisku lze rozdělit do několika skupin, a to podle typu materiálů a jeho vstupní podoby. Vybrané technologie, jimiž se autor zabýval (viz kap. 2.1 až 2.3), jsou shrnuty v tab. 1.

Tab. 1 – Shrnutí vybraných aditivních technologií (vlastní zpracování)

Technologie	Aditivní materiály	Členění
SLA	Fotopolymery	Na bázi fotopolymery v tekuté podobě.
SGC	Fotopolymery	
DLP/LCD	Fotopolymery	
FDM	Termoplasty, vosk, kovy, keramika	Na bázi tuhých materiálů ve formě drátů, svitků nebo fólie
LOM	Papír, fólie, plast, keramika, kovy	
MJM	Termoplasty	
SLS	Kovy, plasty, keramika	Na bázi práškových materiálů
DMLS	Kovy	
EBM	Kovy, speciální materiály	

### 3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

Mechanické vlastnosti materiálů kvantitativně hodnotí jejich chování při působení vnějších mechanických sil. Při působení vnějších sil vzniká mechanické zatěžování materiálu, které způsobuje jeho deformaci nebo porušení. Mezi základní mechanické vlastnosti patří pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost. Mezi další mechanické vlastnosti patří např. tvrdost, odolnost proti únavě a odolnost proti tečení. (Vojtěch, 2010; Machek, 2014; Macek a Zuna, 1996)

#### 3.1 Pružnost

Pružnost, někdy označovaná jako elasticita, je schopnost vykazovat pružnou (elastickou) deformaci materiálu. Při namáhání materiálu se mění jeho objem, který se po ukončení namáhání vrátí do původního stavu. K vyhodnocení pružnosti se obvykle využívá modul pružnosti, mez pružnosti a energie elastické napjatosti. Pružnost lze stanovit pomocí Hookova zákona, který vyjadřuje vztah mezi napětím a relativním prodloužením. (Vojtěch, 2010; Macek a Zuna, 1996)

#### 3.2 Pevnost

Pevnost je odpor materiálu, který brání jeho deformaci a porušení vnějšími silami. Pevnost vyjadřuje míru mezního zatížení, které je materiál schopen přenést. Podle způsobu namáhání je rozlišována pevnost v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu. (Vojtěch, 2010; Macek a Zuna, 1996)

#### 3.3 Plasticita

Plasticita je schopnost materiálu zachovat trvalé deformace, které jsou vyvolané působením vnějších sil. Plasticita vyvolává změnu tvaru materiálu, objem zůstává původní, není zde dosaženo porušení materiálu. Měřítkem plasticity bývá velikost poměrné trvalé deformace před porušením. (Vojtěch, 2010; Macek a Zuna, 1996)

#### 3.4 Houževnatost

Houževnatost je vlastnost materiálu, která vykazuje odolnost vůči porušení před dosažením mezního stavu, a je tedy závislá na pevnosti a plasticitě. Měřítkem je nejčastěji práce spotřebovaná na deformaci a porušení. Někdy se využívá lomové houževnatosti, což je

materiálová charakteristika, která vyjadřuje kvantitativně odolnost materiálu proti vyvolání porušení v případě, že v materiálu je přítomna trhлина. (Vojtěch, 2010; Macek a Zuna, 1996)

### 3.5 Zkoušení mechanických vlastností

Pro stanovení mechanických vlastností materiálu se využívá normalizovaných mechanických zkoušek, které mají jednotné a přesně definované zkušební podmínky. Mechanické zkoušky slouží k definování a porovnávání vzájemných vlastností materiálů. Podle Macka a Zuny, (1996, s. 74) je lze klasifikovat dle různých kritérií:

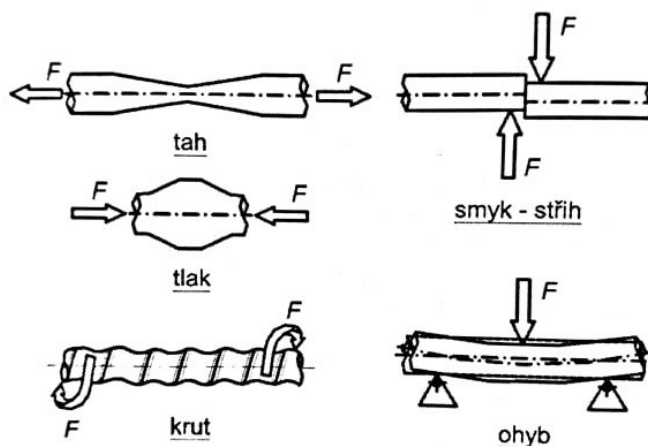
1. Podle způsobu zatěžování – na zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem a stříhem (viz obr. 15).
2. Podle stavu napjatosti – na zkoušky při jednoosé napjatosti (nejčastěji jednoosý tah), při dvojosé i trojosé napjatosti (zkoušky vrubovaných těles).
3. Podle časového průběhu zátěžné síly

Zkoušky statické – při těchto zkouškách je materiál namáhán pomalu, působení síly se zvyšuje rovnoměrně do okamžiku porušení zkušební vzorku.

Dynamické zkoušky – působení síly se mění rázem nebo v krátkém časovém úseku.

Únavové zkoušky – mechanické vlastnosti se zkoušejí dlouhodobě za předepsaných podmínek, obvykle až do porušení zkušební vzorku. Pro jednotlivé druhy materiálů bývají tyto zkoušky rozdílné.

4. Podle fyzikálních podmínek – na zkoušky za různých teplot a v různých prostředích.

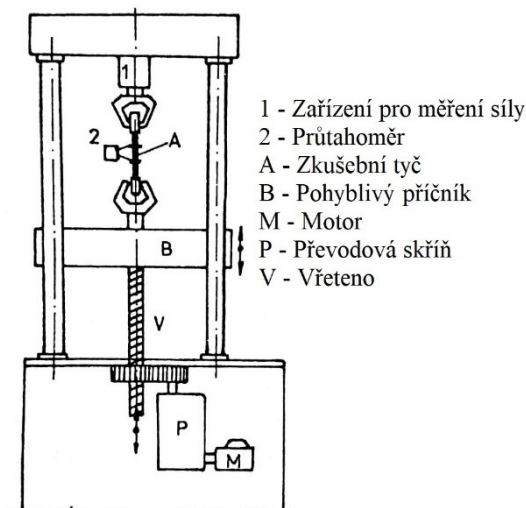


Obr. 15 – Schéma základních způsobů namáhání:

$F$  [N] – síla (Machek, 2014, s. 40)

## 4 MECHANICKÁ ZKOUŠKA STATICKÁ TAHEM

Jednou z nejstarších a nejpoužívanějších zkoušek materiálů hodnotící jejich mechanické vlastnosti je tahová zkouška. Provádí se na zařízení, které se nazývá trhací stroj (viz obr. 16). Při zkoušce tahem je materiál namáhán silou, dokud nedojde k jeho destrukci přetržením. (Jarušek, 1989; Schätz a Vondráček, 1988)



Obr. 16 – Trhací stroj  
(Ptáček, 2001, s. 434)

### 4.1 Zkušební vzorky a princip tahové zkoušky

Zkušební vzorky používané pro tuto zkoušku se nazývají zkušební tyče. Mohou mít nejrůznější tvary průřezů, ve většině případů jsou ovšem kruhové nebo obdélníkové (viz obr. 17). Jejich rozměry jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 527. Při zkoušce tahem je zkušební tyč vystavena jednoosému namáhání v tahu, až do doby, kdy dojde k jeho porušení (destrukci zkušební vzorku). Zkušební tyč je upnuta rovnoběžně s osou trhacího stroje v jeho čelistech. Nejčastěji se zkouška tahem provádí za pokojových teplot (18 až 24 °C), ovšem v některých případech je možné tahovou zkoušku provádět i za vyšších teplot nebo naopak nižších. Cílem zkoušky je stanovení napěťových a deformačních parametrů zkoušeného materiálu. (Machek, 2014; Jarušek, 1989; Schätz a Vondráček, 1988)

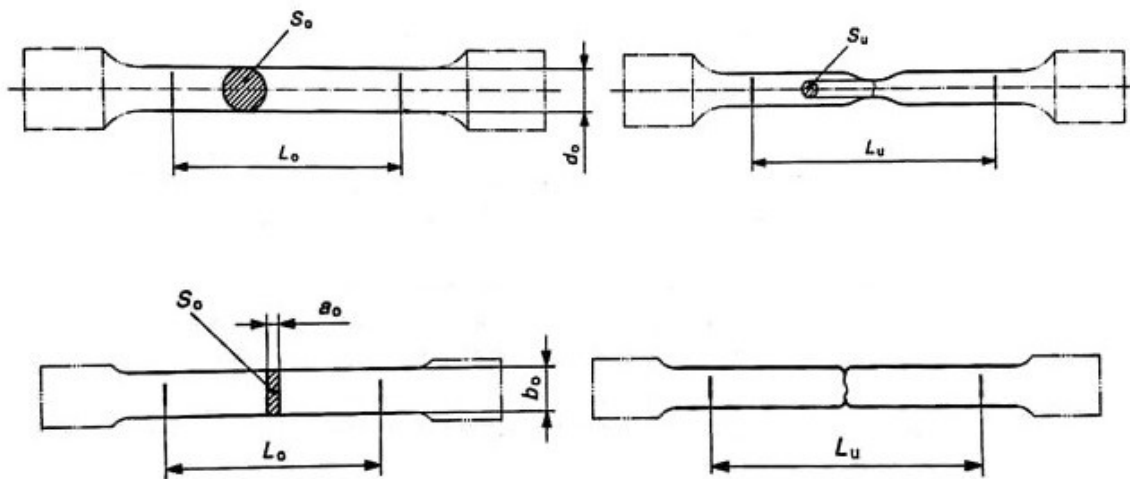
Před zahájením zkoušky je důležité na zkušební tyč vyznačit úsek, na kterém se budou zjišťovat hodnoty potřebné pro výpočet mechanických parametrů zkoušeného materiálu.

Úsek se nazývá počáteční měřená délka  $L_0$  (viz obr. 17), která je závislá na příčném průřezu zkušební tyče  $S_0$  (viz obr. 17) a vypočítá se ze vztahu:

$$L_0 = k * \sqrt{S_0} [mm] \quad (1)$$

- $L_0 [mm]$  je počáteční měřená délka zkušební tyče,
- $k [-]$  je součinitel proporcionality,
- $S_0 [mm^2]$  je plocha počátečního průřezu zkušební tyče. (Machek, 2014)

**Součinitel proporcionality**  $k$  může mít hodnotu 11,3 nebo 5,65. Součinitel proporcionality 11,3 se používá pouze v případech, kdy  $L_0$  je menší než 20 mm. Vypočtená délka  $L_0$  se zaokrouhluje na nejbližší násobek 5 mm. (Machek, 2014)



Obr. 17 – Zkušební tyče: levá část znázorňuje tyč před zkouškou, pravá část po zkoušce – původní průřezy a měřené délky jsou označeny  $S_0$  a  $L_0$ , konečné  $S_u$  a  $L_u$ . (Machek, 2014, s. 41)

## 4.2 Pracovní diagram

Při zvyšování tahové síly  $F$  trhacím strojem dochází k prodloužení zkušební tyče. Původní měřená délka  $L_0$  se prodlouží o  $\Delta L$  na okamžitou délku  $L_i$ , která se vypočítá ze vztahu:

$$L_i = L_0 + \Delta L [mm] \quad (2)$$

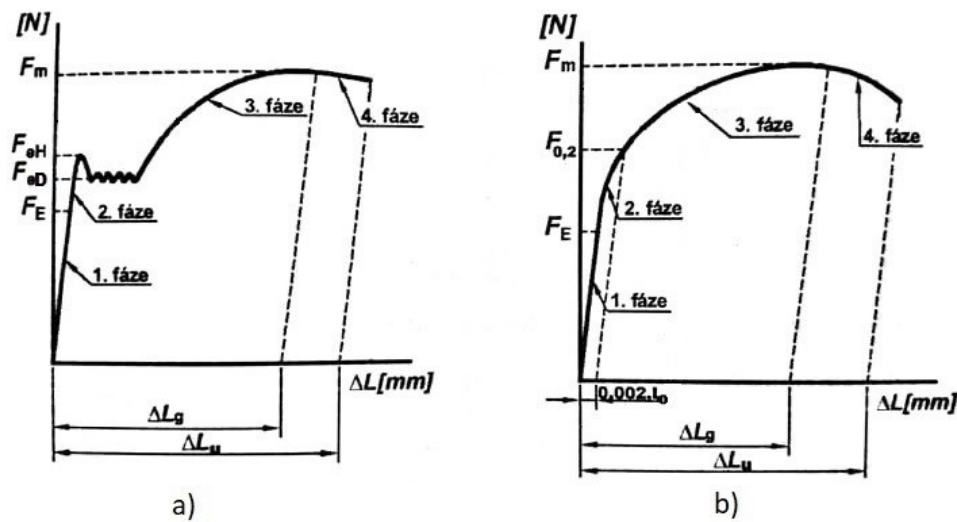
- $L_i [mm]$  je okamžitá délka zkušební tyče,
- $L_0 [mm]$  je počáteční měřená délka zkušební tyče,
- $\Delta L [mm]$  je okamžité prodloužení zkušební tyče. (Machek, 2014)



Na základě snímaných dat trhacím strojem, pracovní diagram znázorňuje grafickou závislost prodloužení  $\Delta L$  na vyvozené síle  $F$ . V průběhu zkoušky se současně mění původní průřez zkušební tyče  $S_0$  na okamžitý  $S_i$  (viz kap. 4.3.1 Smluvní tahový diagram). (Machek, 2014)

Machek, 2014, s. 43 uvedl dva základní tvary pracovních diagramů (viz obr. 18):

- Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu.
- Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu.



Obr. 18 – Základní typy pracovních diagramů (Machek, 2014, s. 43)

Každý pracovní diagram lze rozdělit na čtyři úseky, které odpovídají čtyřem fázím tahové zkoušky. (Machek, 2014, s. 43-46)

### 1. Fáze (oblast pružných deformací)

Vzrůstající zatěžovací silou dochází k přímo úměrnému prodlužování zkušební tyče. V diagramech (viz obr. 18) lze vidět, že tato fáze má tvar přímky. Zkušební tyč se deformuje elasticky a po odlehčení prodloužení  $\Delta L$  zmizí a tyč se vrátí do původního stavu. Konec 1. fáze je ohraničen silou na mezi úměrnosti  $F_E$ , která se v běžné praxi nezjišťuje, protože je téměř nepozorovatelná a u většiny polymerních materiálů se nevyskytuje. V tomto případě pracovní diagram začíná 2. fází. (Machek, 2014)

### 2. Fáze (oblast od meze úměrnosti do meze kluzu)

Machek, 2014, s. 44 ve své publikaci uvedl, že konec 2. fáze je ohraničen silou na mezi kluzu, po jejím překročení dochází ke vzniku trvalé deformace, která pokračuje dvěma způsoby:

- a) Je dosaženo síly, při které vzniká prodleva nebo zlom, nazývá se síla na výrazné mezi kluzu  $F_e$ . V případě větších rozdílů v úseku prodlevy se rozlišuje na horní mez kluzu  $F_{eH}$  (největší zaznamenaná síla prodlevy) a dolní mez kluzu  $F_{eD}$  (nejnižší hodnota prodlevy). Lze vidět na diagramu s výraznou mezi kluzu (viz obr. 18/a).
- b) Dochází k plynulé deformaci zkušební tyče. Lze pozorovat na diagramu s nevýraznou mezi kluzu (viz obr. 18/b). V tomto případě je 2. fáze ukončena dosažením smluvní trvalé deformace s velikostí 0,2 % původní měřené délky  $L_0$ , která se značí  $F_{p0,2}$  (smluvní mezi kluzu), po překročení této síly dochází k trvalým deformacím.

### 3. Fáze (oblast rovnoměrných trvalých deformací)

V této fázi dochází k rovnoměrné deformaci. Po dosažení meze kluzu se zkušební tyč vlivem vzrůstajícího zatížení rovnoměrně a trvale deformuje po celé své délce do doby poklesu zatěžující síly. Po jejím překročení se vytvoří na zkušební tyči zúžení (krček). Největší zatížení se značí  $F_m$  (viz obr. 18/b). (Machek, 2014)

### 4. Fáze (oblast nerovnoměrných trvalých deformací)

Dochází k poklesu zatěžující síly, postupným zužováním průřezu lze jednoznačně identifikovat krček. Tyč se prodlužuje výhradně v zúžené oblasti i při klesající zátěžové síle, a to z toho důvodu, že vlivem prudce zmenšujícího průřezu tyče skutečné napětí v oblasti krčku stoupá. V této fázi dochází k přetržení zkušební tyče, čímž je tahová zkouška ukončena. (Machek, 2014)

## 4.3 Výpočet základních normalizovaných parametrů

V této kapitole se autor zabýval základními parametry, jež jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 527 a slouží ke stanovení mechanických vlastností polymerních materiálů pomocí zkoušky statické tahem.

### 4.3.1 Smluvní tahový diagram

Pracovní diagramy (viz obr. 18) neumožňují porovnání mechanických vlastností jednotlivých materiálů. Z toho důvodu jsou přepočítávané na tahové napětí a poměrné

prodloužení. Vlivem zatěžování vzniká tahové napětí, které se označuje jako skutečné napětí  $\sigma$ , vypočítá se ze vztahu:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

- $\sigma$  [MPa] je skutečné tahové napětí,
- $F$  [N] je zatěžující síla,
- $S$  [mm<sup>2</sup>] je aktuální průřez vzorku. (Jarušek, 1989; Machek, 2014)

**Poměrné prodloužení**  $\varepsilon$  se vypočítá pomocí vztahu:

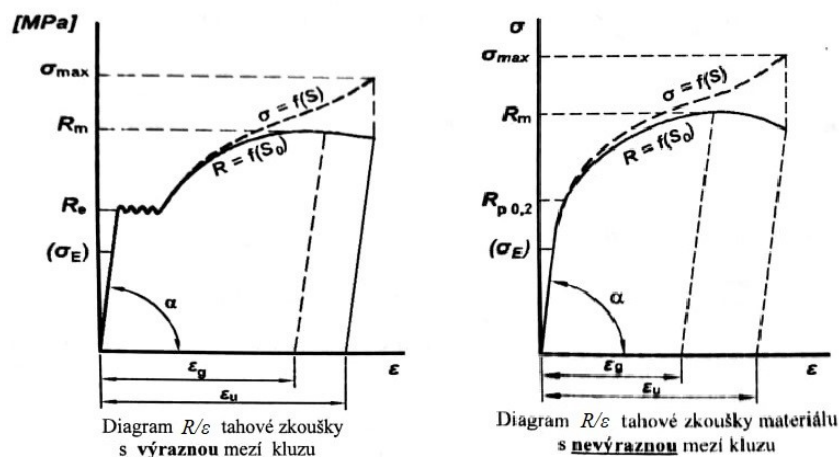
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [%]} \quad (4)$$

- $\varepsilon$  [%] je poměrné prodloužení,
- $\Delta L$  [mm] je změna délky zkušební tyče,
- $L_0$  [mm] je počáteční měřená délka zkušební tyče. (Jarušek, 1989; Machek, 2014)

K výpočtu skutečného napětí je nutné znát okamžitý průřez zkušební tyče  $S_i$ . Z důvodů, že se skutečné průřezy v průběhu tahové zkoušky neustále mění, je celosvětově dohodnuto užívání tzv. smluvního napětí  $R$ , které se vypočítá jako poměr příslušné síly  $F$  k ploše průřezu zkušební tyče  $S_0$ . Smluvní napětí vychází ze vztahu:

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

- $R$  [MPa] je smluvní napětí.
- $F$  [N] je zatěžující síla.
- $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční průřez zkušební tyče. (Jarušek, 1989; Machek, 2014)



Obr. 19 – Diagramy  $R/\varepsilon$  (Machek, 2014, s.47)

Vyjádřením závislosti smluvního napětí  $R$  na poměrném prodloužení  $\sigma$  lze vytvořit smluvní tahový diagram  $R/\varepsilon$  (viz obr. 19). V průběhu tahové zkoušky se skutečné napětí  $\sigma$  od smluvního napětí  $R$  stále více odlišuje ( $\sigma > R$ ). (Machek, 2014)

#### 4.3.2 Hookův zákon a modul pružnosti

V oblasti pružné deformace vyjadřuje Hookův zákon vztah mezi skutečným napětím  $\sigma$  a poměrným prodloužením  $\varepsilon$  (viz vztah 7). Lze jej formulovat ve tvaru:

$$\sigma = \frac{F}{S_i} = E * \frac{\Delta L}{L_0} = E * \varepsilon [MPa] \quad (6)$$

- $\sigma [MPa]$  je skutečné tahové napětí,
- $S_i [mm^2]$  je okamžitý průřez zkušební tyče,
- $F [N]$  je zatěžující síla.
- $E [MPa]$  je modul pružnosti v tahu (viz vztah 6),
- $\Delta L [mm]$  je celkové prodloužení,
- $L_0 [mm]$  je počáteční měřená délka,
- $\varepsilon [\%]$  je poměrné prodloužení (viz vztah 3). (Machek, 2014; Vojtěch, 2010)

Hodnota modulu pružnosti v tahu  $E$  je konstantou, která se označuje jako směrnice přímky a vyjadřuje ji vztah:

$$E = \tan \alpha [MPa] \quad (7)$$

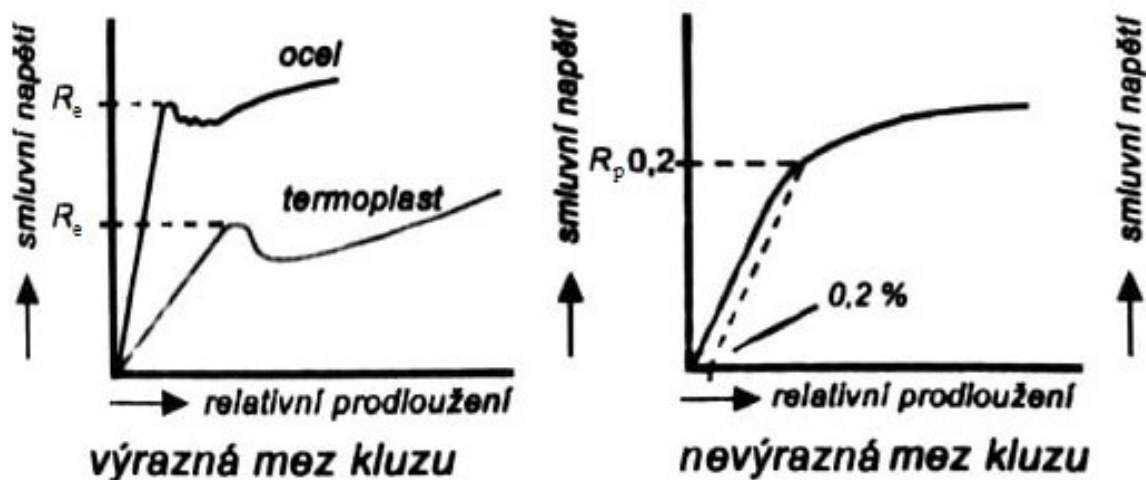
- $E [MPa]$  je modul pružnosti v tahu,
- $\alpha$  je úhel svírající přímku s osou poměrného prodloužení. (Machek, 2014)

Modul pružnosti je důležitá materiálová vlastnost charakterizující tuhost materiálu. Materiály, které se vyznačují vysokým modulem pružnosti, se velmi neochotně deformují, (např. sklo, keramika), oproti tomu materiály s nízkým modulem pružnosti lze deformovat působením poměrně malých vnějších sil. Nejnižšími moduly pružnosti se vyznačují elastomery. Patří zde např. kaučuk (viz obr. 23). (Machek, 2014; Vojtěch, 2010)

#### 4.3.3 Mez kluzu

Mez kluzu je nejdůležitější mechanická vlastnost materiálu. Je to smluvní napětí, po jehož překročení dochází k trvalým deformacím materiálu, do té doby platí Hookův zákon o elasticitě. Zpravidla se označuje jako nevýrazná mez kluzu  $R_{p0,2}$  nebo výrazná mez kluzu  $R_e$ . Mez kluzu se uvádí pouze u materiálů, které jsou schopné trvalé deformace (kovy

a termoplasty), u ostatních materiálu s nevýraznou mez kluzu nelze přesně určit, z toho důvodu se počítá z předepsaných hodnot smluvní meze kluzu (nejčastěji 0,2 %). Srovnání výrazné a nevýrazné meze kluzu lze vidět viz obr. 20. (Machek, 2014; Vojtěch, 2010)



Obr. 20 – Výrazná a nevýrazná mez kluzu (Vojtěch, 2010, s. 107)

Vztah výrazné meze kluzu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa] \quad (8)$$

- $R_e [MPa]$  je poměr síly na výrazné meze kluzu,
- $F_e [N]$  je síla na výrazné meze kluzu,
- $S_0 [mm^2]$  je plocha původního průřezu zkušební tyče. (Machek, 2014)

U výrazné meze kluzu se v některých případech rozlišuje na horní a dolní mez kluzu:

1. Horní mez kluzu:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} [MPa] \quad (9)$$

2. Dolní mez kluzu:

$$R_{eD} = \frac{F_{eD}}{S_0} [MPa] \quad (10)$$

Vztah nevýrazné mezi kluzu:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (11)$$

- $R_{p0,2} [MPa]$  je poměr síly na výrazné mezi kluzu,
- $F_{p0,2} [N]$  je síla na výrazné mezi kluzu,
- $S_0 [mm^2]$  je plocha původního průřezu zkušební tyče. (Machek, 2014)

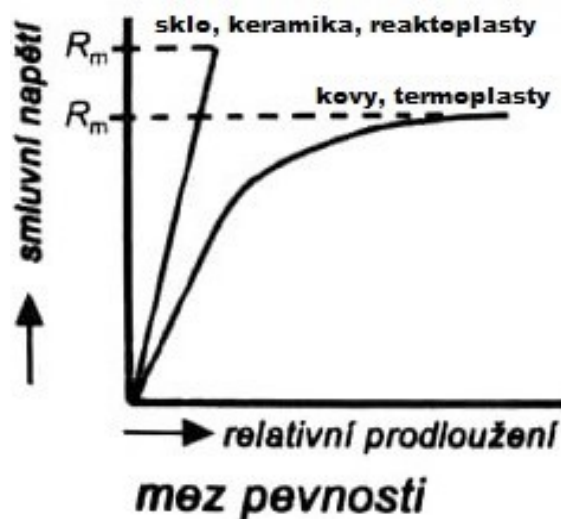
#### 4.3.4 Mez pevnosti

Mez pevnosti (pevnost) je největší možné napětí v materiálu při natahování, kterému materiál jako celek odolává, aniž by se porušil (viz obr. 21). U křehkých materiálů, jako jsou např. reaktoplasty, se častěji zkouší pevnost v ohybu a tlaku. Pevnosti plastu jsou poměrně malé (cca 100 MPa), kdežto kovy dosahují pevností až 3000 MPa. (Machek, 2014; Vojtěch, 2010)

Výpočet meze pevnosti vychází ze vztahu:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (12)$$

- $R_m [MPa]$  je maximální dosažené smluvní napětí,
- $F_m [N]$  je maximální dosažená síla,
- $S_0 [mm^2]$  je plocha původního průřezu zkušební tyče. (Machek, 2014)



Obr. 21 – Mez pevnosti

(Vojtěch, 2010, s. 107)

#### 4.3.5 Tažnost

Tažnost ( $A$ ) je vlastností materiálů, která uvádí maximální poměr trvalého prodloužení  $\varepsilon_u$  vyjádřeného v %. Vypočtené hodnoty tažností se zaokrouhlují na desetiny %. U polymerů a kovů ukazuje tažnost na jejich tvařitelnost, kdežto u reaktoplastů, litin, skla nebo keramiky udává jejich křehkost. (Machek, 2014; Vojtěch, 2010)

Výpočet tažnosti vychází ze vztahu:

$$A = 100 * \varepsilon_u = 100 * \frac{\Delta L_u}{L_0} [\%] \quad (13)$$

- $A$  [%] je tažnost,
- $\varepsilon_u$  [%] je poměrné trvalé prodloužení (viz kap. 4.3.1),
- $\Delta L_u$  [mm] je absolutní přírůstek původní měřené délky po přetržení,
- $L_0$  [mm<sup>2</sup>] je počáteční měřená délka zkušební tyče. (Machek, 2014)

V případě použití zkušební tyče se součinitelem proporcionality  $k = 5,65$  se tažnost označuje písmenem  $A$ . Při použití zkušební tyče se součinitelem  $k = 11,3$  se pak toto číslo přidává k tažnosti jako index ( $A_{11,3}$ ), (Machek, 2014)

V případě, že při měření není použit průtahoměr, konečná délka tyče je zjištěna přiložením obou polovin tyčí k sobě a absolutní přírůstek  $\Delta L_u$  se vypočítá ze vztahu:

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \text{ [mm]} \quad (14)$$

- $\Delta L_u$  [mm] je absolutní přírůstek původní měřené délky po přetržení,
- $L_u$  [mm] je konečná délka zkušební tyče,
- $L_0$  [mm] je počáteční délka zkušební tyče. (Machek, 2014)

## 5 CHARAKTERISTIKA POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO 3D TISK METODOU FDM

V této kapitole jsou uvedeny zejména plasty, kterými se autor zabýval v praktické části své bakalářské práce. Kapitola je zaměřena na plasty, které se využívají pro metodu 3D tisku FDM. Tato technologie využívá materiály, které jsou ve formě drátů o průměrech (1,75 mm; 2,85 mm nebo 3 mm), nazývají se filameny. Lze je koupit v různých barvách a odstínech (viz obr. 22), ve většině případů jsou navinuty na cívce.

Volba správného materiálu má vliv na mechanické vlastnosti výtisku. Z tohoto důvodu je důležité volit materiál dle jeho budoucího využití. K tomu jsou potřeba patřičné znalosti vlastností materiálů. (Schätz a Vondráček, 1988)



Obr. 22 – Filameny (3D tiskové struny PLA (Polylactic acid))

### 5.1 Polymerní materiály (plasty)

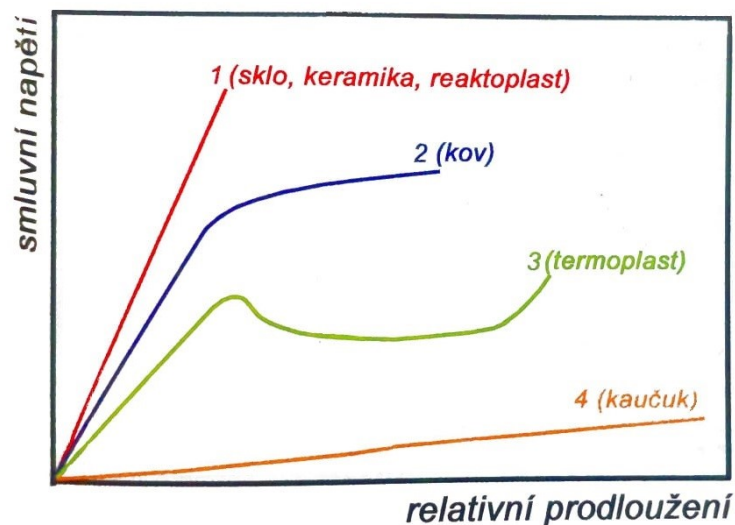
Plasty jsou materiály, jejichž základní složku tvoří polymer. Mimo polymerů mohou plasty obsahovat i jiné přísady, které slouží k úpravě jejich vlastností. Jsou to zejména plniva, koloranty, stabilizátory a změkčovadla. Mezi typické vlastnosti plastů patří nízká hustota, která se pohybuje mezi 900 až 1500 kg.m<sup>-3</sup>. V porovnání s jinými materiály mají nízkou pevnost v tahu (viz obr. 23), která se pohybuje mezi 20 až 130 MPa. Polymerní materiály jsou ve většině případů izolanty a vyznačují se nízkým modulem pružnosti. Jejich vlastnosti jsou silně závislé na teplotě. Plasty se velmi dobře tvarují, vynikají odolností proti korozi a mají nízký koeficient tření. V průběhu zpracovatelského procesu vždy prochází minimálně



jednou plastickým stavem. Kromě malé hustoty je velkou výhodou polymerů proti sklům, kovům nebo keramice jejich relativně nízká energetická náročnost výroby, ovšem v porovnání s ostatními materiály jsou obtížně recyklovatelné. (Vojtěch, 2010; Jarušek, 1989, s. 3; Macek a Zuna, 1996, s. 8,170)

Schätz a Vondráček, 1988, s. 3 rozdělil polymerní materiály do tří skupin na:

1. Elastomery – polymery, které se silně deformují při působení nižšího napětí, než je tomu u jiných materiálů (viz obr. 23). Po uvolnění napětí se vrátí do původního tvaru, mají tzv. kaučukovou elasticitu. Obvykle to jsou přírodní a syntetické kaučuky.
2. Termoplasty – polymery, které lze opakovaně tvářit nebo tvarovat zahřátím, aniž by to měnilo jejich základní vlastnosti. Při ochlazení přecházejí zpět do tuhého stavu. U aditivní technologie FDM jsou termoplasty nejpoužívanějším materiálem.
3. Reaktoplasty – polymery, které lze obvykle vytvrzovat teplem. Působením tepla nejprve měknou, v této fázi je lze tvářit nebo tvarovat. Delším působením dochází k jejich vytvrzení, po kterém jsou reaktoplasty nerozpustné, netavitelné a tvrdé.



Obr. 23 – Srovnání tahových diagramů různých materiálů (Vojtěch, 2010, s. 99)

### 5.1.1 PLA (polylaktid – polymléčná kyselina)

PLA je nejvhodnější materiál používaný pro 3D tisk, a to zejména díky jeho tiskovým vlastnostem. Na rozdíl od ostatních materiálů, jako jsou např. ABS nebo ASA, u materiálu PLA nedochází k deformacím během chladnutí modelu, z tohoto důvodu je výsledný model rozměrově i tvarově velmi přesný. 3D tisk tímto materiálem je velmi

jednoduchý a rychlý. Jednotlivé vrstvy materiálu se dobře spojují, díky tomu je materiál vhodný i pro tenkostěnné modely. PLA se vyrábí z biologických zdrojů (nejčastěji z kukuřičného škrobu), tudíž je šetrný k životnímu prostředí. Materiál je do určitých teplot velmi pevný, tvrdý, odolný a pružný. Nevýhodou je nízký bod tání, materiál začíná měknout už kolem 60 °C. Při dlouhodobém vystavení UV záření PLA degraduje a křehne, z tohoto důvodu se nedoporučuje pro venkovní použití. (3D tiskové struny PLA, © 2020; PLA, © 2020)

Teplota tisku se pohybuje mezi 185 až 235 °C.

Teplota extruderu se pohybuje mezi 115 až 210 °C.

Teplota podložky může být bez výhřevu až do 55 °C (čím vyšší teplota, tím lepší přilnavost).

### 5.1.2 ABS (akrylonitrilbutadienstyren)

Mezi nejpoužívanější 3D tiskové materiály patří ABS. Jedná se o amorfnní termoplastický průmyslový kopolymer, který je odolný proti mechanickému opotřebení. ABS materiály vynikají svými vlastnostmi, jako je tvrdost, houževnatost a pružnost. Kromě toho jsou odolné proti kyselinám, hydroxidům, uhlovodíkům, olejům a tukům. Používají se k výrobě funkčních dílů a nástrojů pro komerční i běžné použití. Výhodou ABS je odolnost proti nízkým i vysokým teplotám ( $\pm 100$  °C), materiál je zdravotně nezávadný. Nevýhodou je tepelná roztažnost, kvůli které v průběhu tisku může docházet k různým deformacím. Pro snížení možnosti vzniku deformací modelu, je během tisku nutné vyhřívat podložku (ideálně na teplotu kolem 100 °C). Při tisku přesných, nebo rozměrných modelů se využívají tiskárny, které mají uzavřený vyhřívaný tiskový prostor. (3D tiskové struny ABS © 2020; ABS, © 2020)

Teplota tisku se pohybuje mezi 220 až 240 °C.

Teplota extruderu se pohybuje mezi 210 až 230 °C.

Teplota podložky se pohybuje mezi 90 až 110 °C.

### 5.1.3 ASA (akrylonitrilstyrenakryl)

Termoplastický materiál ASA byl vytvořen jako alternativa k ABS. Je velmi pevný, tvrdý a odolný vůči povětrnostním vlivům i UV záření. Používá se zejména pro tisk funkčních modelů, které jsou využívány ve venkovních prostředích. Výhodou tohoto materiálu je mechanická odolnost proti opotřebení, odolnost proti teplotě (až 105 °C), tuhost, dobré

vrstvení tisknutého modelu, odolnost proti povětrnostním vlivům a zachování fyzikálních vlastností. Kvalita 3D tisku materiálem ASA je stejná jako u ABS materiálu, z tohoto důvodu je ASA materiál vhodný i pro tisk složitých detailů. Odolnost ASA materiálu vůči stárnutí a degradaci je až desetkrát větší, než je tomu u materiálu ABS. Nevýhodou tohoto materiálu je stejně jako u ABS možnost vzniku deformací modelu v průběhu tisku při chladnutí. K minimalizaci vzniku deformací je vhodné tisknout ve vyhřívaném uzavřeném prostoru. (3D tiskové struny ASA © 2020; ASA, © 2020)

Teplota tisku se pohybuje mezi 250 až 255 °C.

Teplota extruderu se pohybuje mezi 220 až 250 °C.

Teplota podložky se pohybuje mezi 60 až 110 °C.

#### **5.1.4 PET-G (polyethylentereftalát-1,4-cyklohexylendimethylentereftalát)**

Materiál PET-G je transparentní amorfni kopolyester, který vyniká svou pevností, stálostí, tepelnou roztažností, odolností proti teplotám (až  $\pm 100$  °C), odolností vůči kyselinám a rozpouštědlům. Jedná se o upravený materiál PET (běžně používaný materiál pro výrobu lahví a obalů na potraviny). Znak „G“ znamená modifikovaný glykol, který se přidává jako přísada během polymerace. Materiál má lepší mechanické vlastnosti než jeho základní forma, vyznačuje se větší houževnatostí, odolností proti nárazu a lepšími tiskovými vlastnostmi, než je tomu u jeho základní formy. Vytisknutý předmět je možné tepelně tvarovat, nebo leštit ohněm. Materiál je vhodný pro tisk modelů, u kterých je požadována vysoká světelná propustnost. PET-G materiál není toxický, je možné ho využít i jako obalový materiál pro potraviny a je recyklovatelný. V porovnání s materiály jako je ABS nebo ASA je u materiálu PET-G nižší riziko vzniku deformací během tisku. (3D tiskové struny PETG © 2020; PET, PET-G, PET-G/CF, © 2020)

Teplota tisku se pohybuje mezi 220 až 260 °C.

Teplota extruderu se pohybuje mezi 200 až 235 °C.

Teplota podložky se pohybuje mezi 45 až 90 °C.

## 6 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části této bakalářské práce se autor zabýval historií, současností a budoucností 3D tisku, kde rozebral zejména historii vzniku jednotlivých aditivních technologií, jejich současnost a jejich možnosti budoucího uplatnění.

Další část se zabývá vybranými technologiemi 3D tisku. V této části je stručně popsán princip jednotlivých technologií. Autor zde také uvádí jejich uplatnění, porovnání s ostatními metodami nebo jejich výhody a nevýhody.

V teoretické části jsou dále rozebrány základní mechanické vlastnosti materiálů (pružnost, pevnost, houževnatost nebo plasticita) a zkoušení mechanických vlastností. Podrobně je zde popsána mechanická zkouška statická tahem, zkušební vzorky a aditivní materiály, které byly testovány v praktické části této bakalářské práce.

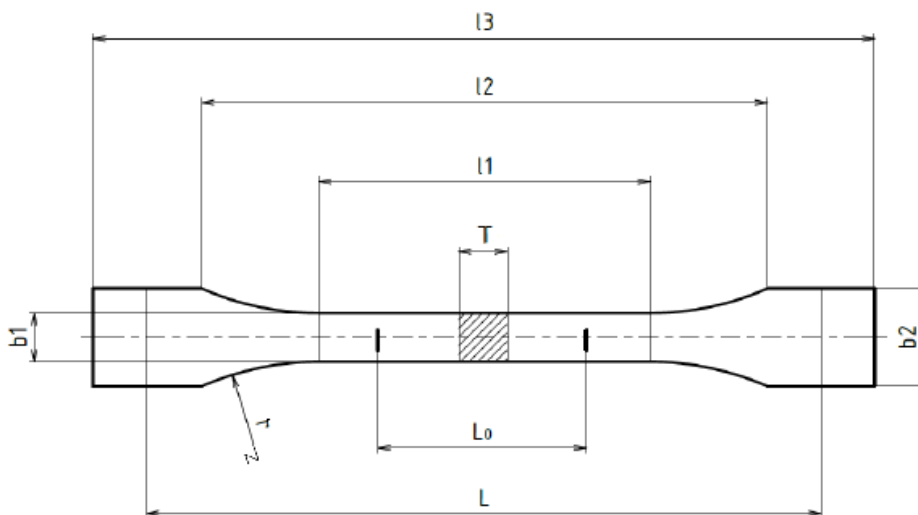
## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 NÁVRH A VÝROBA NORMALIZOVANÝCH VZORKŮ

V této kapitole je rozebrán návrh normalizovaných vzorků v CAD programu a jejich zhotovení pomocí 3D tiskárny.

### 7.1 Návrh normalizovaných vzorků

Návrh zkušební tyče byl stanoven dle normy ČSN EN ISO 527-2, která určuje podmínky pro zkoušení polymerních materiálů a stanovení jejich mechanických vlastností. Norma ČSN EN ISO 527 je určena pro zkoušení normalizovaných vzorků vyrobených odléváním, lisováním, vstřikováním a vytlačováním. Z důvodu, že neexistuje norma pro zkoušení mechanických vlastností zkušebních vzorků vyrobených aditivní technologií, byla použita tato norma. Pro stanovení mechanických vlastností vybraných materiálů byla zvolena zkušební tyč typu 1BA (viz obr. 24), její rozměry jsou uvedeny v tab. 2. Norma stanovuje, že pokud není z jakýchkoliv důvodů možné použít standartní zkušební tyče typu 1A a 1B, lze použít zmenšené zkušební tyče typu 1BA, 1BB, 5A nebo 5B. Hlavním důvodem výběru zkušební tyče 1BA byla úspora materiálu, která vedla ke snížení nákladnosti tisku a úspoře času. (ČSN EN ISO 527-1, 2012; ČSN EN ISO 527-2, 2012)



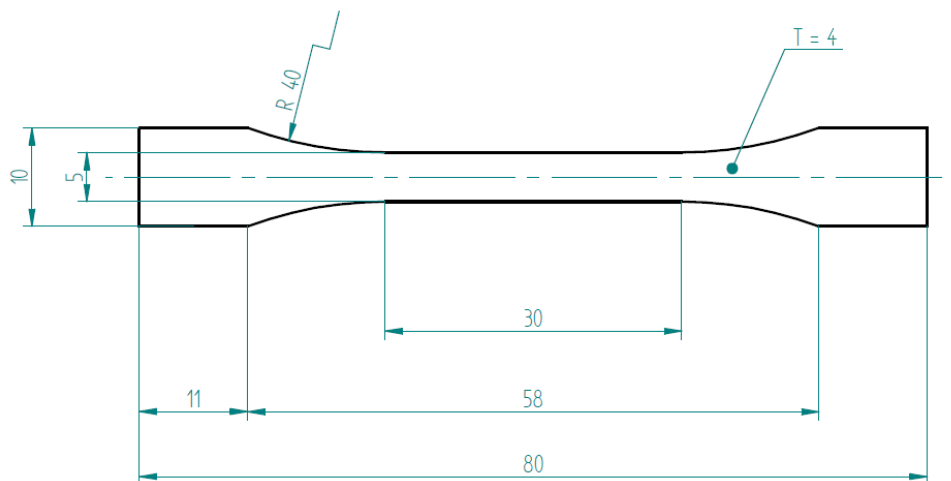
Obr. 24 – Zkušební tyč 1BA (ČSN EN ISO 527-2, 2012)

Tab. 2 – Rozměry zkušební tyče 1BA (ČSN EN ISO 527-2, 2012)

Parametr	Název	Rozměr (mm)
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi trhacího stroje	$l_2 + 0$ až 2
$L_0$	Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$
$l_1$	Délka zúžené části	$30,0 \pm 0,5$
$l_2$	Vzdálenost mezi osazeními	$58 \pm 2$
$l_3$	Celková délka	$\geq 75$
$b_1$	Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$
$b_2$	Šířka upínací části	$10,0 \pm 0,5$
T	Tloušťka	$\geq 2$
r	Poloměr mezi upínací a zúženou částí	$\geq 30$

## 7.2 Tvorba modelu zkušební tyče

Pro 3D tisk je nutné vytvořit model ve vhodném CAD program. Pro tisk zkušebních vzorků (viz kap. 7.1) byl použit CAD program Autodesk Inventor, který umožňuje převod modelu do formátu STL, což je univerzální formát používaný pro 3D tisk. Model (viz obr. 25) byl vymodelován pomocí funkcí vysunutí a zaoblení o rozměrech, které umožňuje norma ČSN EN ISO 527-2:2012 (viz tab. 2).



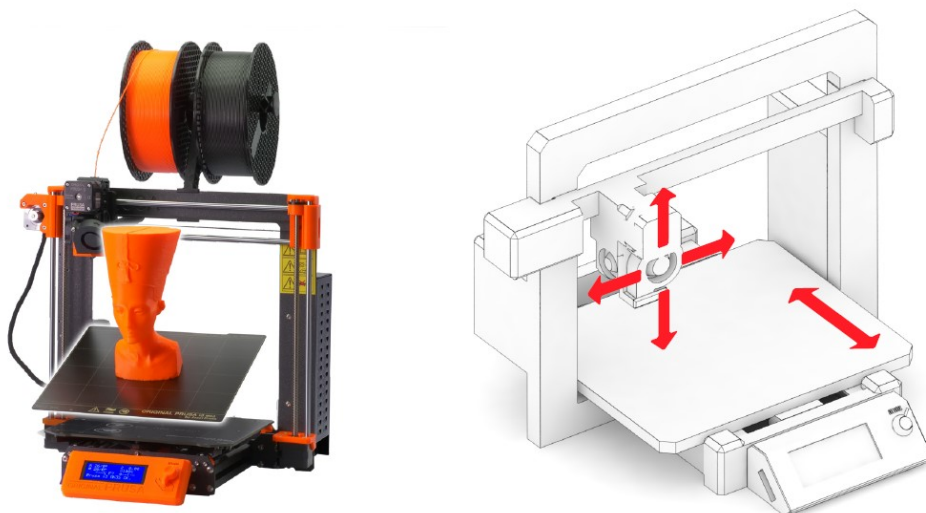
Obr. 25 – Model zkušební tyče (vlastní zpracování)

### 7.3 Tisk zkušebních tyčí

Tisk zkušebních tyčí probíhal na 3D tiskárně Prusa i3 MK3, což je 3D tiskárna, která funguje na principu kartézského souřadnicového systému (viz obr. 26). Tato tiskárna umožňuje 3D tisk modelů aditivní technologií FDM. Technické parametry tiskárny Prusa i3 MK3 jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 – Technické parametry Prusa i3 MK3 (3D tiskárna Original Prusa i3 MK3, 2020)

Technické parametry	
Pracovní prostor	11,025 dm <sup>3</sup> (250 x 210 x 210 mm)
Výška vrstvy	0,05 – 0,35 mm
Maximální rychlost posuvu	200 mm/s
Průměr extrudéru	0,4 mm
Tloušťka filamentu	1,75 mm
Teplota tisku	120 až 300 °C
Datový vstup	USB, SD CARD
Vyhřívaná podložka	ANO
Uzavřený prostor tisku	NE



Obr. 26 – Prusa i3 MK3 (Průša a Bach, 2019, s. 12)



### 7.3.1 Zkoušené materiály

Pro tahovou zkoušku byly použity materiály PLA, ABS, ASA a PET-G od několika výrobců. Pro lepší přehlednost byla vytvořena tab. 4, která obsahuje přehled všech materiálů od vybraných výrobců. Od každého materiálu bylo vytisknuto pět vzorků, které se následně zkoušely mechanickou zkouškou statickou tahem.

Tab. 4 – Seznam aditivních materiálů (vlastní zpracování)

Materiál	Výrobce	Označení zkušebních tyčí (kód)
PLA	Filament-PM	PLA-PM 1 až PLA-PM 5
	Prusament	PLA-PR 1 až PLA-PR 5
	Fillamentum	PLA-FI 1 až PLA-FI 5
ABS	Devil Design	ABS-DD 1 až ABS-DD 5
	Prusament	ABS-PR 1 až ABS-PR 5
ASA	Filament-PM	ASA-PM 1 až ASA-PM 5
	Devil Design	ASA-DD 1 až ASA-DD 5
	Fillamentum	ASA-FI 1 až ASA-FI 5
PET-G	Filament-PM	PET-G-PM 1 až PET-G-PM 5
	Prusament	PET-G-PR 1 až PET-G-PR 5
	Spectrum	PET-G-SP 1 až PET-G-SP 5

### 7.3.2 Nastavení tiskových parametrů

Vytvořené 3D modely určené k tisku jsou standardně ve formátu STL. Tento formát je ovšem pro 3D tiskárnu nesrozumitelný. Soubor STL je nutno převést do formátu G-code, a to pomocí softwaru známého jako Slicer, jehož výstupem je soubor ve formátu G-code. Tento formát obsahuje rozřezání modelu na požadované výšky jednotlivých vrstev, cesty pohybů hlavy extrudéru, nastavení teploty tisku, nastavení teploty podložky, nastavení chlazení a další.

K vytvoření G-code zkušebních tyčí byl použit Slicer PrusaSlicer, kde se nastavily jednotlivé tiskové parametry (viz tab. 5).

Tab. 5 – Tiskové parametry (vlastní zpracování)

<b>Tiskové parametry</b>				
<b>Materiál</b>	<b>PLA</b>	<b>ABS</b>	<b>ASA</b>	<b>PET-G</b>
Průměr trysky	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Tloušťka vrstvy	0,05 mm	0,05 mm	0,05 mm	0,05 mm
Procento výplně	100 %	100 %	100 %	100 %
Vnitřní vzor výplně	Výchozí	Výchozí	Výchozí	Výchozí
Rychlost tisku	200 mm/s	200 mm/s	200 mm/s	200 mm/s
Teplota tisku	200 °C	250 °C	250 °C	240 °C
Teplota podložky	60 °C	75 °C	80 °C	75 °C
Chlazení	NE	ANO	ANO	ANO

## 8 PROVEDENÍ MECHANICKÉ ZKOUŠKY STATICKÉ TAHEM

Mechanická zkouška statická tahem byla provedena na trhacím zařízení Zwick Z100 (viz obr. 27). Prostřednictvím tohoto zkušebního stroje lze provádět zkoušky jakýchkoliv materiálů při pokojové teplotě do maximální zkušební síly 100 kN. Stroj je vybaven čelistmi, které slouží pro uchycení plochých zkušebních tyčí. Pomocí datového kabelu jsou měřená data zasílána do počítače, kde jsou zpracovávána softwarem testXpert od společnosti Zwick.

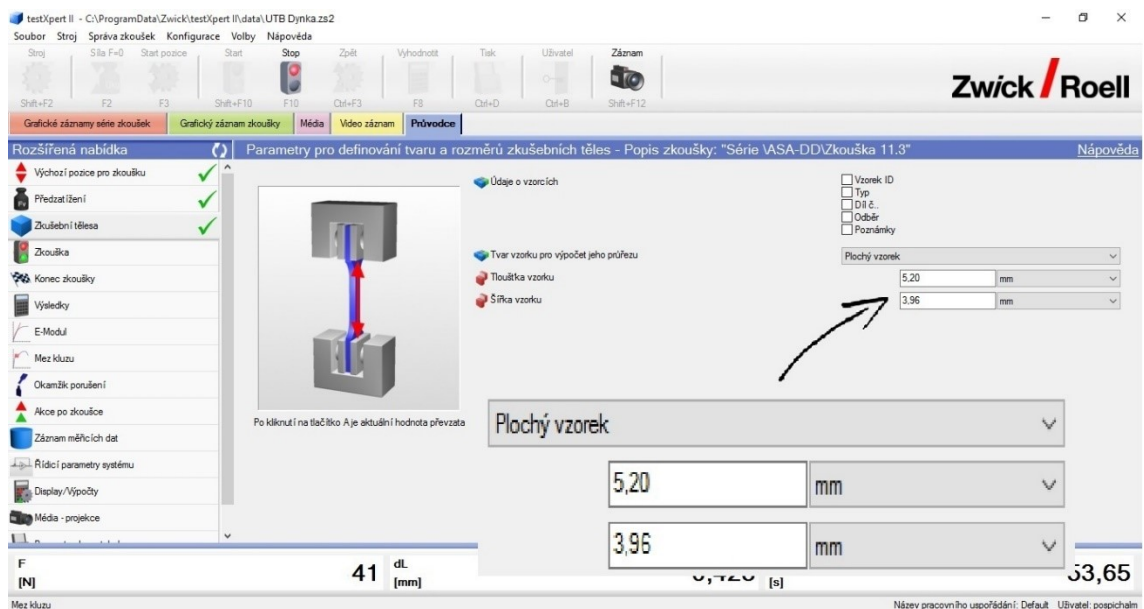


Obr. 27 – Trhací zařízení (vlastní zpracování)

Software testXpert je program, ve kterém dochází k nastavení vstupních parametrů zkoušky. Mezi vstupní parametry patří např. rychlost zatěžování, počáteční vzdálenost upínacích čelistí a výchozí rozměry zkušební tyče. Program slouží také pro vyhodnocení zkoušky a jednotlivých normalizovaných parametrů, které slouží ke stanovení mechanických vlastností. Patří zde mez pevnosti, tažnost, mez kluzu a další (viz kap. 4.3).

## 8.1 Nastavení vstupních parametrů v programu testXpert

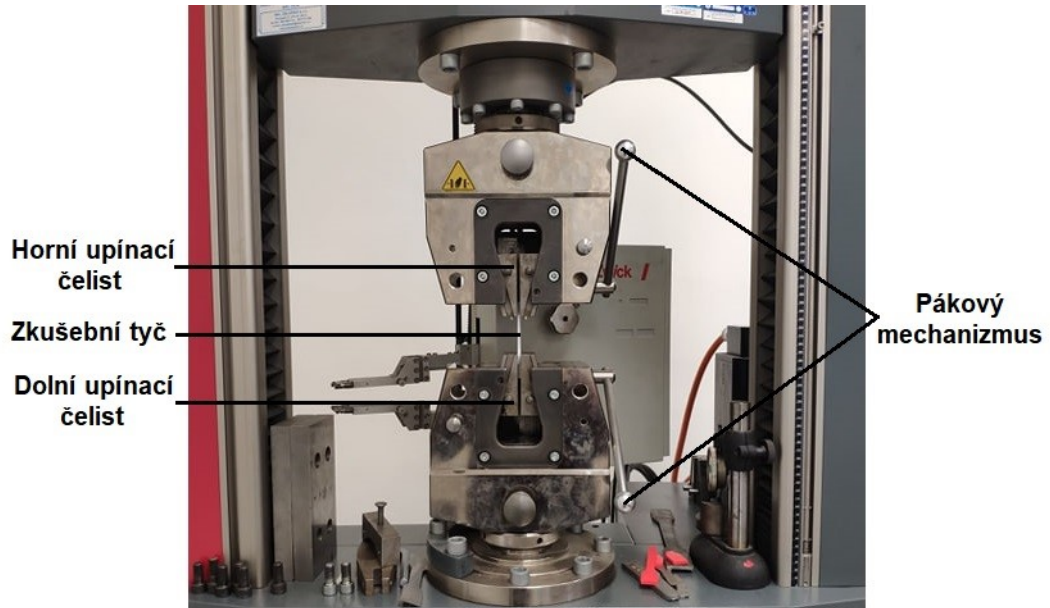
K provedení tahové zkoušky je nutné správně nastavit program testXpert, v opačném případě nebudou naměřená data korektní. Před provedením tahové zkoušky byly v programu testXpert nastaveny parametry dle normy EN ISO 527-1:2012. Rychlost zatěžování byla nastavena dle normy ČSN EN ISO 527. Počáteční vzdálenost upínacích čelistí byla nastavena dle parametru zkušební tyče  $l_2$  (viz tab. 2) na hodnotu 60 mm. V programu je před začátkem zkoušky nutné zadat rozměry tloušťky a šířky zúžené části zkušební tyče. Průřez zkušební tyče  $S_0$  (viz obr. 17) je u každé zkušební tyče odlišný, z toho důvodu jsou před upnutím do trhacího stroje rozměry přeměřeny a přepsány na skutečnou hodnotu (viz obr. 28).



Obr. 28 – Nastavení průřezu zkušební tyče (vlastní zpracování)

## 8.2 Průběh tahové zkoušky

Po nastavení vstupních parametrů v programu testXpert je do trhacího zařízení vložena zkušební tyč. Zkušební tyče byly označeny kódem (viz tab. 4), a to tak, aby i po ukončení zkoušky bylo možné rozpoznat, které dvě části jednotlivých zkušebních tyčí patří k sobě. Vzorek je upnut do čelistí trhacího stroje tak, že podélná osa zkušební tyče je rovnoběžná s osou trhacího stroje. Zkušební tyč se nejdříve upne na jedné z upínacích čelistí pomocí pákového mechanismu (viz obr. 29), následně je provedena kontrola rovnoběžnosti a poté se vzorek upne v opačné upínací čelisti.

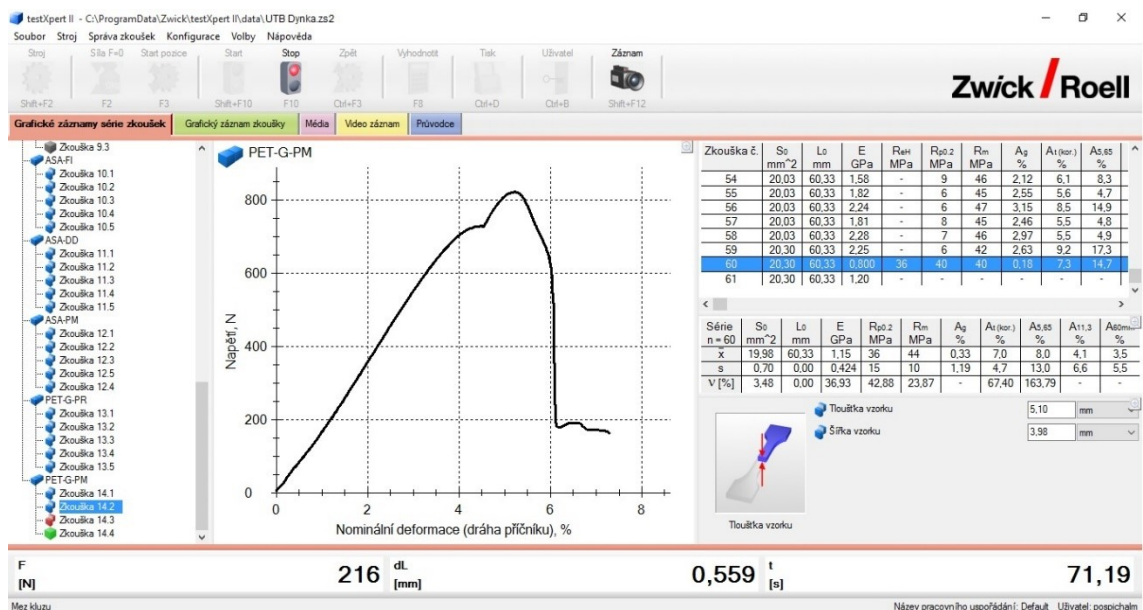


Obr. 29 – Upínání zkušební tyče (vlastní zpracování)

V případě, je-li zkušební tyč upnutá správně, je pomocí programu testXpert zahájena zkouška. V průběhu zkoušky je v programu zobrazována působící síla  $[N]$ , vzdálenost čelistí  $[mm]$  a grafická závislost prodloužení / deformace % na napětí  $[MPa]$ .

Zkouška je ukončena automaticky, a to v okamžiku přetržení zkušební tyče. Program vyhodnotí naměřená data a zobrazí výsledky (viz obr. 30).

Celý proces se opakuje až do naměření všech zkoušených aditivních materiálů. Po dokončení měření jsou naměřená data exportována do programu Excel, kde je možné tato data statisticky zpracovat.



Obr. 30 – Výsledek tahové zkoušky (vlastní zpracování)

## 9 ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ TESTOVANÝCH ADITIVNÍCH MATERIÁLŮ

V této části bakalářské práce je provedeno zpracování a vyhodnocení mechanických vlastností testovaných materiálů. K vyhodnocení byly zvoleny základní normalizované parametry (viz kap. 4.3), a to modul pružnosti (viz kap. 4.3.2), mez pevnosti (viz kap. 4.3.4) a tažnost (viz kap. 4.3.5).

Ke zpracování a vyhodnocení naměřených dat byly na základě konzultace s doc. Ing. Josefem Sedlákem, Ph.D. zvoleny základní statistické parametry.

Statistické zpracování dat bylo provedeno v programu Excel. Tento program umožňuje zpracování základních statistických parametrů.

Statistické parametry pro vyhodnocení mechanických vlastností byly vypočteny ze vztahů uvedených níže (viz vztahy 15 až 21).

**Aritmetický průměr  $\bar{x}$ :**

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (15)$$

- $x_i$  je prvek statistického souboru o indexu  $i$ ,
- $n$  je počet prvků statistického souboru.

**Rozptyl  $s^2$ :**

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (16)$$

- $x_i$  je prvek statistického souboru o indexu  $i$ ,
- $\bar{x}$  je aritmetický průměr,
- $n$  je počet prvků statistického souboru.

**Směrodatná odchylka  $s$ :**

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (17)$$

- $x_i$  je prvek statistického souboru o indexu  $i$ ,
- $\bar{x}$  je aritmetický průměr,
- $n$  je počet prvků statistického souboru.

**Variační koeficient  $V$ :**

$$V = 100 * \frac{s}{\bar{x}} [\%] \quad (18)$$

- $s$  je směrodatná odchylka,
- $\bar{x}$  je aritmetický průměr.

**Střední chyba průměru  $s_{\bar{x}}$ :**

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (19)$$

- $s$  je směrodatná odchylka,
- $n$  je počet prvků statistického souboru.

**Medián  $\tilde{x}$ :**

1. Pro lichý počet prvků  $n$

$$\tilde{x} = x_{(n+1)/2} \quad (20)$$

2. Pro sudý počet prvků  $n$

$$\tilde{x} = \frac{x_{n/2} + x_{(\frac{n}{2})+1}}{2} \quad (21)$$

- $x$  značí hodnoty uspořádané podle velikosti.
- $n$  je počet prvků statistického souboru.

## **9.1 Statistické zpracování a vyhodnocení mechanických vlastností materiálů PLA**

Aditivní materiál PLA byl testován od výrobců Filament-PM, Prusament a Fillamentum. Od každého výrobce bylo vytisknuto pět zkušebních vzorků, které se následně testovaly tahovou zkouškou. Z naměřených dat bylo provedeno statistické zpracování a vyhodnocení mechanických vlastností testovaných materiálů.

### **9.1.1 Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PLA Filament-PM**

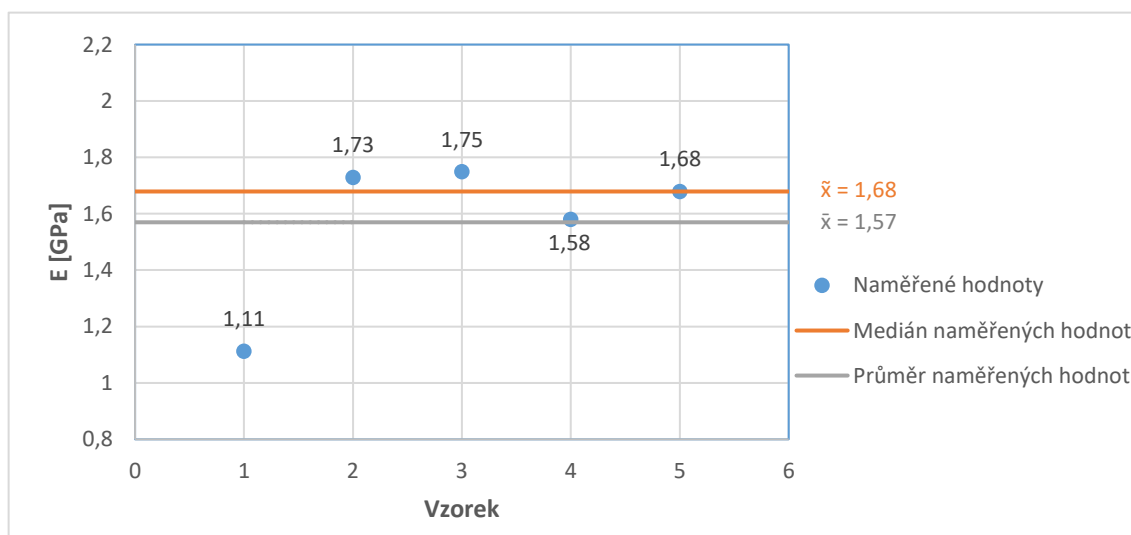
V této kapitole byly statisticky zpracovány mechanické vlastnosti aditivního materiálu PLA od výrobce Filament-PM.

## Modul pružnosti

Základní statistické parametry modulu pružnosti materiálu PLA Filament-PM (viz tab. 6).

Tab. 6 – Modul pružnosti PLA Filament-PM (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	1,57	GPa
Medián	1,68	GPa
Rozptyl	0,07	-
Směrodatná odchylka	0,26	-
Variační koeficient	16,81	%
Střední chyba průměru	0,11	-
Minimální hodnota	1,11	GPa
Maximální hodnota	1,75	GPa



Graf 1 – Modul pružnosti PLA Filament-PM (vlastní zpracování)

Z grafického znázornění (viz graf 1) je patrné, že jedna z hodnot (1,11) vykazuje asymetrii. Tento jev může být způsoben skrytými vadami zkušebního vzorku.

Aritmetický průměr je statisticky ovlivněn minimální hodnotou (1,11).

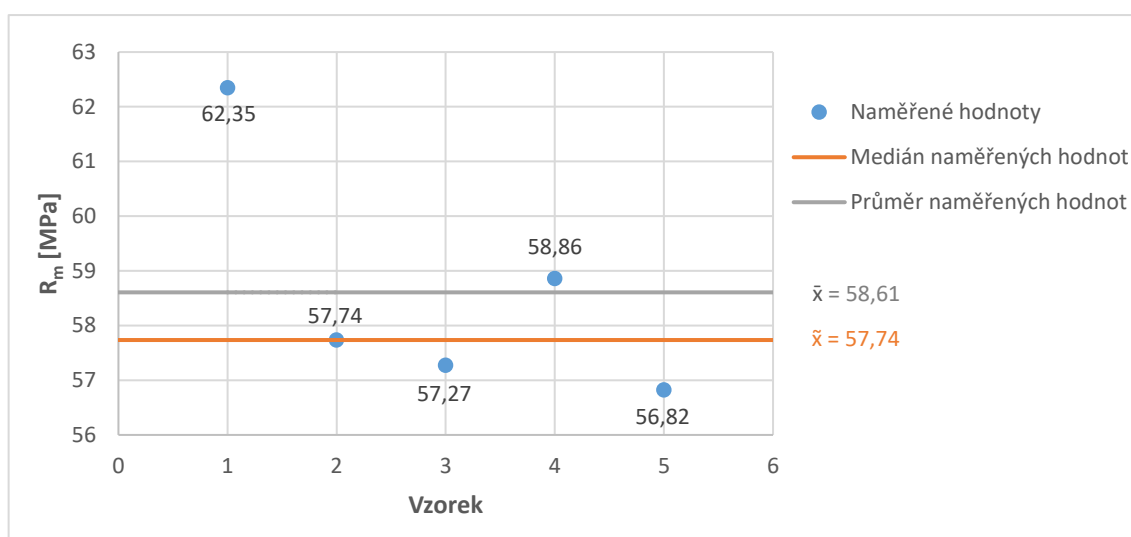


## Mez pevnosti

Základní statistické parametry meze pevnosti materiálu PLA Filament-PM, které byly určeny z výsledku tahové zkoušky (viz tab. 7).

Tab. 7 – Mez pevnosti PLA Filament-PM (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	58,61	MPa
Medián	57,74	MPa
Rozptyl	4,94	-
Směrodatná odchylka	2,22	-
Variační koeficient	3,79	%
Střední chyba průměru	0,99	-
Minimální hodnota	56,82	MPa
Maximální hodnota	62,35	MPa



Graf 2 – Mez pevnosti PLA Filament-PM (vlastní zpracování)

Z grafického znázornění (viz graf 2) je patrné, že jedna z hodnot (62,35) vykazuje asymetrii. Tento jev může být způsoben skrytými vadami zkušebního vzorku.

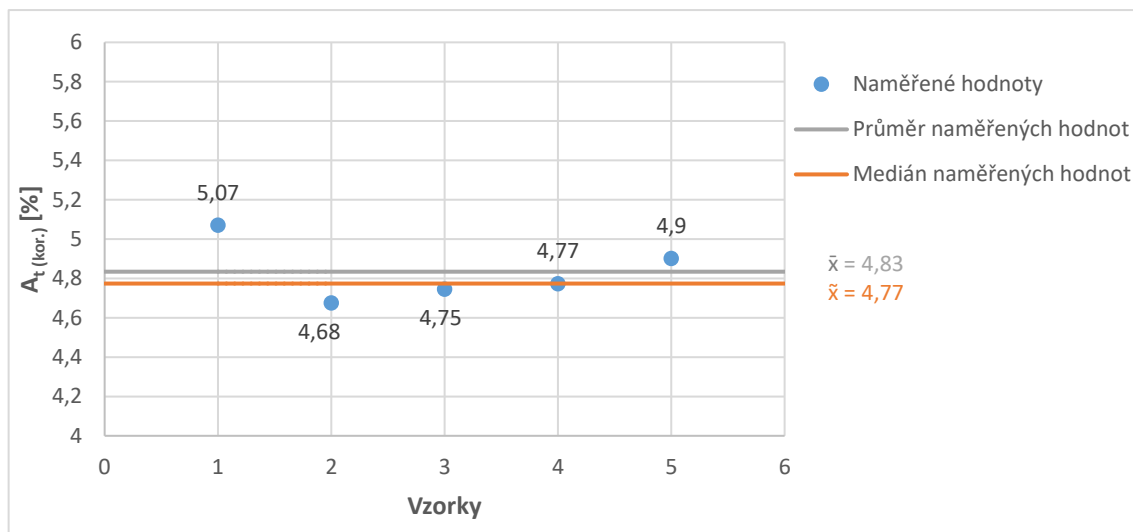
Aritmetický průměr je statisticky ovlivněn maximální hodnotou (62,35).

## Tažnost

Základní statistické parametry tažnosti materiálu PLA Filament-PM (viz tab. 8).

Tab. 8 – Tažnost PLA Filament-PM (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	4,83	%
Medián	4,77	%
Rozptyl	0,02	-
Směrodatná odchylka	0,16	-
Variační koeficient	3,23	%
Střední chyba průměru	0,07	-
Minimální hodnota	4,68	%
Maximální hodnota	5,07	%



Graf 3 – Tažnost PLA Filament-PM (vlastní zpracování)

Z grafického znázornění (viz graf 3) lze vidět, že naměřené hodnoty vykazují symetrii. Aritmetický průměr není ovlivněn žádnou z hodnot.

### 9.1.2 Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PLA Prusament

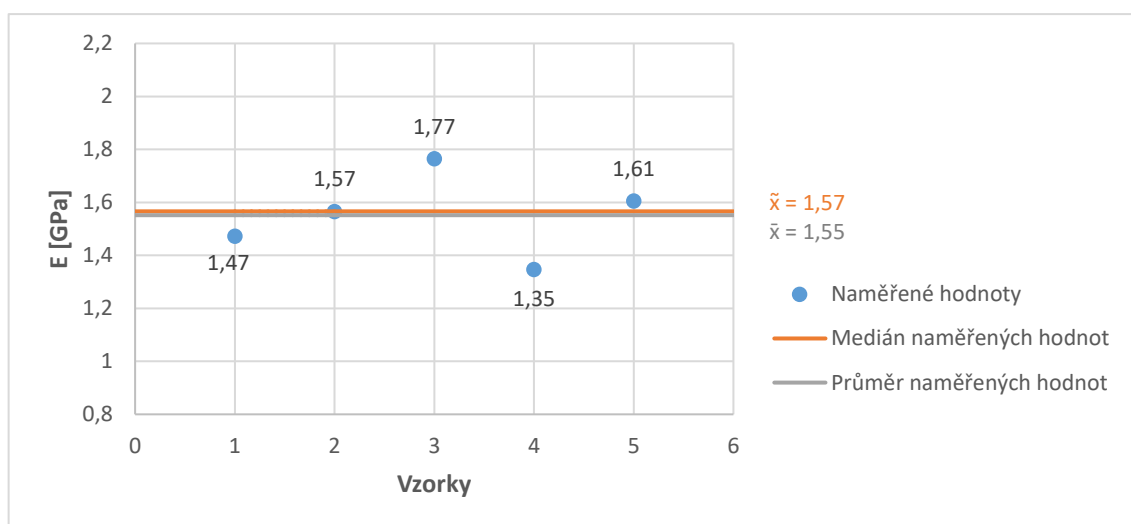
V této kapitole byly statisticky zpracovány mechanické vlastnosti aditivního materiálu PLA od výrobce Prusament.

#### Modul pružnosti

Základní statistické parametry modulu pružnosti materiálu PLA Prusament (viz tab. 9).

Tab. 9 – Modul pružnosti PLA Prusament (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	1,55	GPa
Medián	1,57	GPa
Rozptyl	0,02	-
Směrodatná odchylka	0,16	-
Variační koeficient	10,02	%
Střední chyba průměru	0,07	-
Minimální hodnota	1,35	GPa
Maximální hodnota	1,77	GPa



Graf 4 – Modul pružnosti PLA Prusament (vlastní zpracování)

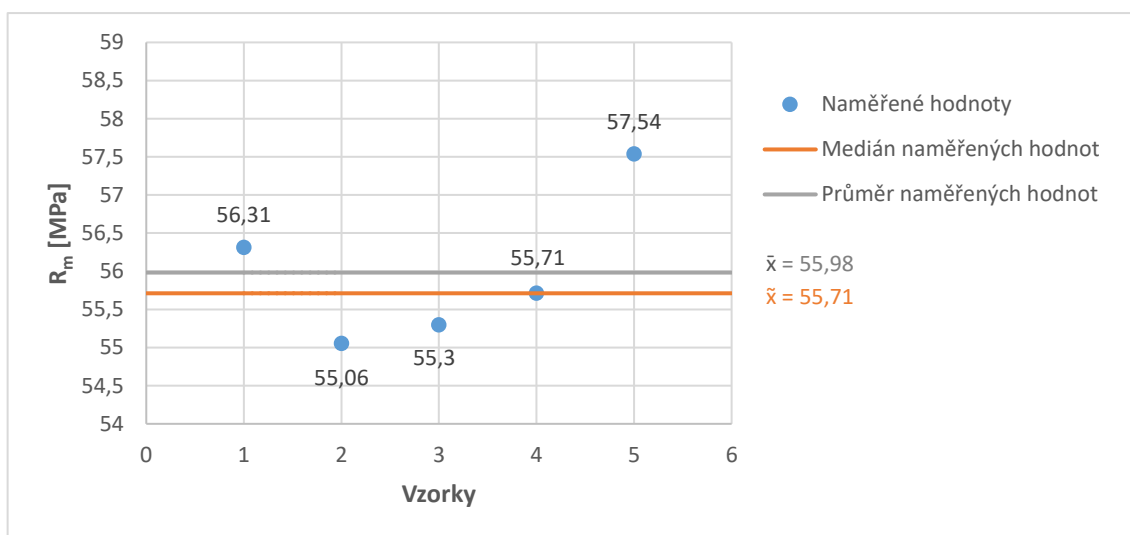
Z grafického znázornění (viz graf 4) lze vidět, že naměřené hodnoty vykazují symetrii. Aritmetický průměr není ovlivněn žádnou z hodnot.

### Mez pevnosti

Základní statistické parametry meze pevnosti materiálu PLA Prusament, které byly určeny z výsledku tahové zkoušky (viz tab. 10).

Tab. 10 – Mez pevnosti PLA Prusament (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	55,98	MPa
Medián	55,71	MPa
Rozptyl	0,98	-
Směrodatná odchylka	0,99	-
Variační koeficient	1,77	%
Střední chyba průměru	0,44	-
Minimální hodnota	55,06	MPa
Maximální hodnota	57,54	MPa



Graf 5 – Mez pevnosti PLA Prusament (vlastní zpracování)

Z grafického znázornění (viz graf 5) je patrné, že jedna z hodnot (57,54) vykazuje asymetrii. Tento jev může být způsoben skrytými vadami zkušební vzorku.

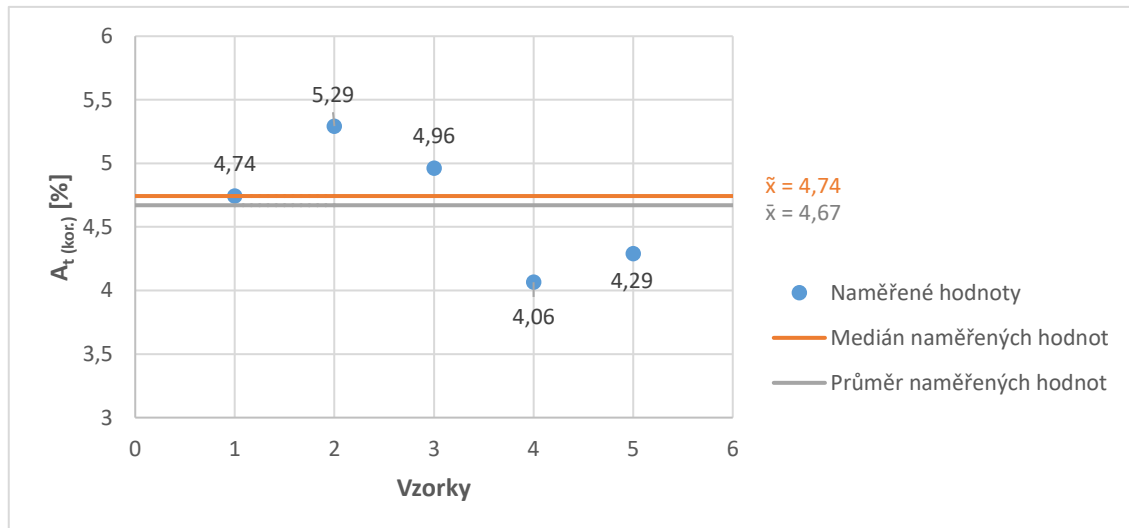
Aritmetický průměr je ovlivněn maximální hodnotou (57,54).

## Tažnost

Základní statistické parametry tažnosti materiálu PLA Prusament (viz tab. 11).

Tab. 11 – Tažnost PLA Prusament (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	4,67	%
Medián	4,74	%
Rozptyl	0,25	-
Směrodatná odchylka	0,5	-
Variační koeficient	10,65	%
Střední chyba průměru	0,22	-
Minimální hodnota	4,06	%
Maximální hodnota	5,29	%



Graf 6 – Tažnost PLA Prusament (vlastní zpracování)

Z grafického znázornění (viz graf 6) lze vidět, že naměřené hodnoty vykazují symetrii. Aritmetický průměr není ovlivněn žádnou z hodnot.

### 9.1.3 Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PLA Filamentum

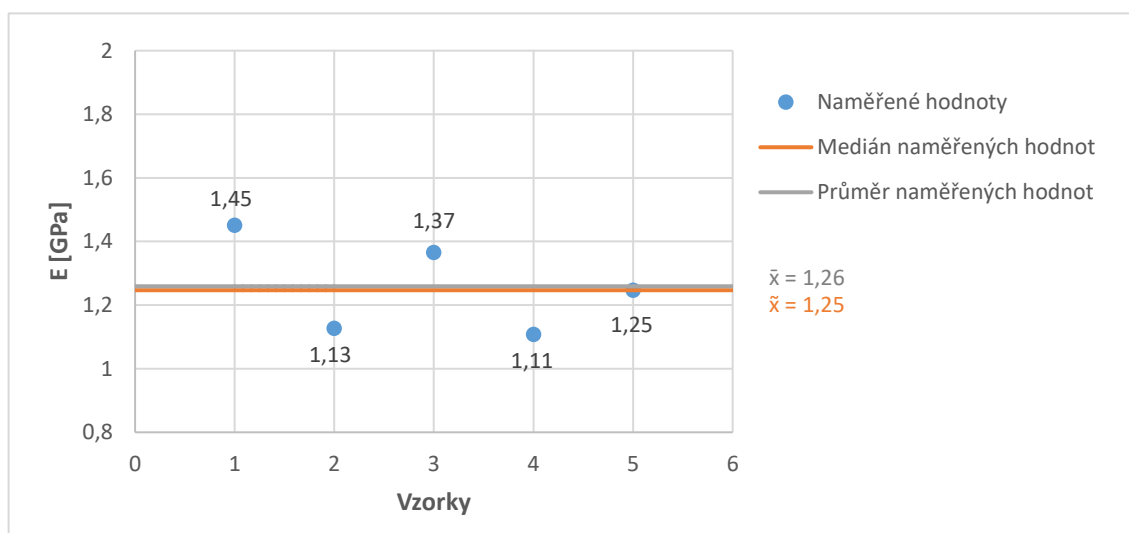
V této kapitole byly statisticky zpracovány mechanické vlastnosti aditivního materiálu PLA od výrobce Filamentum.

#### Modul pružnosti

Základní statistické parametry modulu pružnosti materiálu PLA Filamentum (viz tab. 12).

Tab. 12 – Modul pružnosti PLA Filamentum (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	1,26	GPa
Medián	1,25	GPa
Rozptyl	0,02	-
Směrodatná odchylka	0,15	-
Variační koeficient	11,82	%
Střední chyba průměru	0,07	-
Minimální hodnota	1,11	GPa
Maximální hodnota	1,45	GPa



Graf 7 – Modul pružnosti PLA Filamentum (vlastní zpracování)

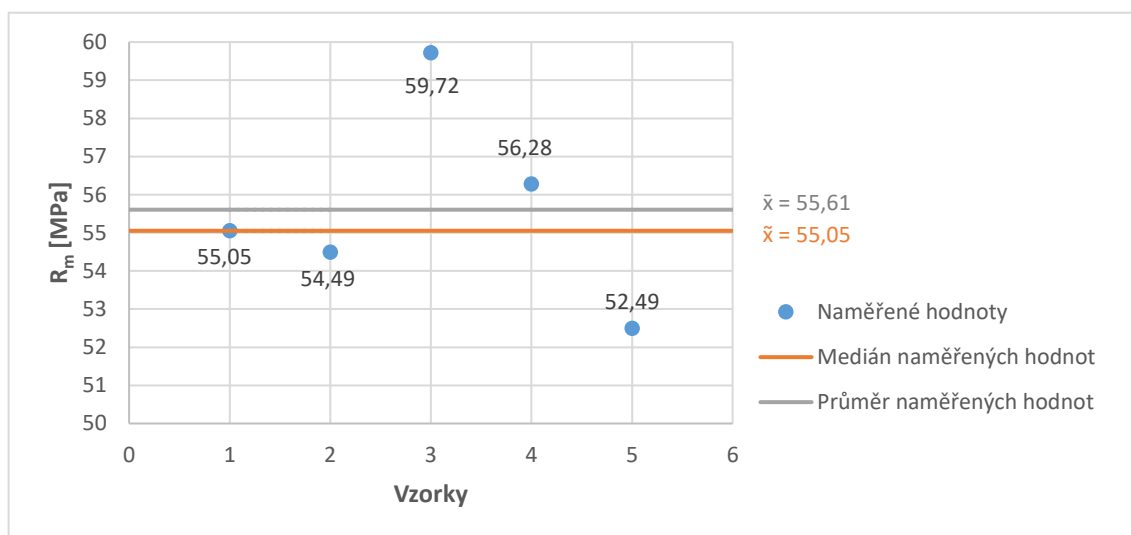
Z grafického znázornění (viz graf 7) lze vidět, že naměřené hodnoty vykazují symetrii. Aritmetický průměr není ovlivněn žádnou z hodnot.

## Mez pevnosti

Základní statistické parametry meze pevnosti materiálu PLA Fillamentum, které byly určeny z výsledku tahové zkoušky (viz tab. 13).

Tab. 13 – Mez pevnosti PLA Fillamentum (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	55,61	MPa
Medián	55,05	MPa
Rozptyl	7,15	-
Směrodatná odchylka	2,67	-
Variační koeficient	4,81	%
Střední chyba průměru	1,2	-
Minimální hodnota	52,49	MPa
Maximální hodnota	59,72	MPa



Graf 8 – Mez pevnosti PLA Fillamentum (vlastní zpracování)

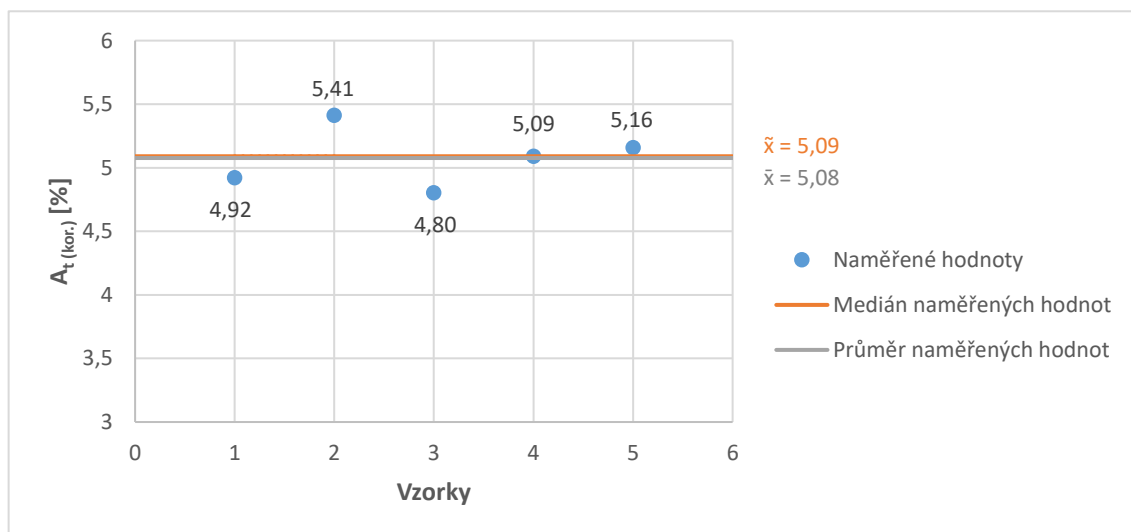
Z grafického znázornění (viz graf 8) je patrné, že maximální hodnota (59,72) a minimální hodnota (52,49) vykazují asymetrii. Tento jev může být způsoben skrytými vadami zkušebního vzorku.

## Tažnost

Základní statistické parametry tažnosti materiálu PLA Fillamentum (viz tab. 14).

Tab. 14 – Tažnost PLA Fillamentum (vlastní zpracování)

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	5,08	%
Medián	5,09	%
Rozptyl	0,05	-
Směrodatná odchylka	0,23	-
Variační koeficient	4,61	%
Střední chyba průměru	0,10	-
Minimální hodnota	5,41	%
Maximální hodnota	4,80	%



Graf 9 – Tažnost PLA Fillamentum (vlastní zpracování)

Z grafického znázornění (viz graf 9) lze vidět, že naměřené hodnoty vykazují symetrii. Aritmetický průměr není ovlivněn žádnou z hodnot.

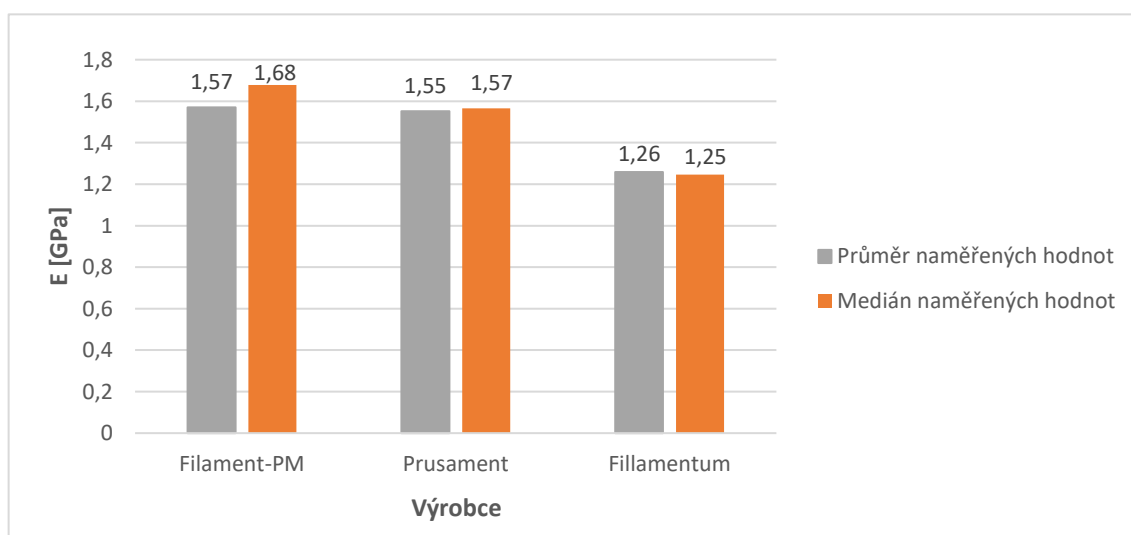


### 9.1.4 Vyhodnocení mechanických vlastností materiálů PLA

V této kapitole autor na základě statistického zpracování naměřených dat (viz kap. 9.1.1 až 9.1.3) provedl vyhodnocení mechanických vlastností aditivních materiálů PLA.

#### Modul pružnosti

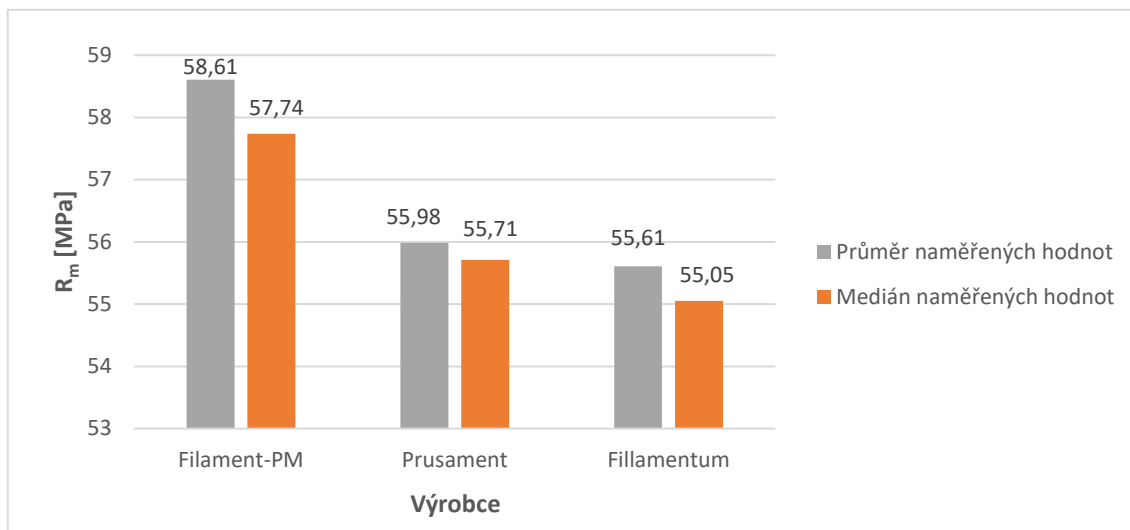
Z grafického znázornění modulu pružnosti aditivních materiálů PLA (viz graf 10) lze vidět, že nejvyšších hodnot dosáhl materiál od výrobce Filament-PM, a to v intervalu [1,57; 1,68]. Aditivní materiál od výrobce Prusament dosáhl hodnot v intervalu [1,55; 1,57], což je o 4 % nižší hodnota, než je tomu u materiálu od výrobce Filament-PM. Aditivní materiál od výrobce Fillamentum dosáhl hodnot v intervalu [1,25; 1,26], což je o 22,77 % nižší hodnota, než je tomu u materiálu od výrobce Filament-PM.



Graf 10 – Modul pružnosti materiálů PLA (vlastní zpracování)

#### Mez pevnosti

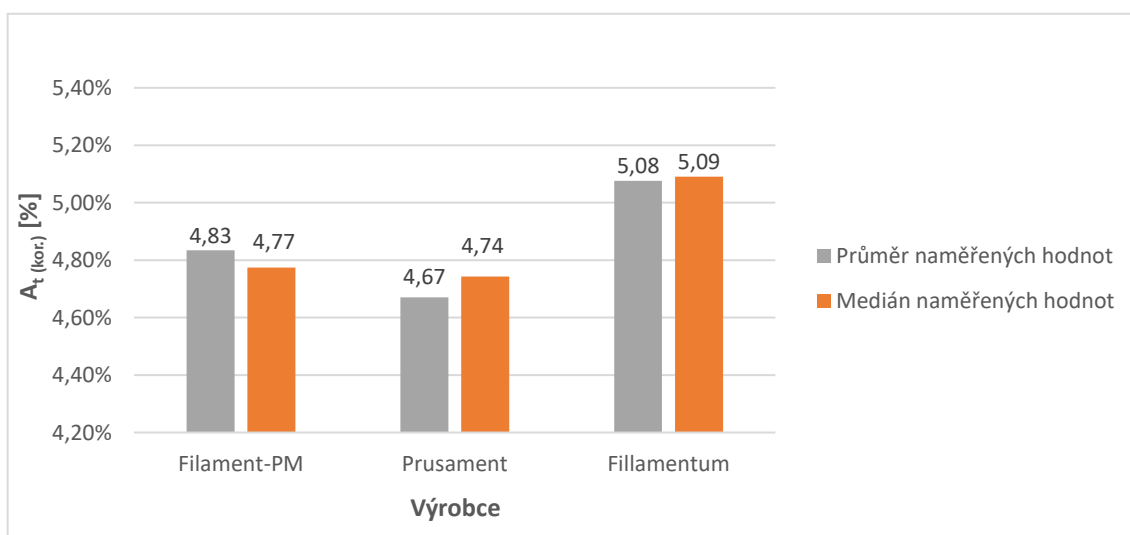
Z grafického znázornění meze pevnosti aditivních materiálů PLA (viz graf 11) lze vidět, že nejvyšších hodnot dosáhl materiál od výrobce Filament-PM, a to v intervalu od [57,74; 58,61]. Aditivní materiál od výrobce Prusament dosáhl hodnot v intervalu [55,98; 55,98], což je o 4,01 % nižší hodnota, než je tomu u materiálu od výrobce Filament-PM. Aditivní materiál od výrobce Fillamentum dosáhl hodnot v intervalu [55,05; 55,61], což je o 4,89 % nižší hodnota, než je tomu u materiálu od výrobce Filament-PM.



Graf 11 – Mez pevnosti materiálů PLA (vlastní zpracování)

### Tažnost

Z grafického znázornění tažnosti materiálů PLA (viz graf 12) lze vidět, že nejvyšších hodnot dosáhl aditivní materiál od výrobce Fillamentum, a to v intervalu od [5,08 %; 5,09 %]. Aditivní materiál od výrobce Prusament dosáhl hodnot v intervalu [4,67 %; 4,74 %], což je o 7,47 % nižší hodnota, než je tomu u materiálu od výrobce Filament-PM. Aditivní materiál od výrobce Fillamentum dosáhl hodnot v intervalu [4,77 %; 4,83 %], což je o 5,11 % nižší hodnota, než je tomu u materiálu od výrobce Filament-PM.



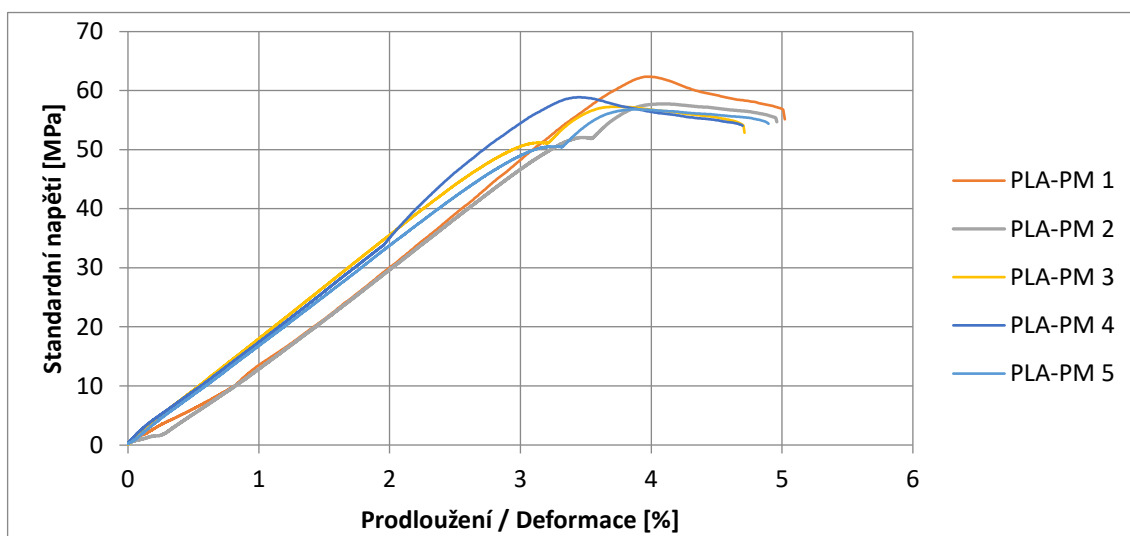
Graf 12 – Tažnost materiálů PLA (vlastní zpracování)

### 9.1.5 Tahové diagramy materiálu PLA

V této kapitole jsou graficky vyobrazeny jednotlivé průběhy tahových zkoušek materiálů PLA od vybraných výrobců.

#### PLA Filament-PM

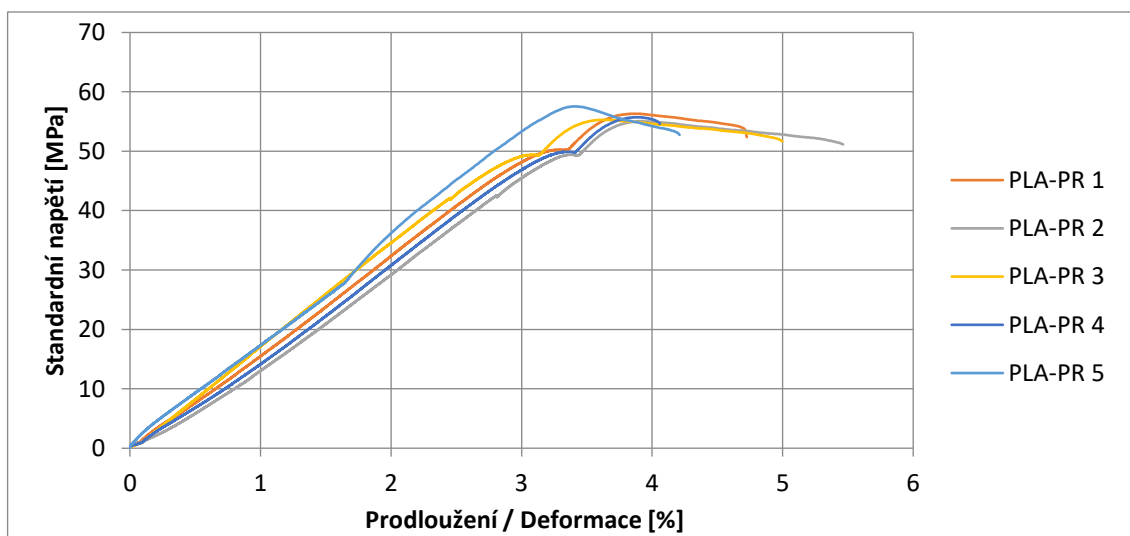
Na grafickém znázornění (viz graf 13) lze vidět průběh tahové zkoušky materiálu PLA od výrobce Filament-PM.



Graf 13 – Tahový diagram materiálu PLA Filament-PM (vlastní zpracování)

#### PLA Prusament

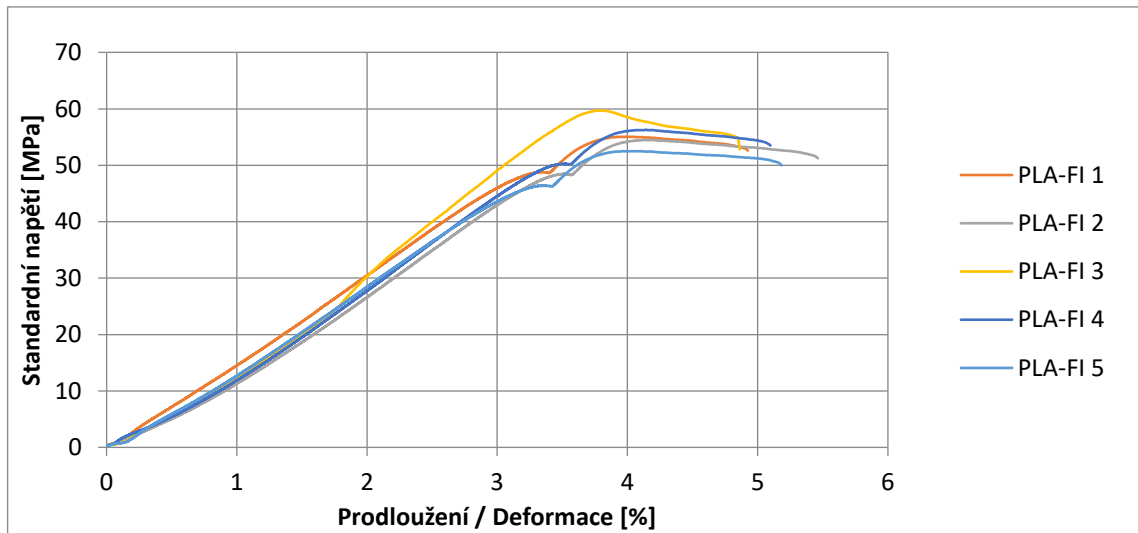
Na grafickém znázornění (viz graf 14) lze vidět průběh tahové zkoušky materiálu PLA od výrobce Prusament.



Graf 14 – Tahový diagram materiálu PLA Prusament (vlastní zpracování)

## PLA Fillamentum

Na grafickém znázornění (viz graf 15) lze vidět průběh tahové zkoušky materiálu PLA od výrobce Fillamentum.



Graf 15 – Tahový diagram materiálu PLA Fillamentum (vlastní zpracování)

## 9.2 Statistické zpracování a vyhodnocení mechanických vlastností ostatních aditivních materiálů

Statistické zpracování a vyhodnocení aditivních materiálů ABS, ASA a PET-G (viz přílohy I až XIV) bylo provedeno stejným způsobem jako u materiálu PLA.

Aditivní materiál ABS (viz přílohy I až IV) byl testován od dvou výrobců, a to od výrobce Devil Design a Prusament.

Aditivní materiál ASA (viz přílohy V až IX) byl testován od výrobců Filament-PM, Devil Design a Fillamentum.

Aditivní materiál PET-G (viz přílohy X až XIV) byl testován od výrobců Filament-PM, Prusament a Spectrum.

## 10 ZHODNOCENÍ TESTOVANÝCH ADITIVNÍCH MATERIÁLŮ V PROCESU VÝROBY Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA

V této kapitole byly celkově zhodnoceny mechanické vlastnosti vybraných aditivních materiálů od výrobců Filament-PM, Prusament, Fillamentum, Devil Design a Spectrum. Materiály byly následně vyhodnoceny z ekonomického hlediska a použitelnosti ve výrobě.

### 10.1 Shrnutí mechanických vlastností testovaných aditivních materiálů

Do výsledného shrnutí mechanických vlastností testovaných aditivních materiálů (viz tab. 15) byly použity mediány naměřených hodnot. Statistický průměr nebyl použit z důvodu jeho zkreslení naměřenými extrémními hodnotami některých vzorků.

Ve výsledném shrnutí (viz tab. 15) jsou uvedeny ceny jednotlivých aditivních materiálů od každého výrobce z roku 2020. Ceny jsou včetně DPH (21 %) za 1 Kg aditivního materiálu.

Ceny materiálu PLA-PM, ASA-PM a PET-G-PM jsou uvedeny z webových stránek výrobce ([www.filament-pm.cz](http://www.filament-pm.cz)). (Filament-PM, 2020)

Ceny materiálu PLA-PR, ABS-PR a PET-G-PR jsou uvedeny z webových stránek výrobce ([www.shop.prusa3d.com](http://www.shop.prusa3d.com)). (3D tiskárny Original Prusa přímo od Josefa Průši, 2020)

Ceny zahraničního výrobce Fillamentum jsou na jejich webových stránkách ([www.fillamentum.com](http://www.fillamentum.com)) uvedeny v eurech, z toho důvodu byl pro materiály PLA-FI a ASA-FI k přepočtu použit kurz 27,41 Kč ze dne 13. 5. 2020, a to z webových stránek České národní banky ([www.cnb.cz](http://www.cnb.cz)). (Fillamentum, 2020; ČNB, 2020)

Ceny zahraničního výrobce Devil Design jsou na jejich webových stránkách ([www.devildesign.com](http://www.devildesign.com)) uvedeny ve zlotých, z toho důvodu byl pro materiály ABS-DD a ASA-DD k přepočtu použit kurz 6,006 Kč ze dne 13. 5. 2020, a to z webových stránek České národní banky ([www.cnb.cz](http://www.cnb.cz)). (Devil Design, 2020; ČNB, 2020)

Ceny zahraničního výrobce Spectrum jsou na jejich webových stránkách ([www.spectrumfilaments.com](http://www.spectrumfilaments.com)) uvedeny v eurech, z toho důvodu byl pro materiál PET-G-SP k přepočtu použit kurz 27,41 Kč ze dne 13. 5. 2020, a to z webových stránek České národní banky ([www.cnb.cz](http://www.cnb.cz)). (Spectrum Filaments, 2020; ČNB, 2020)

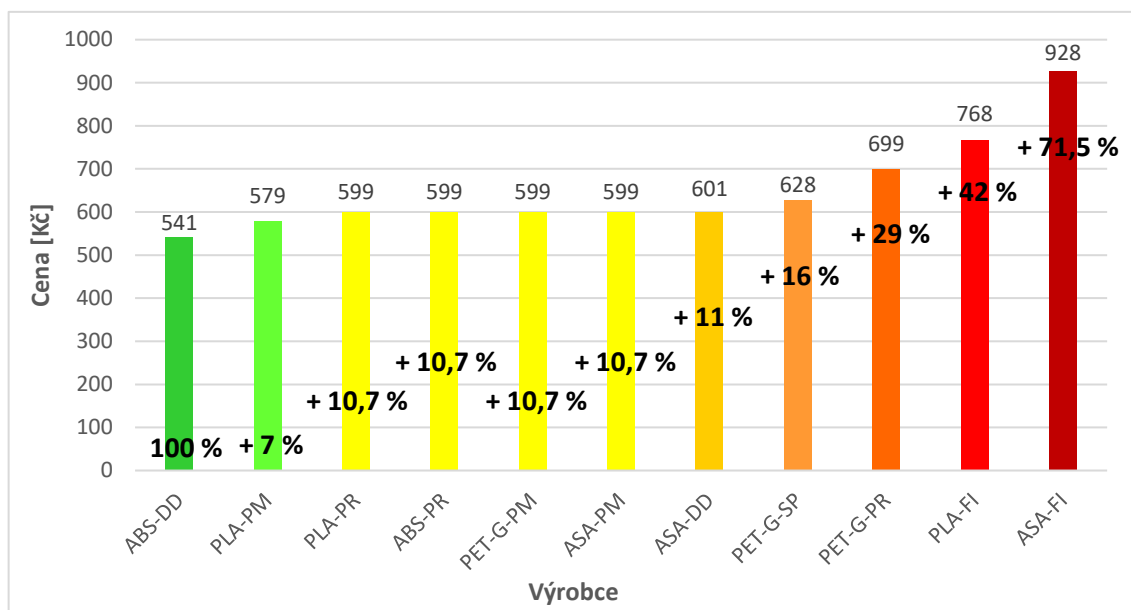
Tab. 15 – Shrnutí mechanických vlastností aditivních materiálů (vlastní zpracování)

Materiál	E [GPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>t (kor.)</sub> [%]	Cena [Kč]
PLA-PM	1,68	57,74	4,77	579
PLA-PR	1,57	55,71	4,74	599
PLA-FI	1,25	55,05	5,09	768
ABS-DD	0,91	31,76	5,79	541
ABS-PR	0,79	37,84	6,76	599
ASA-PM	0,82	40,48	6,82	599
ASA-DD	1,09	40,04	5,22	601
ASA-FI	0,8	34,12	7,61	928
PET-G-PM	1,07	41,9	9,18	599
PET-G-PR	1,82	45,6	5,56	699
PET-G-SP	1,05	45,48	9,08	628

## 10.2 Ekonomické zhodnocení testovaných materiálů

V grafickém znázornění (viz graf 16) lze vidět všechny testované aditivní materiály, které jsou seřazeny dle ceny, a to od nejnižší po nejvyšší cenu. Pro lepší přehlednost je cenová hladina označena barevnou stupnicí, kde tmavě zelená barva demonstruje nízkou cenu a rudá barva cenu vysokou. Procentuální přírůstek u jednotlivých materiálů ukazuje cenový růst proti základnímu materiálu (100 %), kterým byl zvolen aditivní materiál ABS-DD (např. u materiálu ASA-DD se v roce 2020 pohybuje prodejní cena o 11 % vyšší, než je tomu u materiálu ABS-DD).

Za předpokladu využití 3D tiskárny vhodné pro tisk materiálu ABS je z ekonomického zhodnocení (viz graf 16) patrné, že pro dosažení nejnižších nákladů na materiál, je vhodné tisknout z aditivního materiálu ABS-DD. V případě využití 3D tiskárny, která není vhodná pro tisk materiálu ABS, autor doporučuje tisknout z materiálu PLA-PM, jehož cena je o 7 % vyšší, než je tomu u materiálu ABS-DD.



Graf 16 – Ekonomické zhodnocení (vlastní zpracování)

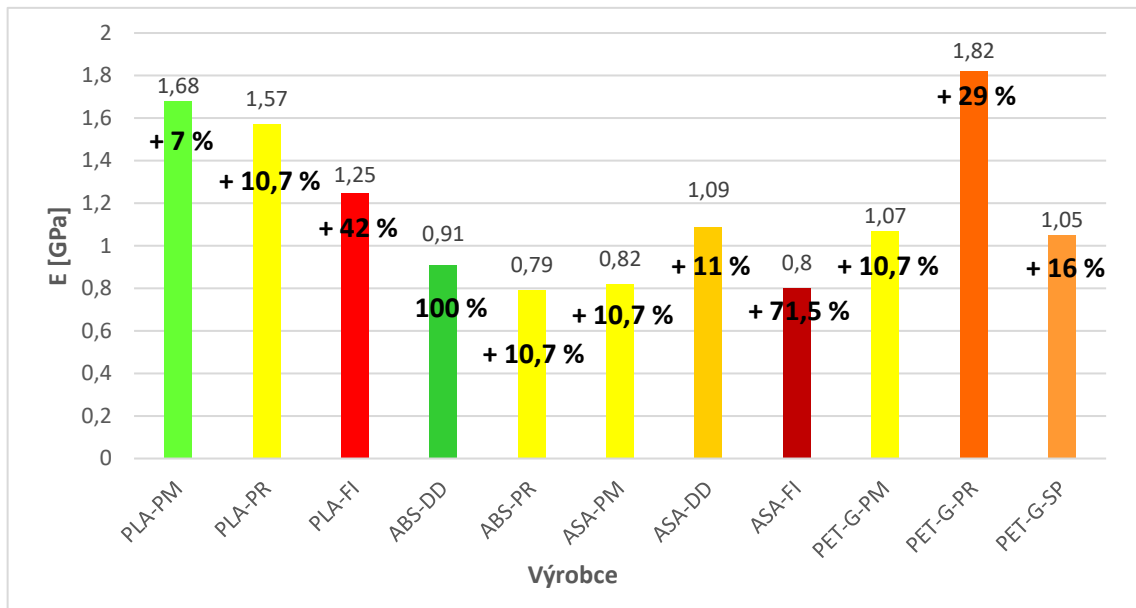
### 10.3 Zhodnocení modulů pružnosti v procesu výroby z ekonomického hlediska

Zhodnocení modulů pružnosti je provázáno s ekonomickým zhodnocením (viz kap 10.2). V grafickém znázornění (viz graf 17) je využito barevné stupnice a procentuálního přírůstku (viz kap 10.2).

Z grafického znázornění závislosti (viz graf 17) je patrné, že nejvyšších hodnot modulu pružnosti dosáhl materiál PET-G-PR (1,82 GPa), který je o 29 % dražší než základní materiál. Naopak nejnižších hodnot dosáhl materiál ABS-PR (0,79 GPa).

V případě, je-li cílem tisknout pružné modely, je vhodné použít některý z materiálů PLA nebo PET-G-PR. Autor doporučuje využít materiál PLA-PM, který dosahuje hodnot 1,68 GPa a je pouze o 7 % dražší než základní materiál.

Pro tisk modelů s nízkým modulem pružnosti je vhodné použít některý z materiálů ABS, ASA, PET-G-PM nebo PET-G-SP. Autor nedoporučuje použít materiál ASA-FI, který je o 71 % dražší než základní materiál.



Graf 17 – Zhodnocení modulů pružnosti (vlastní zpracování)

#### 10.4 Zhodnocení mezi pevnosti v procesu výroby z ekonomického hlediska

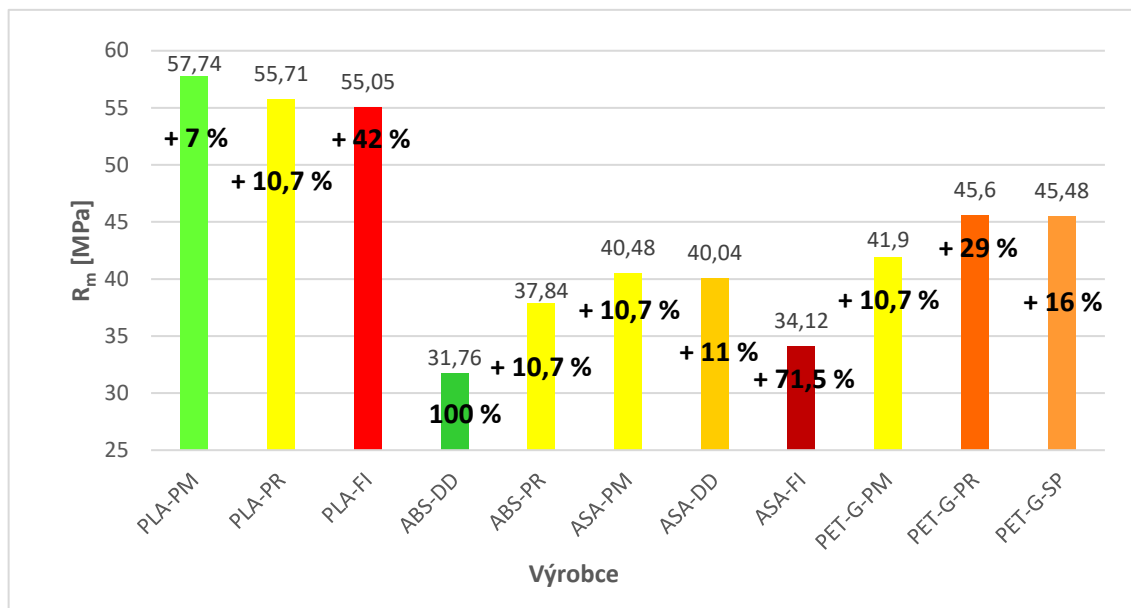
Zhodnocení mezi pevnosti bylo provedeno podobným způsobem jako zhodnocení modulů pružnosti.

Z grafického znázornění (viz graf 18) je patrné, že nejvyšších hodnot meze pevnosti dosáhl materiál PLA-PM (57,74 MPa), který je o 7 % dražší než základní materiál. Naopak nejnižších hodnot dosáhl základní materiál ABS-DD (31,76 MPa).

V případě, je-li cílem tisknout modely s vysokou mezí pevnosti, je vhodné použít materiál PLA. Autor doporučuje využít materiál PLA-PM, který dosahuje hodnot 57,74 MPa.

Pokud není kladen důraz na mez pevnosti, je možné využít některý z ostatních testovaných materiálů.



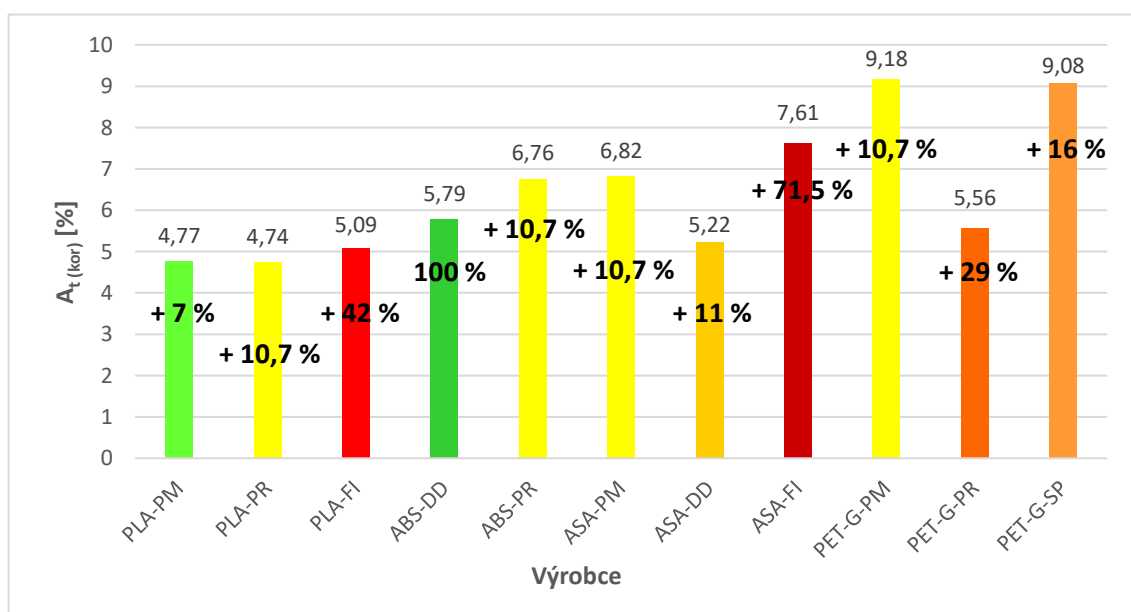


Graf 18 – Zhodnocení meze pevnosti (vlastní zpracování)

### 10.5 Zhodnocení tažností testovaných materiálů v procesu výroby z ekonomického hlediska

Zhodnocení tažností testovaných materiálů bylo provedeno podobným způsobem jako zhodnocení modulů pružnosti a mezí pevnosti.

Z grafické závislosti (viz graf 19) je patrné, že nejvyšších hodnot tažnosti dosáhl materiál PET-G-PM (9,18 %), který je o 10,7 % dražší než základní materiál. Naopak nejnižších hodnot dosáhl základní materiál PLA-PR (4,74 %).



Graf 19 – Zhodnocení tažností (vlastní zpracování)

### Celkové zhodnocení testovaných materiálů

V této kapitole je zpracováno celkové zhodnocení testovaných aditivních materiálů od vybraných výrobců (viz tab. 4). Materiály je nutné vybírat dle různých kritérií, obecně je při výběru materiálů nutné počítat s odlišnými vlastnostmi různých typů materiálů (viz kap. 5.1). Například materiál PLA není vhodné vystavovat dlouhodobému působení UV záření, kterému naopak materiál ASA odolává. Z tohoto důvodu je ve výsledném zhodnocení zahrnuto pořadí dle typu materiálu. Do zhodnocení jednotlivých materiálů (viz tab. 16) je zahrnuta jejich cena, mez pevnosti, modul pružnosti a tažnost.

Nejlepšího hodnocení dosáhl materiál PLA-PM, a to jak v pořadí dle typu materiálu, tak v celkovém pořadí. Nejhoršího hodnocení mezi testovanými materiály dosáhl materiál ASA-DD.

Tab. 16 – Celkové zhodnocení testovaných materiálů (vlastní zpracování)

Materiál	Hodnocení	Pořadí dle typu materiálu	Celkové pořadí
PLA-PM	3,75	1.	1.
PLA-PR	4,75	2.	4.
PLA-FI	6,5	3.	6.
ABS-DD	6,5	1.	6.
ABS-PR	7	2.	7.
ASA-PM	5,75	1.	5.
ASA-DD	8,33	3.	9.
ASA-FI	7,75	2.	8.
PET-G-PM	4	1.	2.
PET-G-PR	4,5	2.	3.
PET-G-SP	4,75	3.	4.

## ZÁVĚR

V této bakalářské práci bylo provedeno stanovení mechanických vlastností vybraných aditivních materiálů pomocí mechanické zkoušky statické tahem a jejich následné zhodnocení v procesu výroby z ekonomického hlediska. Pro testování byly vybrány čtyři typy termoplastických aditivních materiálů (PLA, ABS, ASA a PET-G) od několika výrobců.

Normalizované vzorky byly vyrobeny technologií 3D tisku (FDM) a následně testovány mechanickou zkouškou statickou tahem. V bakalářské práci bylo provedeno vyhodnocení tří normalizovaných parametrů, a to modulu pružnosti, meze pevnosti a tažnosti. Naměřené hodnoty těchto tří normalizovaných parametrů byly statisticky zpracovány a zaznamenány do tabulek a grafů.

V další části bakalářské práce bylo provedeno vyhodnocení výsledků tahových zkoušek jednotlivých materiálů z ekonomického hlediska a využití ve výrobě.

Na závěr bylo provedeno celkové zhodnocení všech testovaných aditivních materiálů, ve kterém byly zahrnuty tři vybrané normalizované parametry včetně cen jednotlivých materiálů. Celkové zhodnocení bylo provedeno z mediánů naměřených hodnot, a to především z důvodu, že aritmetický průměr je ovlivněn naměřenými extrémními hodnotami. Dle celkového zhodnocení dosáhl mezi testovanými materiály nejlepších výsledků aditivní materiál PLA od výrobce Filament-PM, naopak nejhorších výsledků dosáhl materiál ASA od výrobce Devil Design.

Shrnutí dosažených výsledků:

- normalizované vzorky byly vyrobeny a podrobeny tahové zkoušce,
- bylo provedeno statistické zpracování a zhodnocení naměřených dat,
- ke každém testovaném materiálu byly stanoveny mechanické vlastnosti pro tři normalizované parametry (modul pružnosti, mez pevnosti a tažnost),
- bylo provedeno výsledné zhodnocení testovaných materiálů z ekonomického hlediska a procesu výroby.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- 1 MACEK, Karel, Petr ZUNA a kol., *Nauka o materiálu*. Praha: ČVUT, 1996, 209 s. ISBN 80-010-1507-6.
- 2 MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. Praha: ČVUT, 2014, 139 s. ISBN 978-80-01-05527-4.
- 3 GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich: Hanser Publishers, 2016, 591 s. ISBN 978-1-56990-582-1.
- 4 CHUA, Che Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.
- 5 JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*. 2., nezměněné vyd. Pardubice: Vysoká škola chemicko-technologická, 1989, 105 s. ISBN 80-851-1301-5.
- 6 KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017, 211 s. ISBN 978-80-251-4876-1.
- 7 SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, 444 s. ISBN 978-1-4987-1477-8.
- 8 SCHÄTZ, Miroslav a Petr VONDRÁČEK. *Zkoušení polymerů*. 2., přepr. a dopl. vyd. Praha: VŠCHT, 1988, 276 s.
- 9 VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010, 212 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- 10 PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001, 506 s. ISBN 80-720-4193-2.
- 11 PRŮŠA, Josef a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019, 62 s.
- 12 ČSN EN ISO 527-2, 2012. *Plasty – Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. 1. Zlín: Institut pro testování a certifikaci.
- 13 ČSN EN ISO 527-1, 2012. *Plasty – Stanovení tahových vlastností: Část 1: Obecné principy*. 1. Zlín: Institut pro testování a certifikaci.
- 14 Michal Vrbický, 2020. *Rapid Prototyping a použití ve výrobě*, © 2020. *CAD* [online]. [cit. 2020-01-24]. ISSN 1802-6168. Dostupné z: <https://cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/8009-rapid-prototyping-a-pouziti-ve-vyrobe.html>
- 15 The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today, © 2019. *Sculpteo* [online]. [cit. 2020-01-24]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing>

- 16 Leo Gregurić, 2018. History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? *All3DP* [online]. [cit. 2020-01-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented>
- 17 Our Story, © 2020. *3D Systems, Inc.* [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>
- 18 Jan Horčík, 2013. Urbee – hybridní auto z 3D tiskárny, © 2019. *Hybrid.cz* [online]. [cit. 2020-01-27]. ISSN 1802-5323. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/urbee-hybridni-auto-z-3d-tiskarny>
- 19 3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE, © 2020. *ABC3D* [online]. [cit. 2020-01-27]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>
- 20 ICON PR, 2018. New Story and ICON Unveil the First Permitted 3D-Printed Home, *ICON BUILD* [online]. [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://www.iconbuild.com/updates/this-house-can-be-3d-printed-for-cheap>
- 21 ICON PR, 2019. Printing Homes for the Homeless in Austin, *ICON BUILD* [online]. [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://www.iconbuild.com/updates/homes-for-the-homeless-in-austin>
- 22 Tess Boissonneault, 2019. ICON launches Vulcan II 3D printer, announces new construction plans, © 2020. *3dpbm* [online]. [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/icon-vulcan-ii-3d-printer-construction>
- 23 All3DP, 2016. The Official History of the RepRap Project, *All3DP* [online]. [cit. 2020-01-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project>
- 24 3D tisk šetří náklady při výrobě letadel, © 2020. *3dtisknazakazku.cz* [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/19-3d-tisk-setri-naklady-pri-vyrobe-letadel.html>
- 25 Michael Molitch-Hou, 2020. Boeing 777x Takes First Flight with over 600 3D-Printed Parts, © 2020. *3DR Holdings, LLC* [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://3dprint.com/262742/boeing-777x-takes-first-flight-with-over-600-3d-printed-parts>
- 26 Charles Alcock, 2014. GE9X Technology Validated As Program Gathers Pace, © 2020. *The Convention News Company, Inc.* [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.ainonline.com/aviation-news/air-transport/2014-07-14/ge9x-technology-validated-program-gathers-pace>

- 27 Tia Vialva, 2019. Redefine Meat raises \$6 million to advance food 3D printing technology, © 2017. *3D Printing Industry* [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/define-meat-raises-6-million-to-advance-food-3d-printing-technology-161580>
- 28 Catherine Lamb, 2019. Redefine Meat Serves 3D Printed “Beef” made of Plants to Unknowing Diners, © 2020. *The Spoon* [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://thespoon.tech/define-meat-serves-3d-printed-meat-made-of-plants-to-unknowing-diners>
- 29 Lee Mohon, 2014. NASA Marshall Completes Tests on 3-D Printer Bound for Space Station. *NASA* [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2014/14-105.html>
- 30 Dave, 2018 Solid Ground Curing (SGC), © 2017. *Greenindustrylinks* [online]. [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <https://greenindustrylinks.com/solid-ground-curing-sgc>
- 31 All3DP, 2019. SLA 3D Printing (Stereolithography) – Simply Explained, *All3DP* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained>
- 32 DLP a LCD 3D tisk, © 2020. *cotu.cz* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/148/dlp-a-lcd-3d-tisk>
- 33 Material Jetting (MJ), © 2020. *Additively* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.additively.com/en/learn-about/material-jetting>
- 34 3D tisk spékáním práškové vrstvy, © 2020. *cotu.cz* [online]. [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/90/praskovy-3d-tisk>
- 35 3D tisk fotopolymerizací, © 2020. *cotu.cz* [online]. [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/151/3d-tisk-fotopolymerizaci>
- 36 SLS (Selective Laser Sintering), © 2020. *cotu.cz* [online]. [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering>
- 37 SLM (Selective Laser Melting), © 2020. *cotu.cz* [online]. [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/slm-selective-laser-melting>
- 38 EBM (Electron Beam Melting), © 2020 *cotu.cz* [online]. [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/122/ebm-electron-beam-melting>
- 39 3D tiskové struny PLA (Polylactic acid), © 2020 *Pro3d* [online]. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://www.pro3d.cz/vyrobn-material/pla>
- 40 PLA, © 2020. *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla>
- 41 ABS, © 2020. *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/abs-filamenty>

- 42 3D tiskové struny ABS, © 2020. *Pro3d* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.pro3d.cz/vyrobni-material/abs>
- 43 3D tiskové struny ASA © 2020. *Pro3d* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.pro3d.cz/vyrobni-material/asa>
- 44 ASA, © 2020. *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa>
- 45 3D tiskové struny PETG, © 2020. *Pro3d* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.pro3d.cz/vyrobni-material/petg>
- 46 PET, PET-G, PET-G/CF, © 2020. *Materialpro3d.cz* [online]. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g>
- 47 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3, © 2020. *Prusa Research a.s.* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.html>
- 48 Filament-PM, © 2020. *Plasty Mladeč* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz>
- 49 3D tiskárny Original Prusa přímo of Josefa Průši, © 2020. *Prusa Research a.s.* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.shop.prusa3d.com/cs>
- 50 Fillamentum, © 2020. *Fillamentum.com* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.fillamentum.com>
- 51 Devil Design, © 2020. *Devil Design* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.devildesign.com>
- 52 Spectrum Filaments, © 2020. *Spectrum Filaments* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné: <https://www.spectrumfilaments.com>
- 53 ČNB, © 2020. *Česká národní banka* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://www.cnb.cz>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
3D	Trojdimenzionální (trojrozměrný)
3MF	3D Manufacturing Format
Aj.	A jiné
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitrilstyrenakryl
CAD	Computer-aided design
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
Č.	Číslo
ČSN EN ISO	Česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou normu identickou s mezinárodní normou ISO
Doc.	Docent
DLP	Digital light processing
DMLS/SLM	Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting
DPH	Daň z přidané hodnoty
Dr.	Doktor
EBM	Electron beam melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FAME	Fakulta managementu a ekonomiky
Ing.	Inženýr
ISS	International Space Station
Kč	Koruna česká
LCD	Liquid crystal display
LOM	Laminated Object Manufacturing
Ltd.	Limited company
MJM	Multi Jet Modeling



---

Např.	Například
Obr.	Obrázek
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PET-G	Polyethylentereftalátko-1,4-cyklohexylendimethylentereftalát
Ph.D.	Doktor
PLA	Polylaktid
PP	Polypropylen
PPSF	Polyfenylsulfon
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
RP	Rapid prototyping
R/ε	Smluvní tahový diagram
SGC	Solid Ground Cutting
SLA	Stereo Lithography Apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
S.R.O.	S ručením omezeným
STL	Stereolitografie
S.	Strana
SD CARD	Secure Digital Card
Tab.	Tabulka
Tzv.	Tak zvaný
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultrafialové záření

Symbol	Popis [jednotka]
A	Tažnost [%]
$A_t$	Tažnost měřená v zatíženém stavu pod napětím [%]
$A_{t(kor.)}$	Tažnost korelovaná [%]
$A_{11,3}$	Tažnost pro dlouhé zkušební tyče [%]
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
F	Zatěžující síla [N]
$F_E$	Mez úměrnosti [MPa]
$F_e$	Síla na mezi kluzu [N]
$F_{eD}$	Síla na dolní mezi kluzu [N]
$F_{eH}$	Síla na horní mezi kluzu [N]
$F_m$	Síla na mez pevnosti [N]
$F_{p0,2}$	Síla na nevýrazné mezi kluzu [N]
k	Součinitel proporcionality [-]
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi trhacího zařízení [mm]
$L_i$	Okamžitá délka zkušební tyče [mm]
$L_0$	Počáteční měřená délka zkušební tyče [mm]
$L_u$	Konečná délka zkušební tyče [mm]
R	Smluvní napětí [MPa]
$R_e$	Výrazná mez kluzu [MPa]
$R_{eD}$	Dolní mez kluzu [MPa]
$R_{eH}$	Horní mez kluzu [MPa]
$R_m$	Mez pevnosti [MPa]
$R_{p0,2}$	Nevýrazná mez kluzu [MPa]
$S_i$	Okamžitý průřez zkušební tyče [mm]
$S_u$	Plocha konečného průřezu zkušební tyče [mm]
$S_0$	Plochá počátečního průřezu zkušební tyče [mm]

T	Tloušťka zkušební tyče [mm]
V	Variační koeficient [%]
$b_1$	Šířka zúžené části zkušební tyče [mm]
$b_2$	Šířka upínací části zkušební tyče [mm]
$l_1$	Délka zúžené části zkušební tyče [mm]
$l_2$	Vzdálenost mezi osazeními zkušební tyče [mm]
$l_3$	Celková délka zkušební tyče [mm]
n	Počet prvků statistického souboru [-]
r	Poloměr mezi upínací a zúženou zkušební tyče [mm]
x	Hodnoty uspořádané podle velikosti [-]
$x_i$	Prvek statistického souboru [-]
s	Směrodatná odchylka [-]
$s_{\bar{x}}$	Střední chyba průměru [-]
$s^2$	Rozptyl [-]
$\bar{x}$	Aritmetický průměr [-]
$\tilde{x}$	Medián [-]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení [%]
$\varepsilon_u$	Poměrné trvalé prodloužení [%]
$\sigma$	Skutečné tahové napětí [MPa]
$\Delta L_u$	Absolutní přírůstek počáteční měřené délky po přetržení zkušební tyče [mm]
$\Delta L$	Okamžité prodloužení zkušební tyče [mm]
$\sigma$	Skutečné tahové napětí [MPa]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 – SLA-1.....	11
Obr. 2 – RepRap 1.0 “Darwin” .....	12
Obr. 3 – Urbee.....	13
Obr. 4 – 3D vytisknutý dům.....	14
Obr. 5 – GE9X .....	15
Obr. 6 – Technologie SLA.....	18
Obr. 7 – Technologie SGC.....	19
Obr. 8 – Technologie DLP.....	20
Obr. 9 – Technologie LOM.....	21
Obr. 10 – Technologie MJM.....	22
Obr. 11 – Technologie FDM.....	23
Obr. 12 – Technologie SLS.....	24
Obr. 13 - Technologie DMLS/SLM.....	25
Obr. 14 – Technologie EBM.....	26
Obr. 15 – Schéma základních způsobů namáhání.....	29
Obr. 16 – Trhací stroj.....	30
Obr. 17 – Zkušební tyče.....	31
Obr. 18 – Základní typy pracovních diagramů .....	32
Obr. 19 – Diagramy $R/\varepsilon$ .....	34
Obr. 20 – Výrazná a nevýrazná mez kluzu .....	36
Obr. 21 – Mez pevnosti.....	37
Obr. 22 – Filamenty .....	39
Obr. 23 – Srovnání tahových diagramů různých materiálů .....	40
Obr. 24 – Zkušební tyč 1BA .....	45
Obr. 25 – Model zkušební tyče .....	46
Obr. 26 – Prusa i3 MK3 .....	47
Obr. 27 – Trhací zařízení .....	50
Obr. 28 – Nastavení průřezu zkušební tyče.....	51
Obr. 29 – Upínání zkušební tyče.....	52
Obr. 30 – Výsledek tahové zkoušky .....	52

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 – Shrnutí vybraných aditivních technologií .....	27
Tab. 2 – Rozměry zkušební tyče 1BA .....	46
Tab. 3 – Technické parametry Prusa i3 MK3 .....	47
Tab. 4 – Seznam aditivních materiálů.....	48
Tab. 5 – Tiskové parametry .....	49
Tab. 6 – Modul pružnosti PLA Filament-PM.....	55
Tab. 7 – Mez pevnosti PLA Filament-PM.....	56
Tab. 8 – Tažnost PLA Filament-PM.....	57
Tab. 9 – Modul pružnosti PLA Prusament.....	58
Tab. 10 – Mez pevnosti PLA Prusament .....	59
Tab. 11 – Tažnost PLA Prusament .....	60
Tab. 12 – Modul pružnosti PLA Fillamentum .....	61
Tab. 13 – Mez pevnosti PLA Fillamentum.....	62
Tab. 14 – Tažnost PLA Fillamentum.....	63
Tab. 15 – Shrnutí mechanických vlastností aditivních materiálů .....	69
Tab. 16 – Celkové zhodnocení testovaných materiálů.....	73

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1 – Modul pružnosti PLA Filament-PM.....	55
Graf 2 – Mez pevnosti PLA Filament-PM.....	56
Graf 3 – Tažnost PLA Filament-PM.....	57
Graf 4 – Modul pružnosti PLA Prusament .....	58
Graf 5 – Mez pevnosti PLA Prusament .....	59
Graf 6 – Tažnost PLA Prusament .....	60
Graf 7 – Modul pružnosti PLA Fillamentum.....	61
Graf 8 – Mez pevnosti PLA Fillamentum.....	62
Graf 9 – Tažnost PLA Fillamentum.....	63
Graf 10 – Modul pružnosti materiálů PLA .....	64
Graf 11 – Mez pevnosti materiálů PLA .....	65
Graf 12 – Tažnost materiálů PLA .....	65
Graf 13 – Tahový diagram materiálu PLA Filament-PM .....	66
Graf 14 – Tahový diagram materiálu PLA Prusament.....	66
Graf 15 – Tahový diagram materiálu PLA Fillamentum .....	67
Graf 16 – Ekonomické zhodnocení.....	70
Graf 17 – Zhodnocení modulů pružnosti .....	71
Graf 18 – Zhodnocení meze pevnosti .....	72
Graf 19 – Zhodnocení tažností.....	72

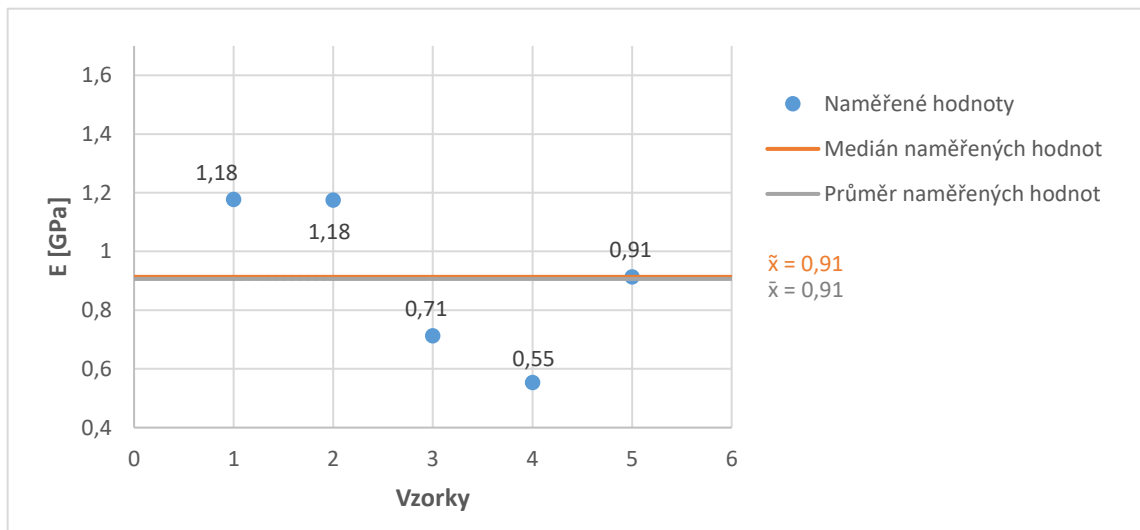
**SEZNAM PŘÍLOH**

PŘÍLOHA I	Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu ABS Devil Design
PŘÍLOHA II	Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu ABS Prusament
PŘÍLOHA III	Vyhodnocení mechanických vlastností materiálů ABS
PŘÍLOHA IV	Tahové diagramy materiálů ABS
PŘÍLOHA V	Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu ASA Filament-PM
PŘÍLOHA VI	Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu ASA Devil Design
PŘÍLOHA VII	Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu ASA Fillamentum
PŘÍLOHA VIII	Vyhodnocení mechanických vlastností materiálů ASA
PŘÍLOHA IX	Tahové diagramy materiálů ASA
PŘÍLOHA X	Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PET-G Filament-PM
PŘÍLOHA XI	Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PET-G Prusament
PŘÍLOHA XII	Statistické zpracování mechanických vlastností materiálu PET-G Spectrum
PŘÍLOHA XIII	Vyhodnocení mechanických vlastností materiálů PET-G
PŘÍLOHA XIV	Tahové diagramy materiálů PET-G

# PŘÍLOHA I: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU ABS DEVIL DESIGN

## Modul pružnosti

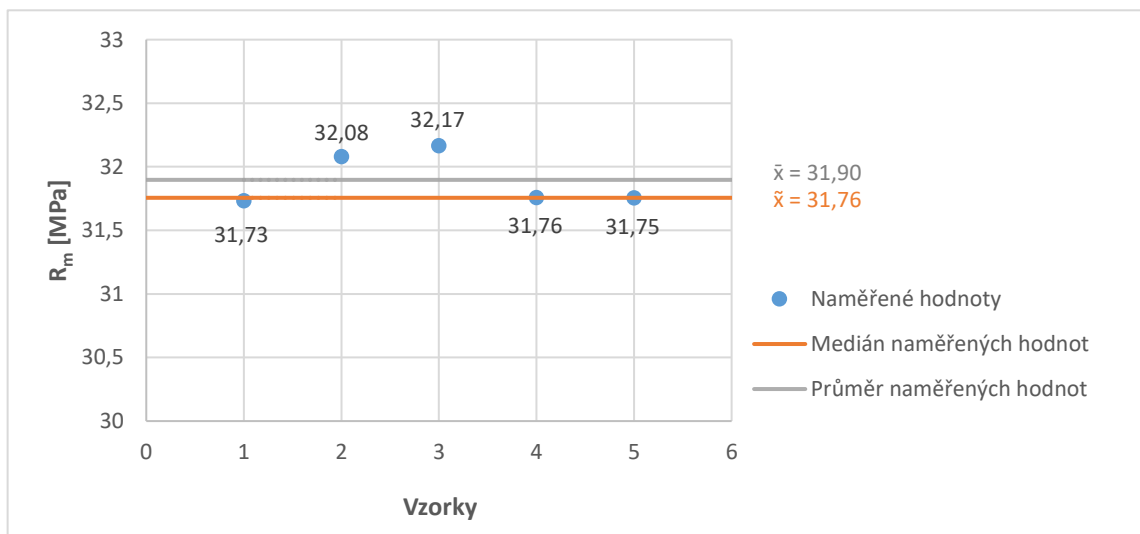
Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	0,91	GPa
Medián	0,91	GPa
Rozptyl	0,08	-
Směrodatná odchylka	0,28	-
Variační koeficient	30,59	%
Střední chyba průměru	0,12	-
Minimální hodnota	0,55	GPa
Maximální hodnota	1,18	GPa





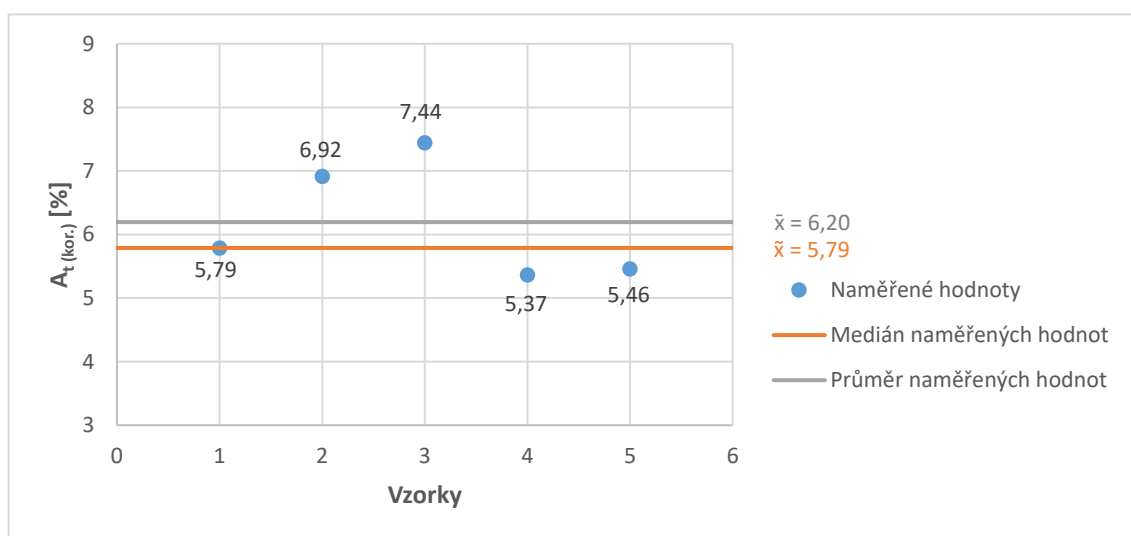
## Mez pevnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	31,90	MPa
Medián	31,76	MPa
Rozptyl	0,04	-
Směrodatná odchylka	0,21	-
Variační koeficient	0,65	%
Střední chyba průměru	0,09	-
Minimální hodnota	31,73	MPa
Maximální hodnota	32,17	MPa



## Tažnost

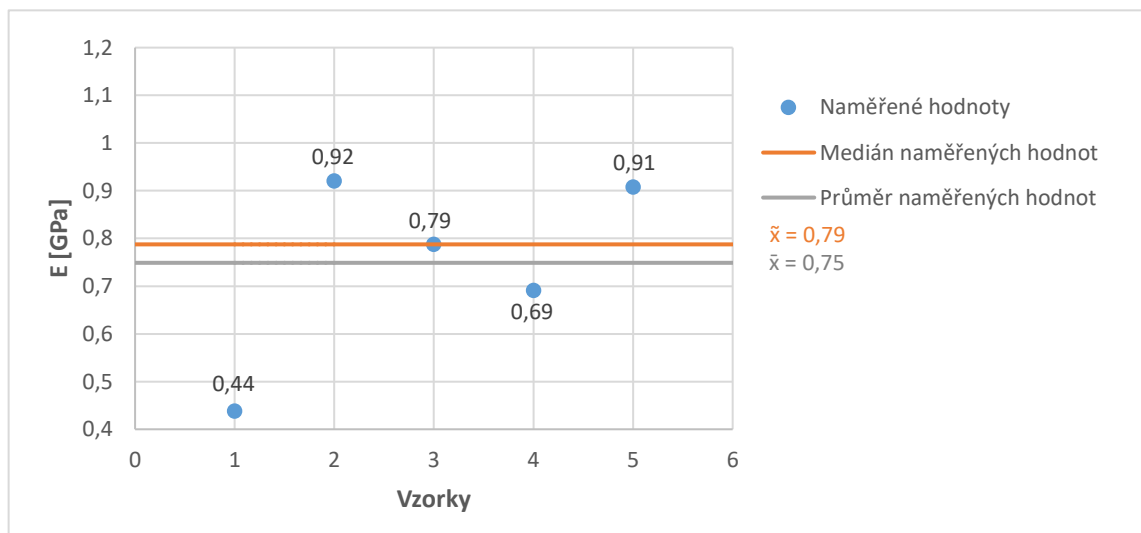
Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	6,20	%
Medián	5,79	%
Rozptyl	0,87	-
Směrodatná odchylka	0,93	-
Variační koeficient	15,02	%
Střední chyba průměru	6,20	-
Minimální hodnota	5,37	%
Maximální hodnota	7,44	%



## PŘÍLOHA II: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU ABS PRUSAMENT

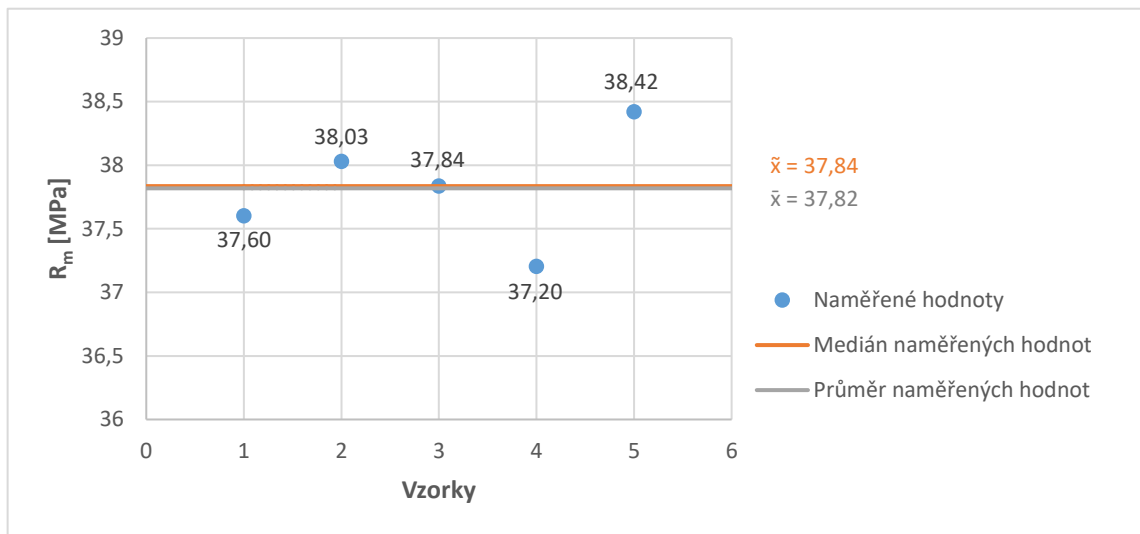
### Modul pružnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	0,75	GPa
Medián	0,79	GPa
Rozptyl	0,04	-
Směrodatná odchylka	0,20	-
Variační koeficient	26,37	%
Střední chyba průměru	0,09	-
Minimální hodnota	0,44	GPa
Maximální hodnota	0,92	GPa



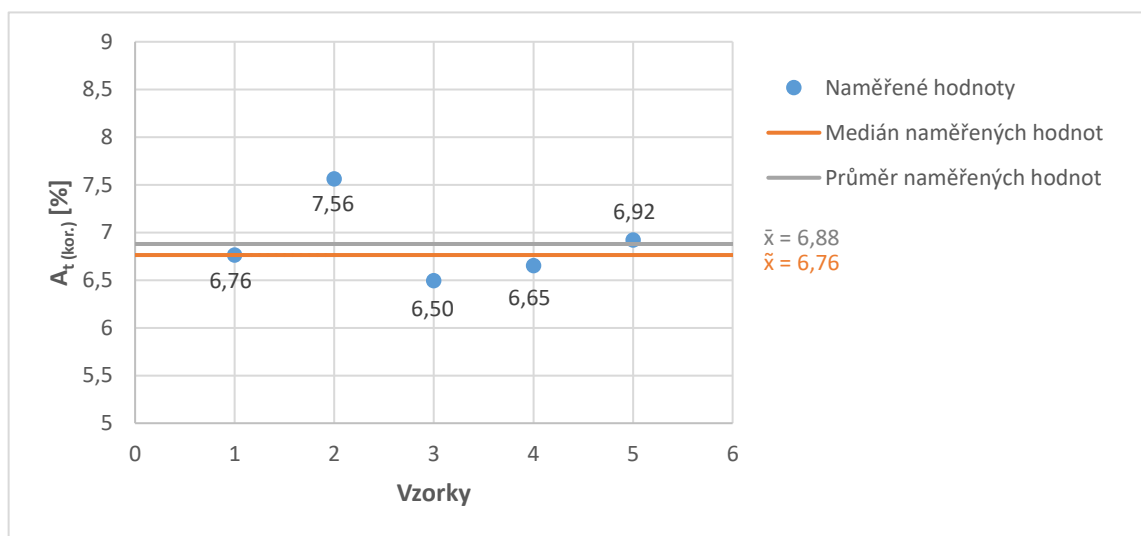
## Mez pevnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	37,82	MPa
Medián	38,84	MPa
Rozptyl	0,21	-
Směrodatná odchylka	0,46	-
Variační koeficient	1,21	%
Střední chyba průměru	0,20	-
Minimální hodnota	37,20	MPa
Maximální hodnota	38,42	MPa



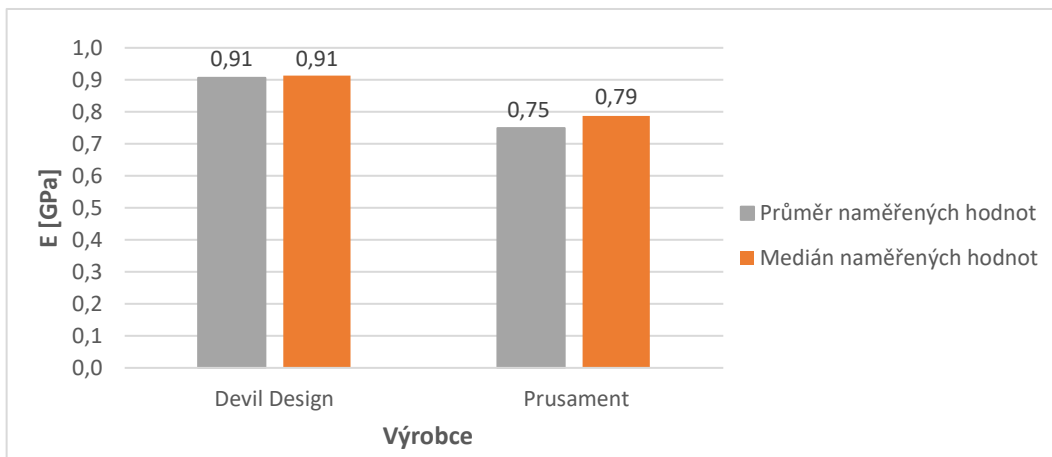
## Tažnost

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	6,88	%
Medián	6,76	%
Rozptyl	0,17	-
Směrodatná odchylka	0,41	-
Variační koeficient	5,99	%
Střední chyba průměru	0,18	-
Minimální hodnota	6,50	%
Maximální hodnota	7,56	%

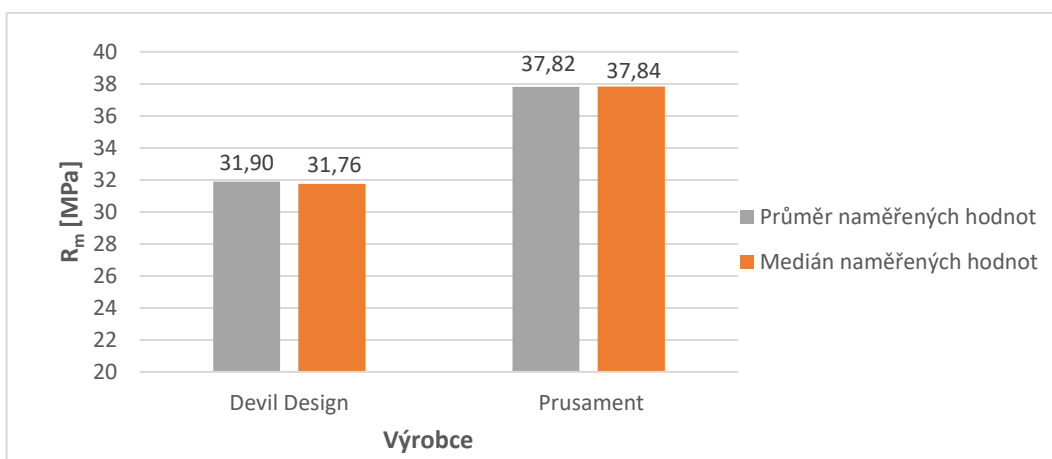


# PŘÍLOHA III: VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ ABS

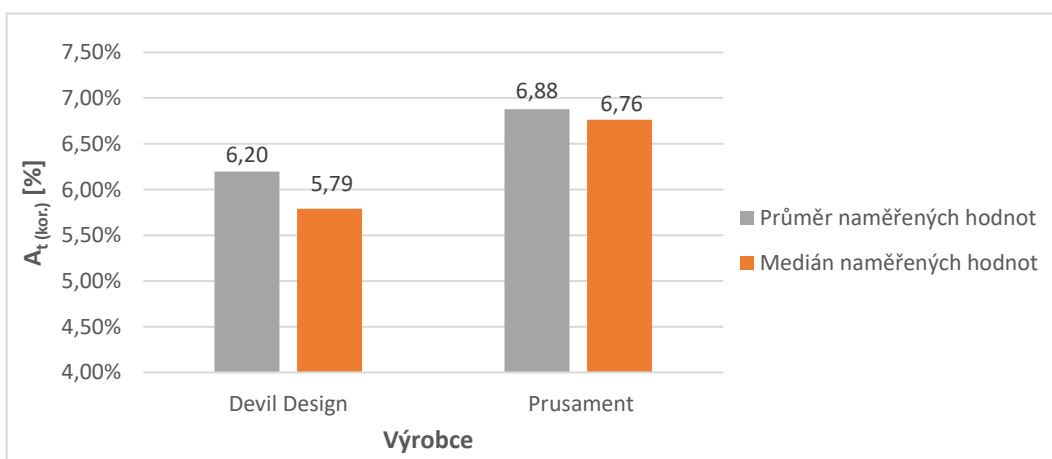
## Modul pružnosti



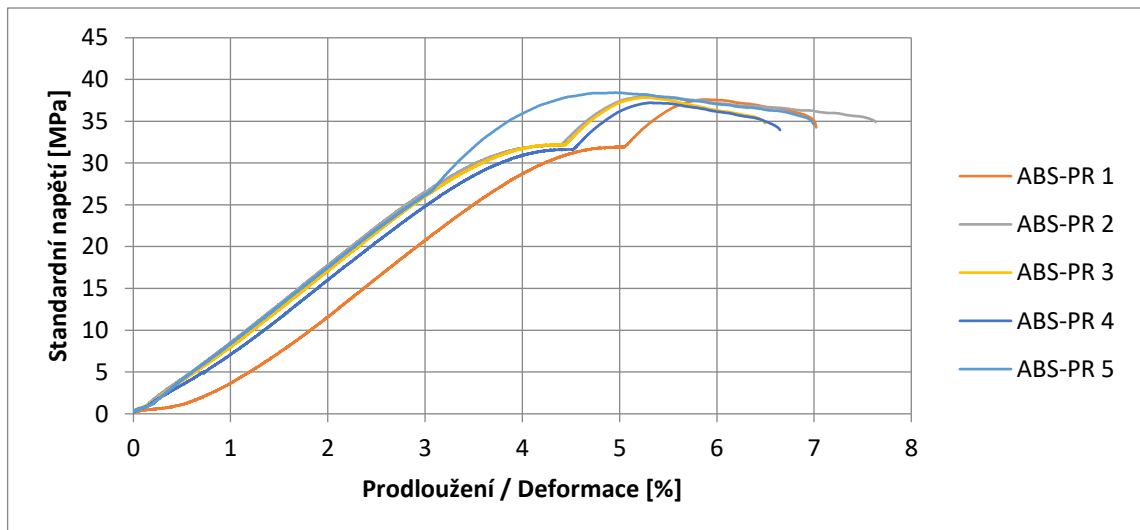
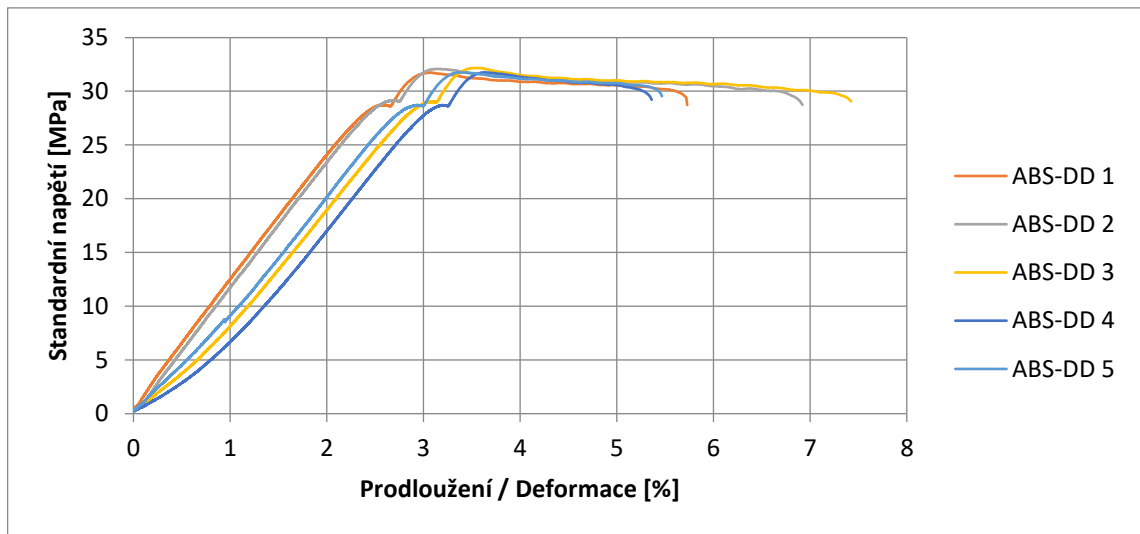
## Mez pevnosti



## Tažnost



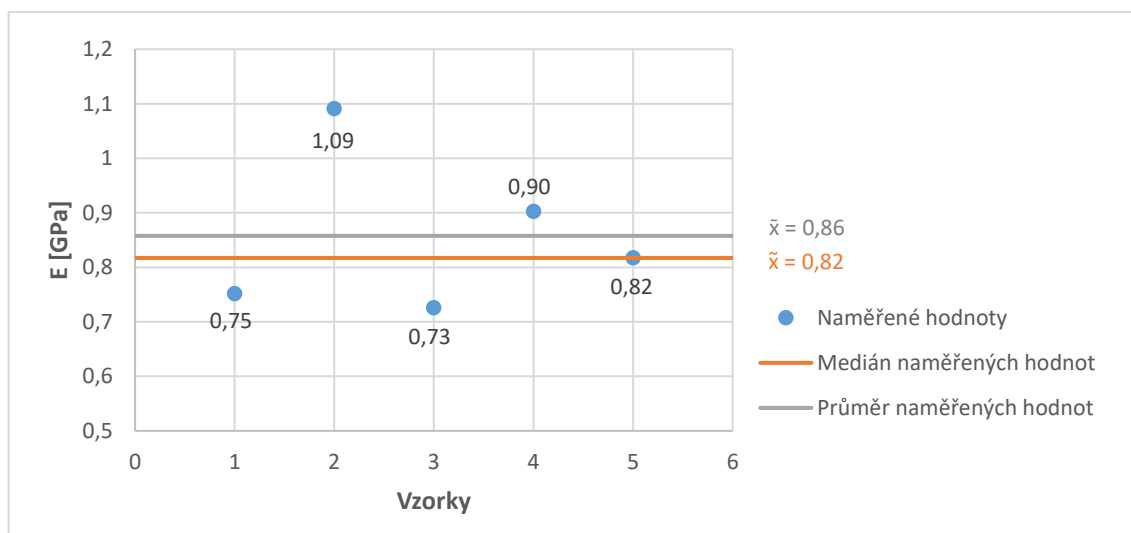
## PŘÍLOHA IV: TAHOVÉ DIAGRAMY MATERIÁLŮ ABS



## PŘÍLOHA V: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU ASA FILAMENT-PM

### Modul pružnosti

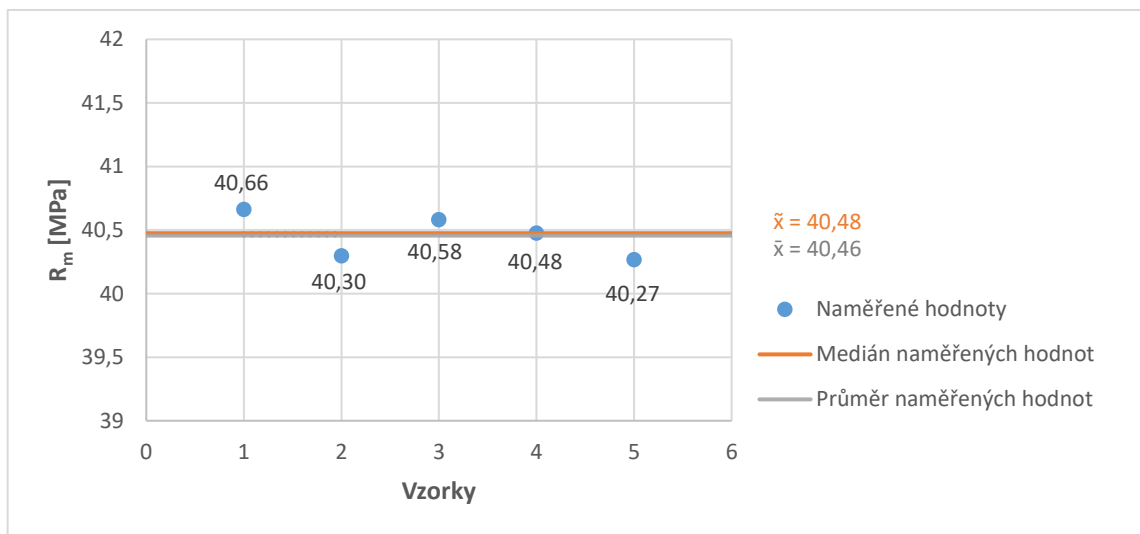
Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	0,86	GPa
Medián	0,82	GPa
Rozptyl	0,02	-
Směrodatná odchylka	0,15	-
Variační koeficient	17,16	%
Střední chyba průměru	0,07	-
Minimální hodnota	0,73	GPa
Maximální hodnota	1,09	GPa





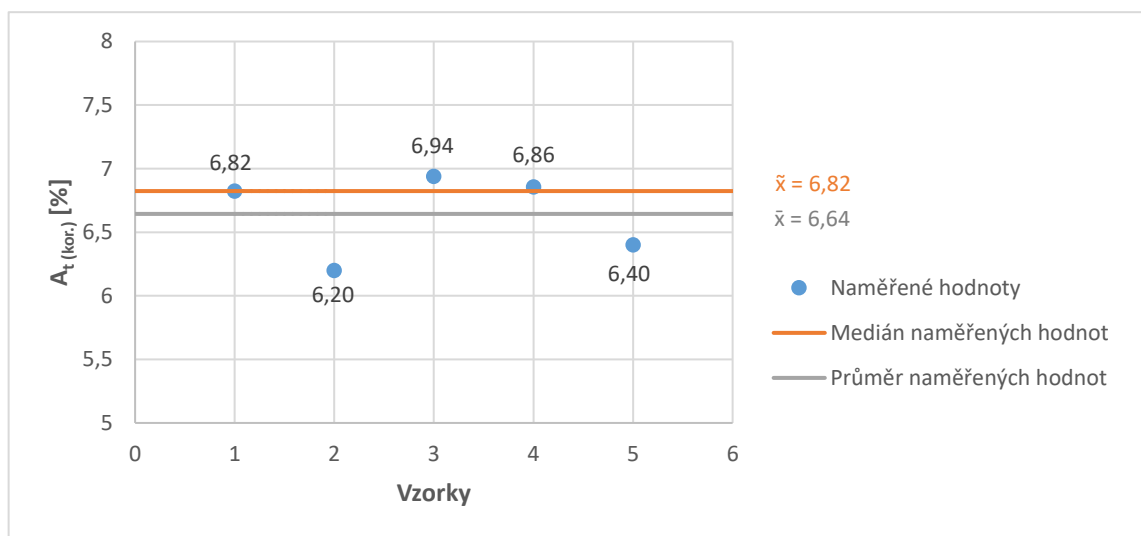
## Mez pevnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	40,46	MPa
Medián	40,48	MPa
Rozptyl	0,03	-
Směrodatná odchylka	0,17	-
Variační koeficient	0,43	%
Střední chyba průměru	0,08	-
Minimální hodnota	40,27	MPa
Maximální hodnota	40,66	MPa



## Tažnost

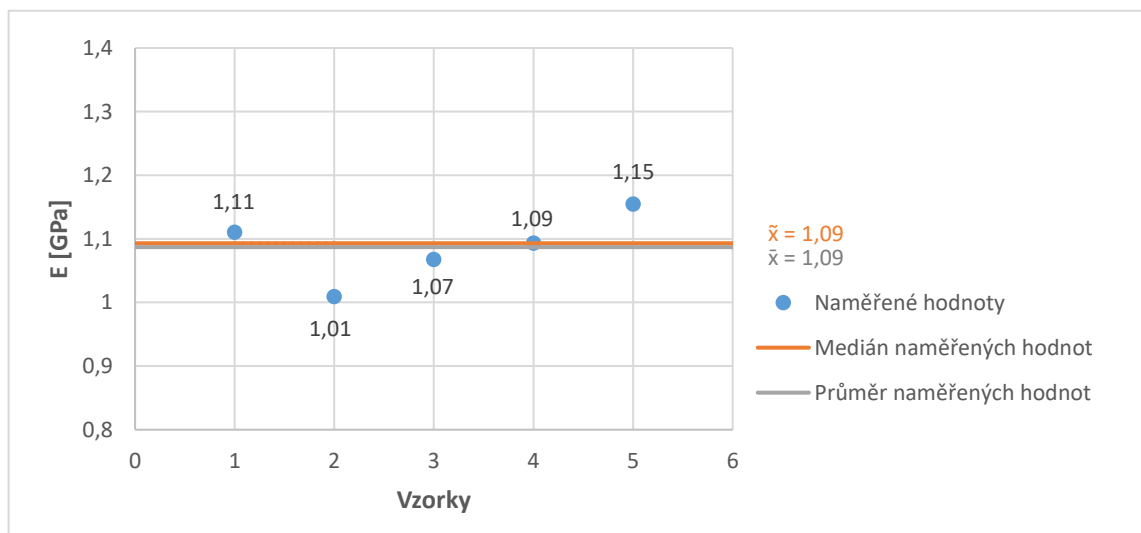
Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	6,64	%
Medián	6,82	%
Rozptyl	0,11	-
Směrodatná odchylka	0,32	-
Variační koeficient	4,88	%
Střední chyba průměru	0,15	-
Minimální hodnota	6,20	%
Maximální hodnota	6,94	%



## PŘÍLOHA VI: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU ASA DEVIL DESIGN

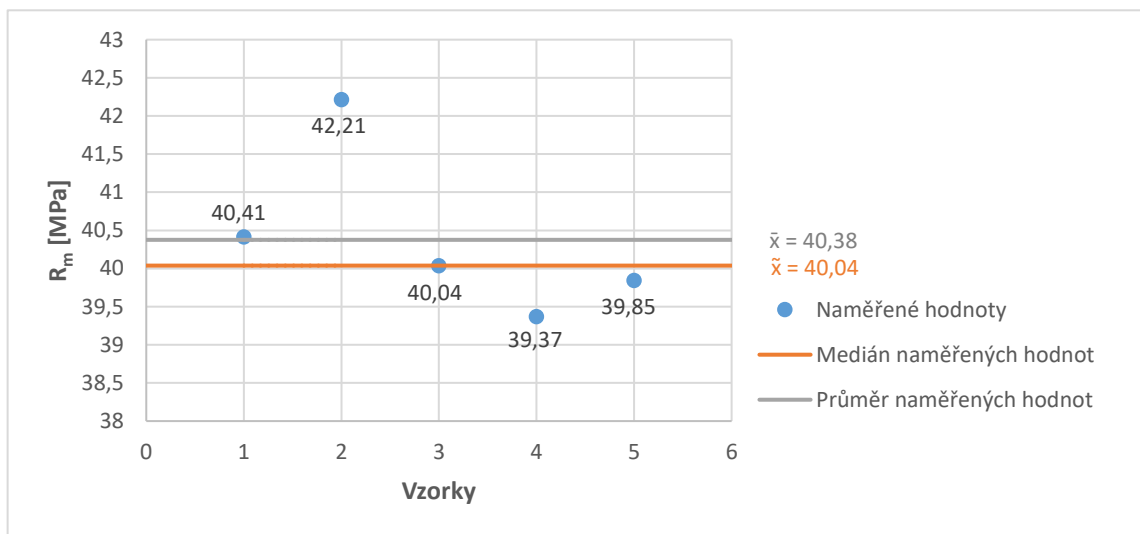
### Modul pružnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	1,09	GPa
Medián	1,09	GPa
Rozptyl	0,003	-
Směrodatná odchylka	0,05	-
Variační koeficient	4,97	%
Střední chyba průměru	0,02	-
Minimální hodnota	1,01	GPa
Maximální hodnota	1,15	GPa



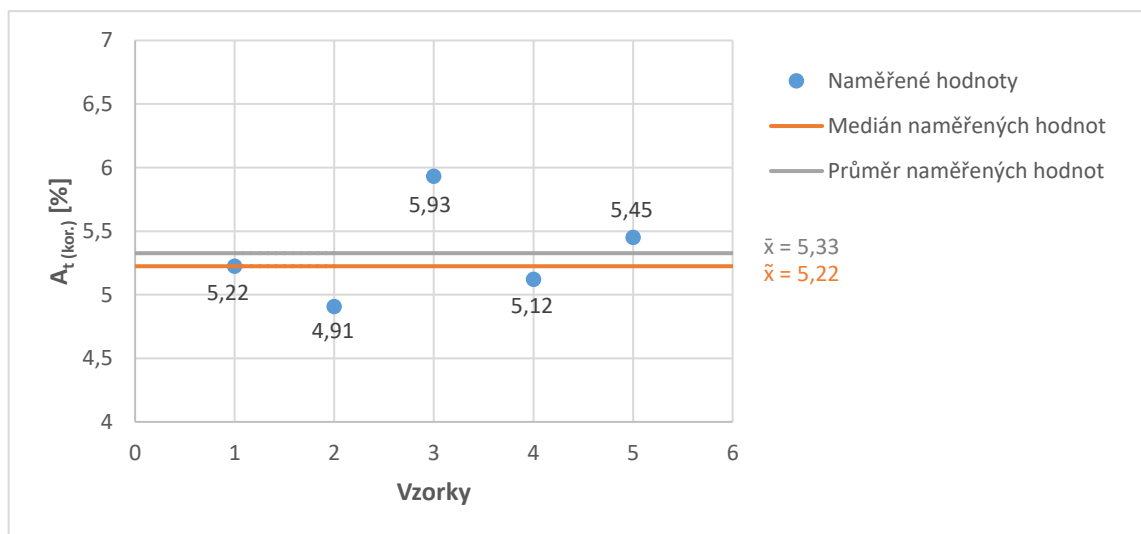
## Mez pevnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	40,38	MPa
Medián	40,04	MPa
Rozptyl	1,20	-
Směrodatná odchylka	1,09	-
Variační koeficient	2,71	%
Střední chyba průměru	0,49	-
Minimální hodnota	39,37	MPa
Maximální hodnota	42,21	MPa



## Tažnost

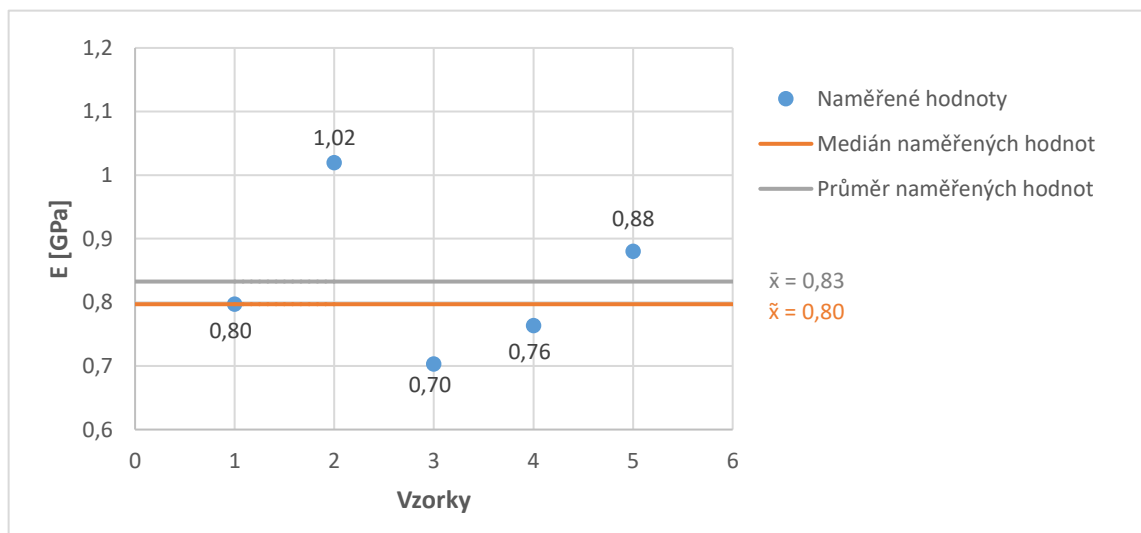
Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	5,33	%
Medián	5,22	%
Rozptyl	0,15	-
Směrodatná odchylka	0,39	-
Variační koeficient	7,34	%
Střední chyba průměru	0,17	-
Minimální hodnota	4,91	%
Maximální hodnota	5,93	%



## PŘÍLOHA VII: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU ASA FILLAMENTUM

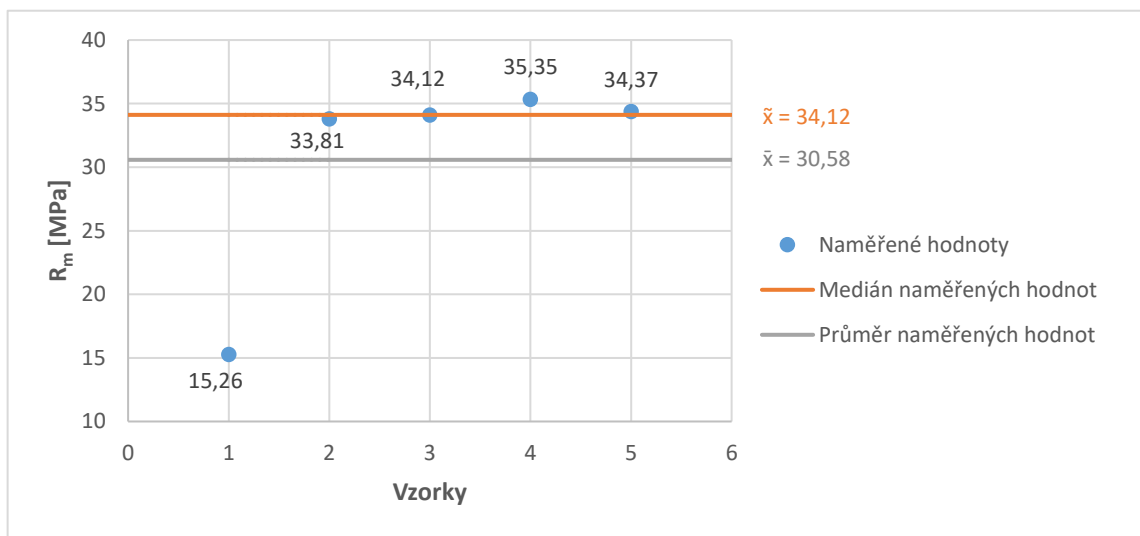
### Modul pružnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	0,83	GPa
Medián	0,80	GPa
Rozptyl	0,02	-
Směrodatná odchylka	0,12	-
Variační koeficient	14,73	%
Střední chyba průměru	0,05	-
Minimální hodnota	0,70	GPa
Maximální hodnota	1,45	GPa



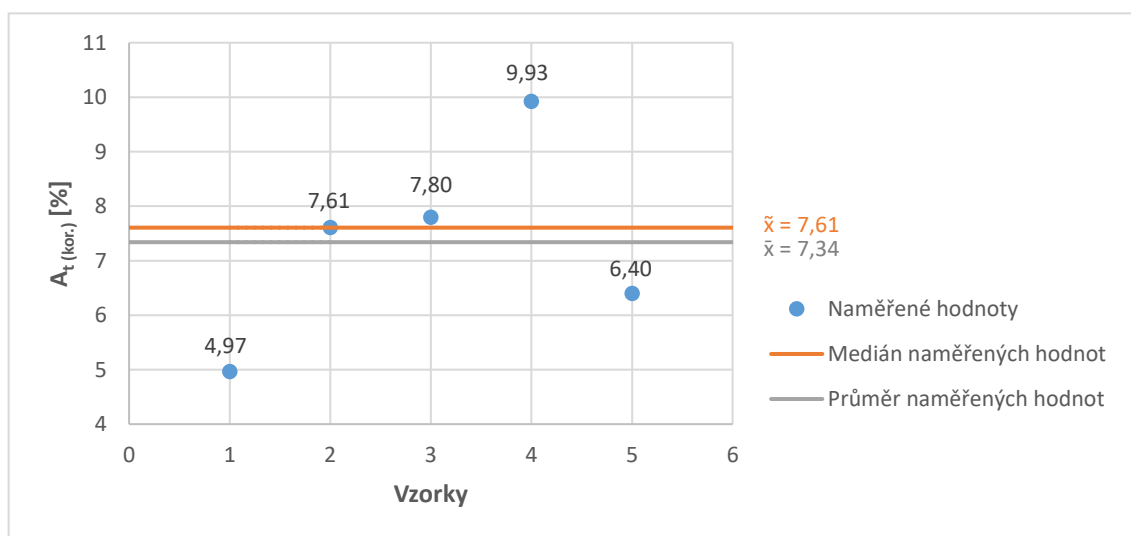
## Mez pevnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	30,58	MPa
Medián	34,12	MPa
Rozptyl	73,68	-
Směrodatná odchylka	8,58	-
Variační koeficient	28,07	%
Střední chyba průměru	3,84	-
Minimální hodnota	15,26	MPa
Maximální hodnota	35,35	MPa



## Tažnost

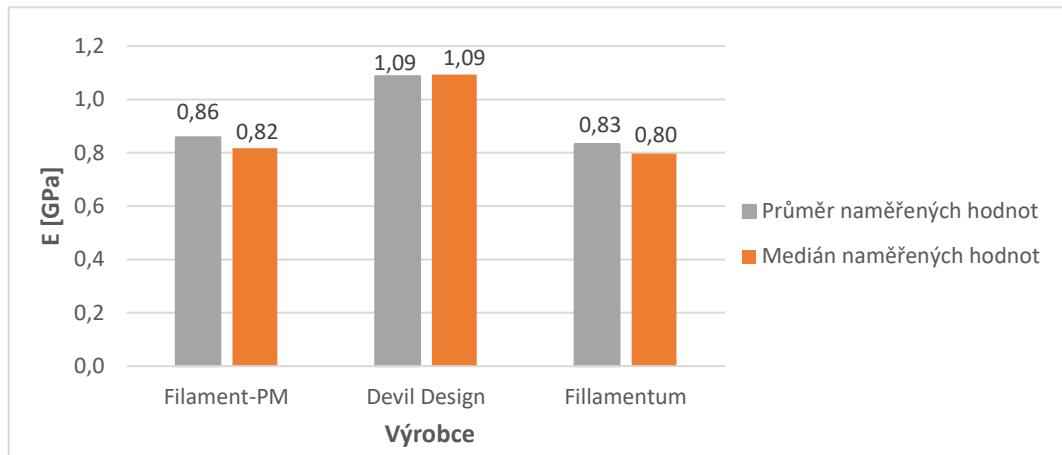
Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	7,34	%
Medián	7,61	%
Rozptyl	3,37	-
Směrodatná odchylka	1,84	-
Variační koeficient	25,02	%
Střední chyba průměru	0,82	-
Minimální hodnota	4,97	%
Maximální hodnota	9,93	%



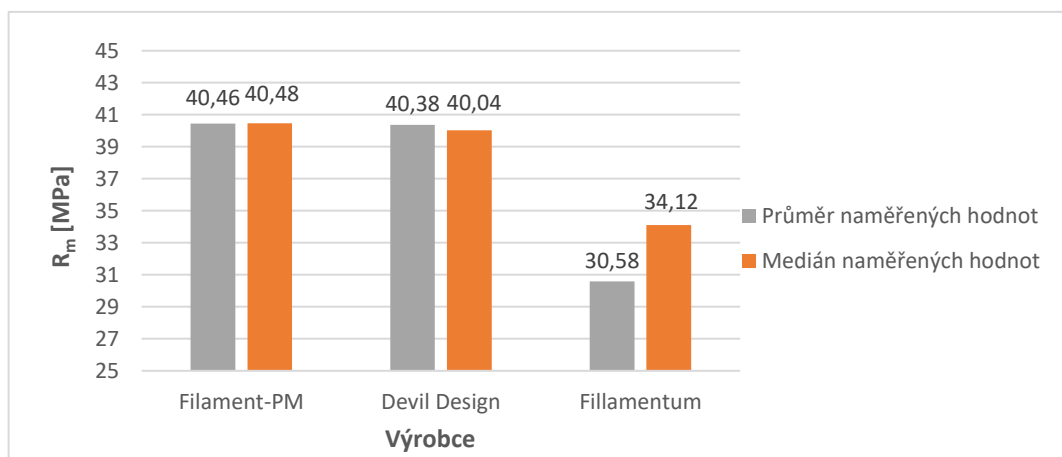


# PŘÍLOHA VIII: VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ ASA

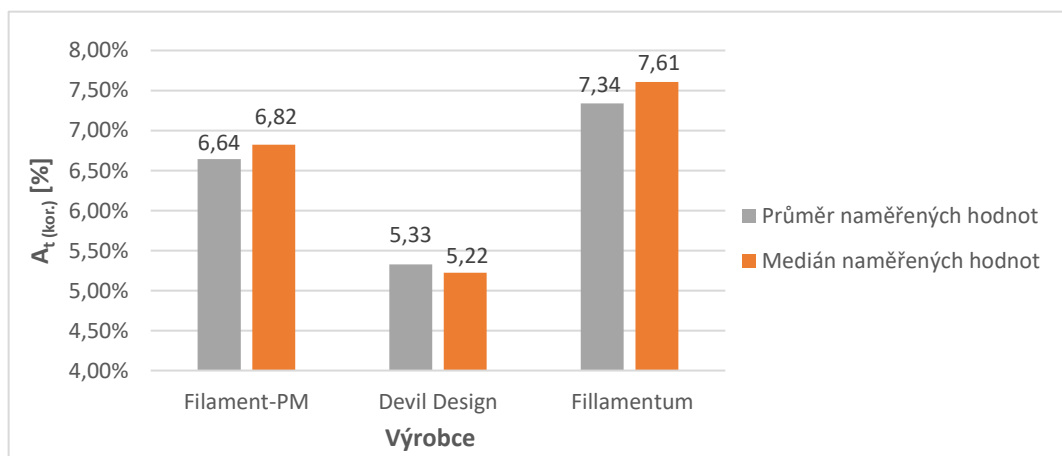
## Modul pružnosti



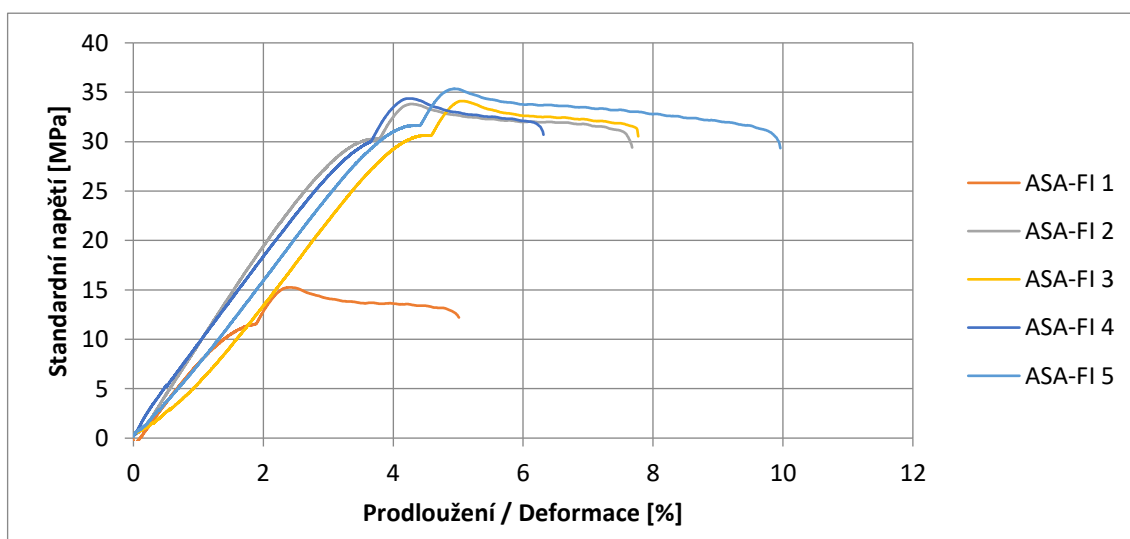
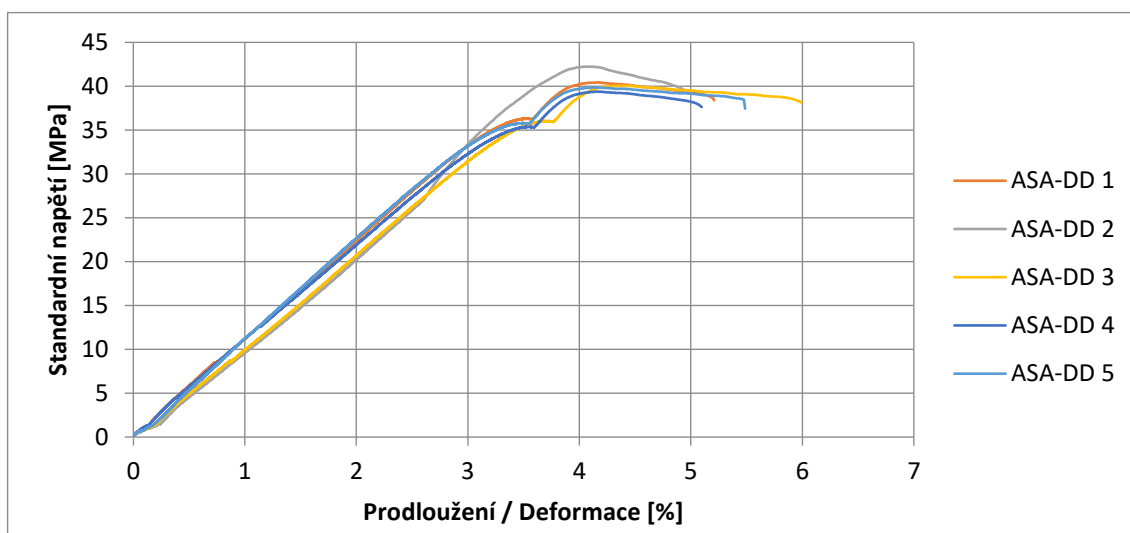
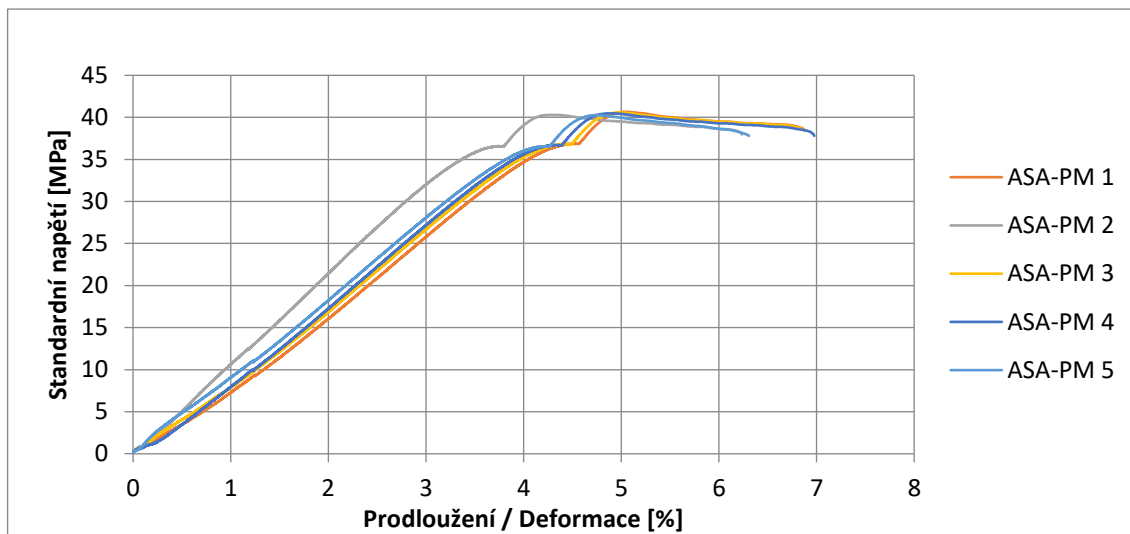
## Mez pevnosti



## Tažnost



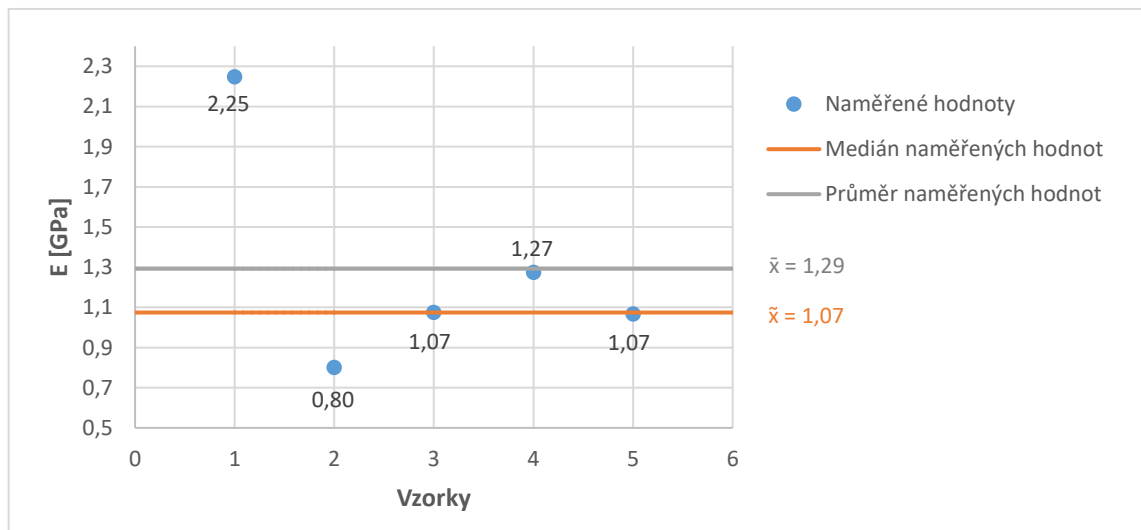
## PŘÍLOHA IX: TAHOVÉ DIAGRAMY MATERIÁLŮ ASA



# PŘÍLOHA X: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU PET-G FILAMENT-PM

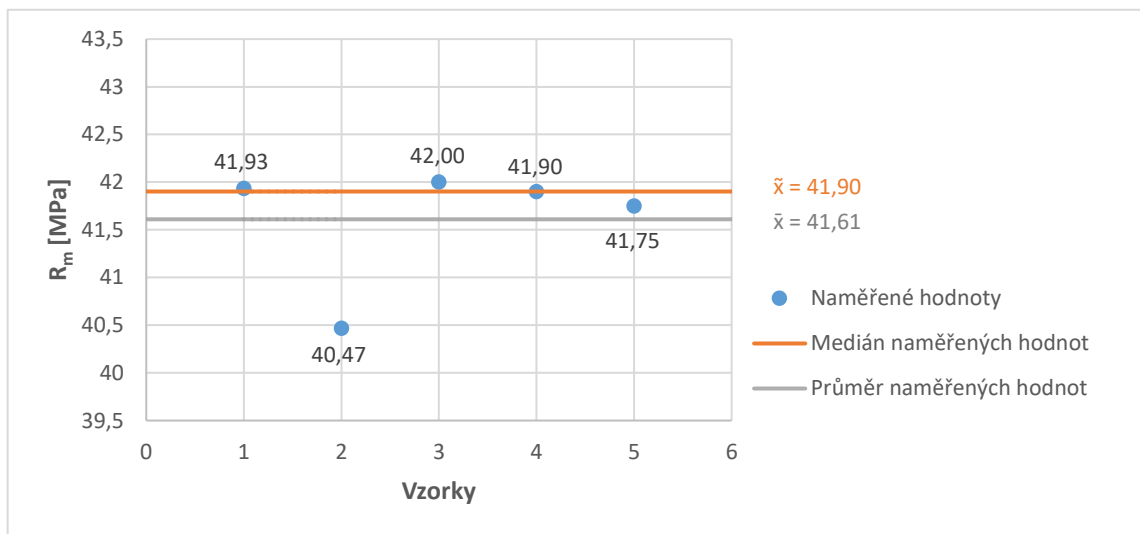
## Modul pružnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	1,29	GPa
Medián	1,07	GPa
Rozptyl	0,31	-
Směrodatná odchylka	0,56	-
Variační koeficient	43,29	%
Střední chyba průměru	0,25	-
Minimální hodnota	0,80	GPa
Maximální hodnota	2,25	GPa



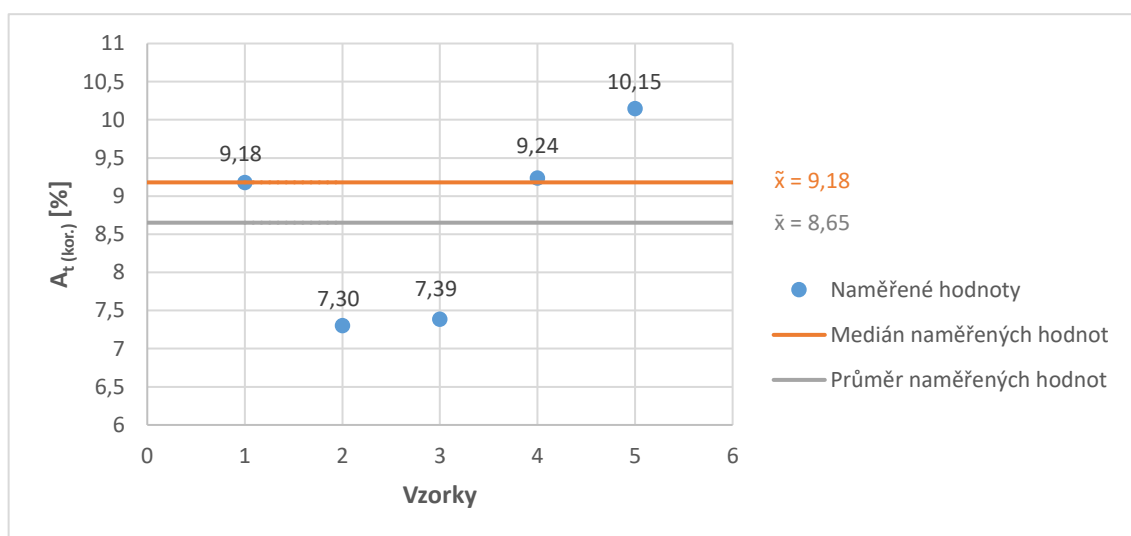
## Mez pevnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	41,61	MPa
Medián	41,90	MPa
Rozptyl	0,42	-
Směrodatná odchylka	0,65	-
Variační koeficient	1,55	%
Střední chyba průměru	0,29	-
Minimální hodnota	40,47	MPa
Maximální hodnota	42,00	MPa



## Tažnost

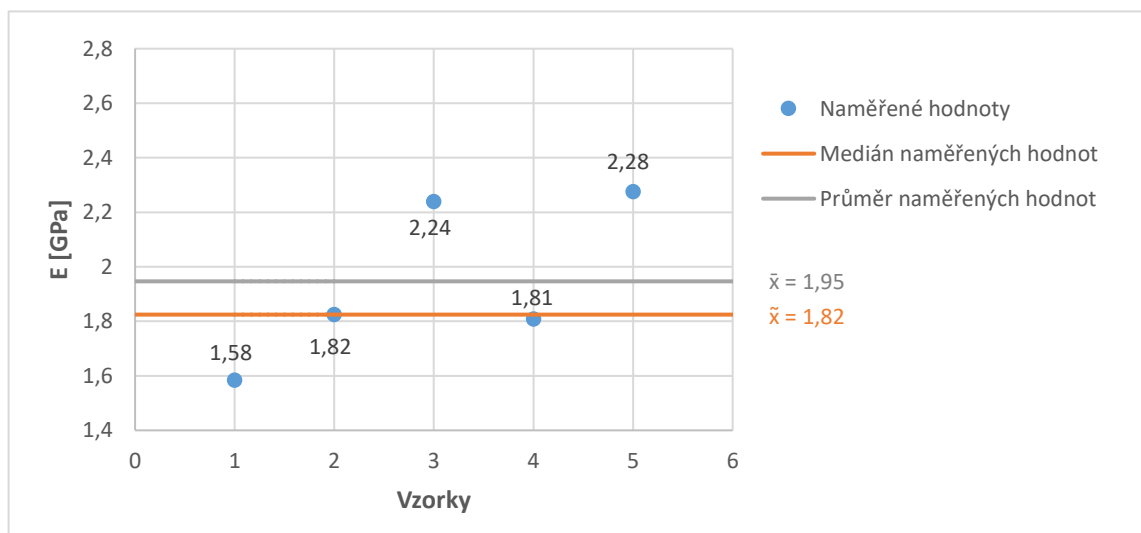
Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	8,65	%
Medián	9,18	%
Rozptyl	1,57	-
Směrodatná odchylka	1,25	-
Variační koeficient	14,48	%
Střední chyba průměru	0,56	-
Minimální hodnota	7,30	%
Maximální hodnota	10,15	%



# PŘÍLOHA XI: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU PET-G PRUSAMENT

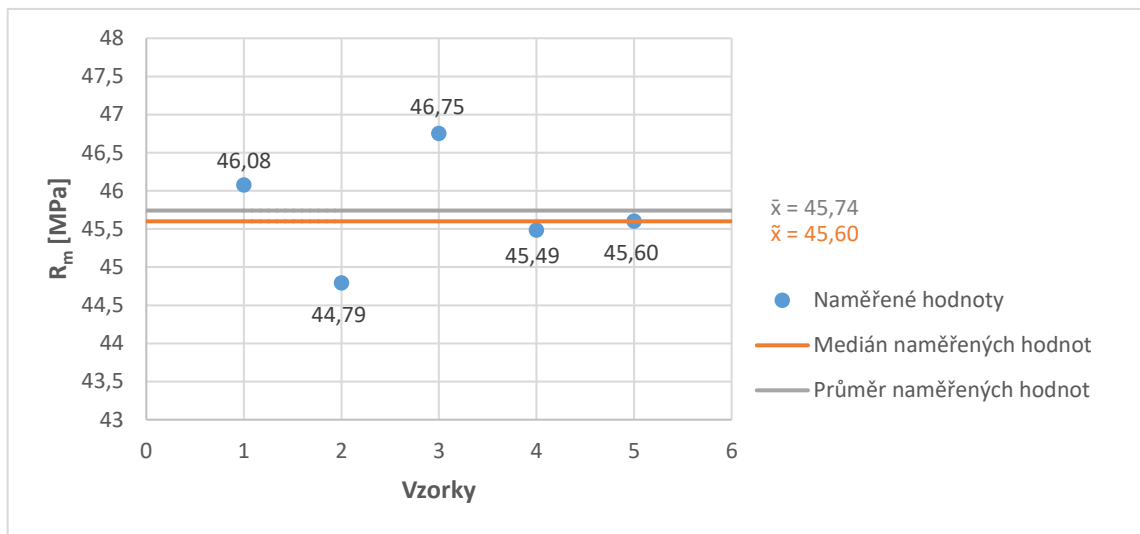
## Modul pružnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	1,95	GPa
Medián	1,82	GPa
Rozptyl	0,09	-
Směrodatná odchylka	0,30	-
Variační koeficient	15,39	%
Střední chyba průměru	0,13	-
Minimální hodnota	1,58	GPa
Maximální hodnota	2,28	GPa



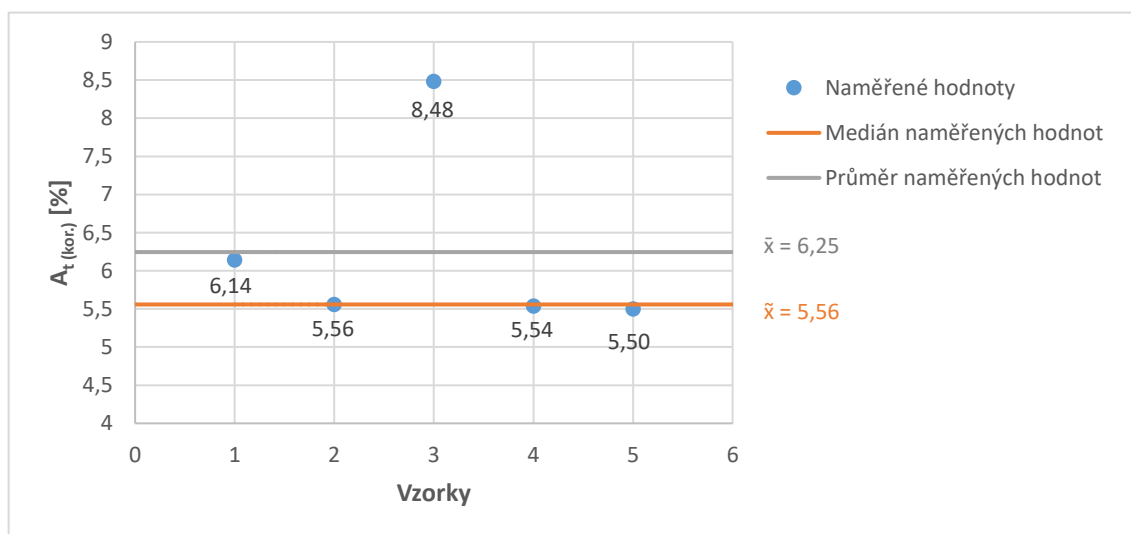
## Mez pevnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	45,74	MPa
Medián	45,60	MPa
Rozptyl	0,53	-
Směrodatná odchylka	0,73	-
Variační koeficient	1,59	%
Střední chyba průměru	0,33	-
Minimální hodnota	44,79	MPa
Maximální hodnota	46,75	MPa



## Tažnost

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	6,25	%
Medián	5,56	%
Rozptyl	1,64	-
Směrodatná odchylka	1,28	-
Variační koeficient	20,48	%
Střední chyba průměru	0,57	-
Minimální hodnota	5,50	%
Maximální hodnota	8,48	%

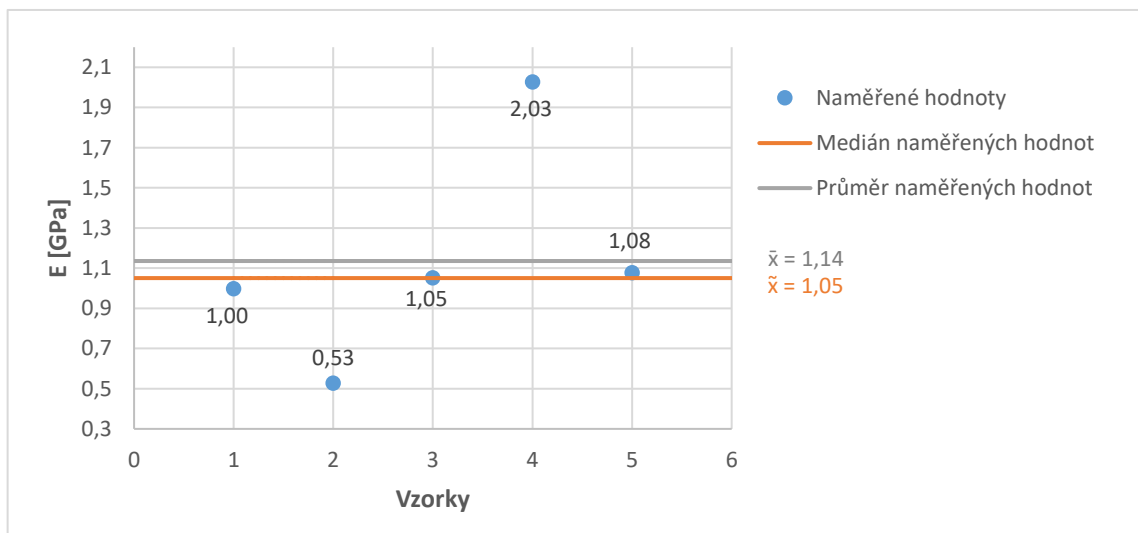




## PŘÍLOHA XII: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU PET-G SPECTRUM

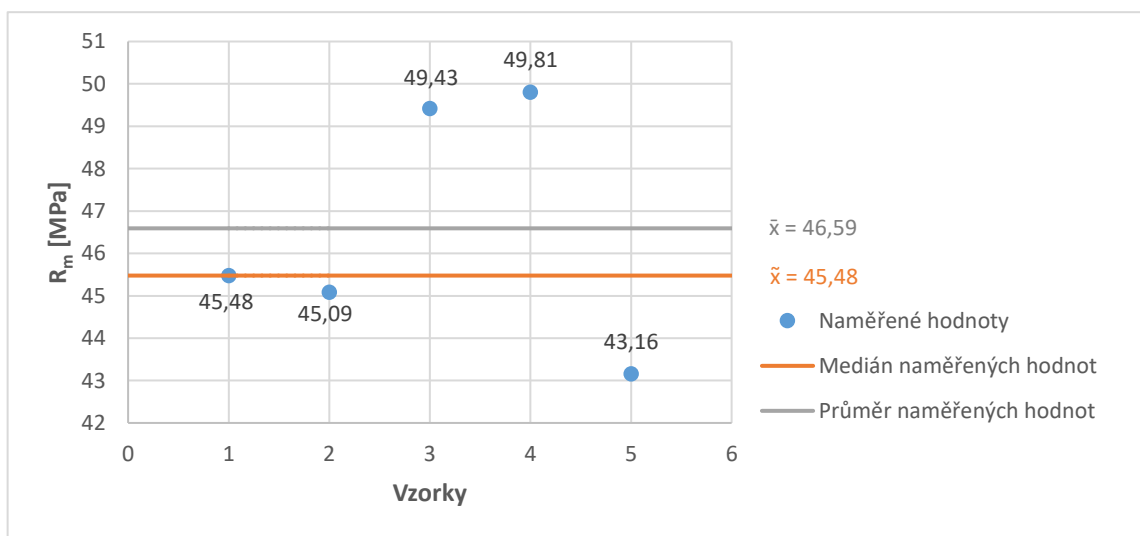
### Modul pružnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	1,14	GPa
Medián	1,05	GPa
Rozptyl	0,30	-
Směrodatná odchylka	0,55	-
Variační koeficient	48,08	%
Střední chyba průměru	0,24	-
Minimální hodnota	0,53	GPa
Maximální hodnota	2,03	GPa



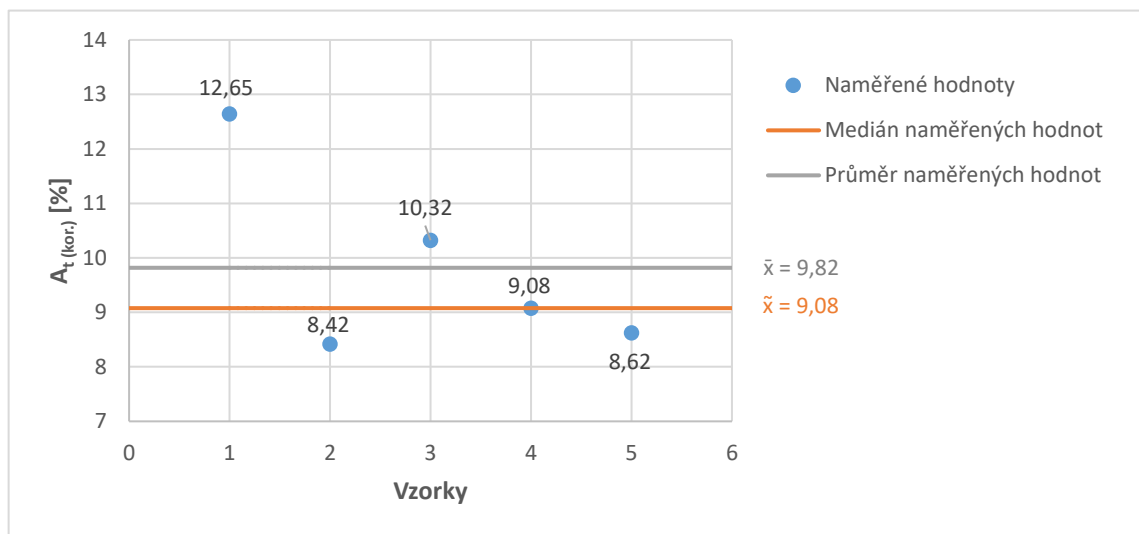
## Mez pevnosti

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	46,59	MPa
Medián	45,48	MPa
Rozptyl	8,42	-
Směrodatná odchylka	2,90	-
Variační koeficient	6,23	%
Střední chyba průměru	1,30	-
Minimální hodnota	43,16	MPa
Maximální hodnota	49,81	MPa



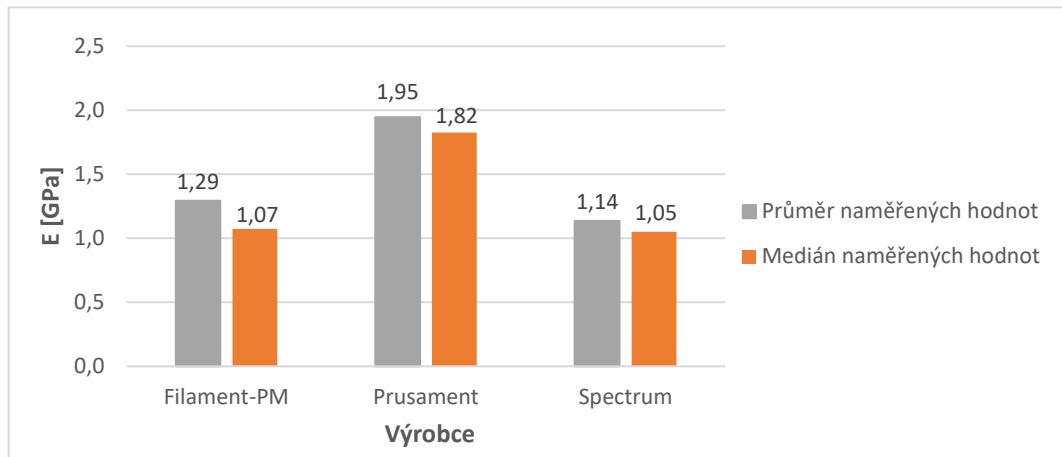
## Tažnost

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr	9,82	%
Medián	9,08	%
Rozptyl	3,05	-
Směrodatná odchylka	1,75	-
Variační koeficient	17,78	%
Střední chyba průměru	0,78	-
Minimální hodnota	8,62	%
Maximální hodnota	12,65	%

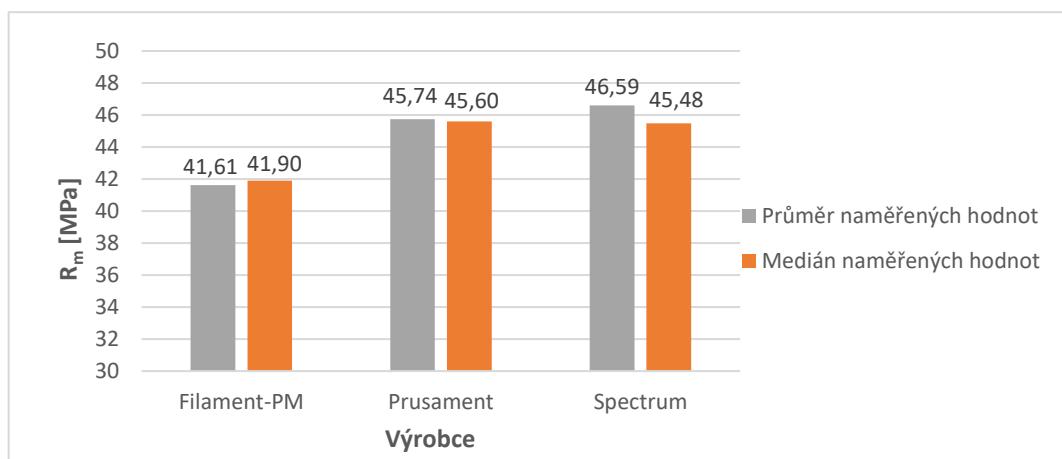


# PŘÍLOHA XIII: VYHODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ PET-G

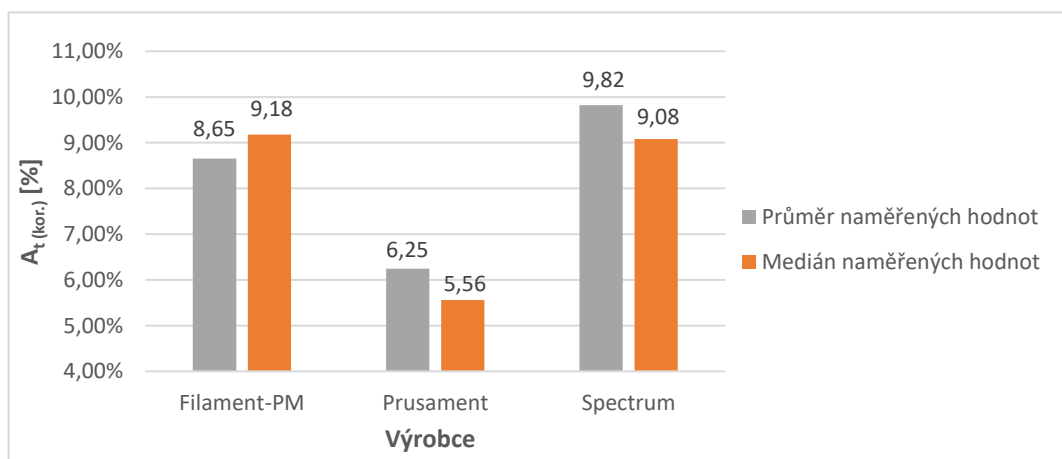
## Modul pružnosti



## Mez pevnosti



## Tažnost



## PŘÍLOHA XIV: TAHOVÉ DIAGRAMY MATERIÁLŮ PET-G

