



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## TEMPEROVÁNÍ VÝROBKŮ 3D FDM TISKU

TEMPERING OF 3D FDM PRINTED PARTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Macháček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadání bakalářské práce

|                   |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| Ústav:            | Ústav strojírenské technologie     |
| Student:          | <b>Jan Macháček</b>                |
| Studijní program: | Strojírenství                      |
| Studijní obor:    | Základy strojírenského inženýrství |
| Vedoucí práce:    | <b>Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.</b>    |
| Akademický rok:   | 2020/21                            |

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

## Temperování výrobků 3D FDM tisku

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student nejprve zpracuje rešerši problematiky temperování pastových tištěných dílů vyrobených na 3D fdm tiskárnách. Následně navrhne experiment. Zvolí vhodné materiály a provede potřebné testy. Vyhodnocení bude provedeno zejména zkouškami mechanických vlastností. V závěru pak bude provedeno technicko–ekonomické zhodnocení a doporučení autora pro využití v praxi.

### Cíle bakalářské práce:

- rešerše problematiky temperování plastových 3D FDM tištěných dílů
- návrh experimentu
- provedení experimentu
- vyhodnocení experimentální části
- technicko–ekonomické hodnocení

### Seznam doporučené literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská–Technická univ., 2002. 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007. 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se nejdříve zabývá 3D tiskem metodou FDM, posuje jednotlivé komponenty tiskárny, přehled nejběžnějších materiálů a teorii temperování 3D výtisků. Praktická část zahrnuje návrh experimentu, výsledky měření a ekonomické a funkční zhodnocení výsledků.

### **Klíčová slova**

3D tisk, temperování, zkouška mechanických vlastností, PLA

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis covers 3D printing methods, parts of a 3D printer, materials used to 3D print and the theoretical part of tempering 3D printed parts. The practical part consists of designing the experiment, results of tests and an economical and functional evaluation.

### **Key words**

3D printing, tempering, test of mechanical properties, PLA

## **Bibliografická citace**

MACHÁČEK, Jan. *Temperování výrobků 3D FDM tisku* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/131827>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Temperování výrobků 3D FDM tisku** vypracoval/la samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jan Macháček

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doktorovi Oskarovi Zemčíkovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za asistenci při provádění zkoušek.

**OBSAH**

|  |    |
|--|----|
| OBSAH.....   | 7  |
| ÚVOD.....  | 8  |
| 1 TEORETICKÝ ÚVOD.....                                 | 9  |
| 1.1 Metoda FDM.....                                    | 9  |
| 1.1.1 Přehled fyzických komponent FFF 3D tiskárny..... | 11 |
| 1.1.2 Softwarová část tiskárny.....                    | 14 |
| 1.1.3 Nejběžnější druhy materiálu.....                 | 14 |
| 1.2 Proces temperování PLA.....                        | 15 |
| 2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....                      | 18 |
| 2.1 Volba materiálu.....                               | 18 |
| 2.1.1 Fillamentum.....                                 | 18 |
| 2.1.2 Volcano PLA.....                                 | 18 |
| 2.1.3 Fibrology.....                                   | 19 |
| 2.2 Tisk vzorků.....                                   | 19 |
| 2.3 Temperování.....                                   | 20 |
| 2.4 Vysoušení vzorků.....                              | 21 |
| 2.5 Zkouška houževnatosti.....                         | 21 |
| 2.6 Zkouška meze napětí v tahu.....                    | 24 |
| 3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....                                 | 25 |
| 3.1 Vysoušení vzorků.....                              | 25 |
| 3.2 Naměřené hodnoty tahové zkoušky.....               | 33 |
| 4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKU EXPERIMENTU.....                 | 42 |
| 4.1 Předpokládané zjištění.....                        | 42 |
| 4.2 Vliv temperování na houževnatost.....              | 42 |
| 4.3 Vliv temperování na pevnost v tahu.....            | 42 |
| 4.4 Tvarová stálost.....                               | 43 |
| 4.5 Vizuální vzhled.....                               | 43 |
| 5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....                           | 45 |
| 5.1 Cenové zhodnocení temperování.....                 | 45 |
| 5.2 Cenové zhodnocení materiálu.....                   | 45 |
| ZÁVĚR.....   | 46 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....                         | 47 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....                          | 50 |

## ÚVOD

V posledních letech se 3D tisk dostává do širokého povědomí veřejnosti. Téměř každý již o 3D tisku slyšel, v současné době je možné si 3D tiskárnu pořídit za několik tisíc. Obsluha a údržba takovýchto strojů se stala tak snadnou, že nejsou třeba žádné technické znalosti. Tento fakt zapříčinilo primárně vypršení patentu Chucka Hulla, který si patentoval v roce 1986. [1]

Vývoj 3D tisku napomohl vzniku technologie Rapid Prototyping (rychlé vytváření prototypů), které nalézá využití v široké škále technických disciplín od slévárenství až po konstruktérství. [2; 3]

V současné době se stává nejrozšířenějším materiálem PLA (kyselina polymléčná). Mezi pozitivní vlastnosti tohoto materiálu se řadí nízká cena, jednoduchá tisknutelnost a schopnost tisknout vysoké detaily. Kombinace těchto vlastností zapříčinila jeho značné rozšíření mezi běžné uživatele. Jeho největšími nevýhodami jsou špatné mechanické vlastnosti, nízká tepelná odolnost a biodegradabilita. Primárně špatné mechanické vlastnosti zapříčiňují špatné využití v technické praxi, proto se jeho využití omezuje na modely, figurky a jiné ozdoby.

Úkolem této práce je najít optimální proces tepelné úpravy, který by tento problém vyřešil a vytipovat materiály, které jsou k tomu vhodné. Testované vlastnosti budou houževnatost a mez pevnosti v tahu, protože tyto vlastnosti jsou u mých výtisků z PLA nejvíce limitující. Důležité je také najít vhodné využití takovýchto výtisků a určit ekonomické srovnání s PLA výtisky bez tepelné úpravy.



## 1 TEORETICKÝ ÚVOD

Teoretický úvod obsahuje obecné seznámení s metodou FDM a následně seznamuje čtenáře s teorií temperování 3D výtisků.

Spousta informací v nadcházející kapitole vychází z mých vlastních zkušeností s 3D tiskem a jsou považovány za obecné povědomí 3D tiskařů.

### 1.1 Metoda FDM

Vzorky použité v této bakalářské práci jsou vytištěny metodou nazývanou FFF (fused filament fabrication – výroba tavenými vlákny) nebo také FDM (fused deposition modeling – modelování ukládáním tavenin). V procesu tisku touto metodou je zaveden filament neboli tisková struna do tiskové hlavy zvané extruder, kde motor tlačí filament do hotendu a tam je filament taven. Natavený filament je vytačen přes trysku nejprve na vyhřívanou podložku, poté na již vytištěné vrstvy. Tento jev je patrný na obrázku 1. [4; 5]

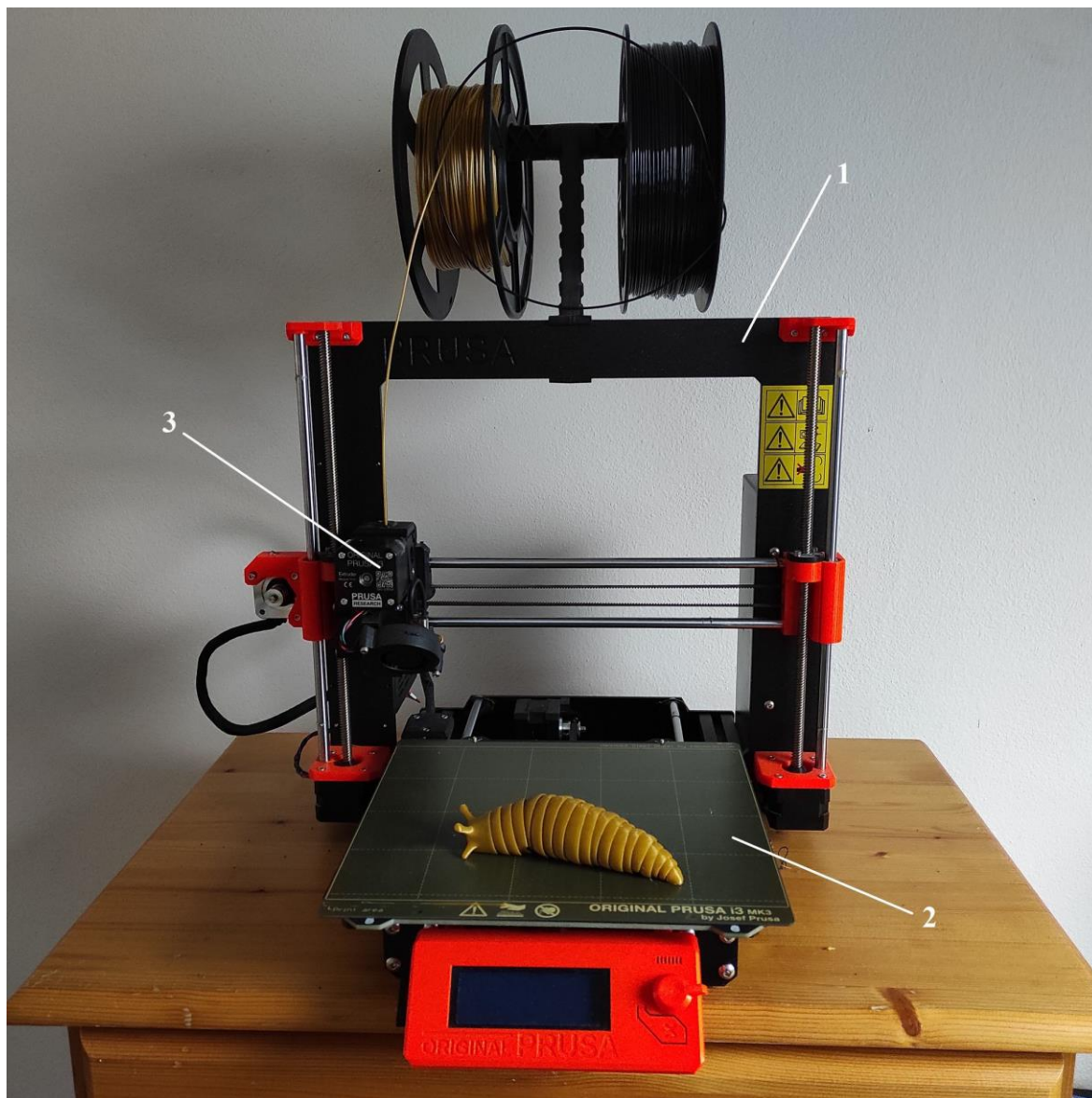


Obr. 1 Detail modelu tištěného FFF metodou. [6]

Výhoda této metody spočívá v její relativní jednoduchosti. K plně funkční tiskárně není třeba mnoho komponent, ceny filamentů začínají velmi nízko a je možné touto metodou tisknout širokou škálu plastů. [4; 5]

Hlavní nevýhodou této metody je složité vytváření převisů. Pokud je natavený materiál nanášen na místa, kde není ničím podepřen nebo na místa s velkým úhlem převisu, dochází působením gravitace k deformaci ještě nataveného plastu. Tento jev je možné kompenzovat vhodným navržení modelu, u kterého jsou převisy minimální nebo přizpůsobením tiskových parametrů v problematických místech například snížením tiskové rychlosti a zvýšením rychlosti ventilátoru. Další možností je generování podpěr, které budou z vytištěného objektu odstraněny a slouží pouze jako podpora pro převisy. [5]

3D tiskárnu můžeme rozdělit na fyzickou část a softwarovou. Fyzickou tiskárnu můžeme vidět na obrázku 2.



Obr. 2 3D tiskárna, 1 – rám stroje, 2- heatbed, 3 – extruder.

### 1.1.1 Přehled fyzických komponent FFF 3D tiskárny

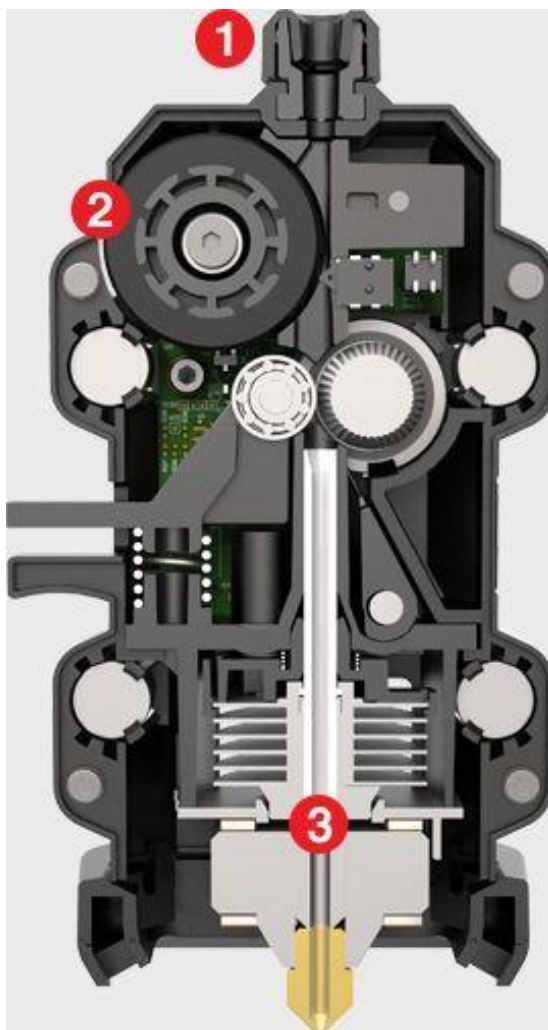
Většina FFF tiskáren obsahuje:

- Rám tiskárny
- Základní desku
- Extruder
- Krokové motory
- Heat bed
- Spojovací prvky
- Zdroj

Rám tiskárny je nejčasněji z kovu, nejběžněji je použit hliník, v minulosti se používaly ocelové tyče malých průměrů. Významné výhody kovových rámu jsou vysoká tuhost a přesnost. Sériově vyráběné rámy jsou méně často vyráběny z akrylu, který neposkytuje takovou tuhost. Průmyslové tiskárny často disponují oplechováním a plexisklem, což poskytuje ochranu před prachem a zajišťuje držení tepla. Zadržení tepla je důležité, protože některé materiály mají vysokou teplotní roztažnosti a objekty z nich tištěné mají tendence se deformovat. Po funkčním rámu je požadováno, aby zamezoval přenosu vibrací, nedeformoval se a nevytvářel vůle. [4; 5]

Heatbed (vyhřívané lože) je podložka, na kterou tiskárna tiskne. U většiny tisků je třeba vyhřívat podložku. Při tisku první vrstvy na chladnou podložku dochází k nepřilnavosti výtisku, takže se během tisku může výtisk uvolnit. U velkých výtisků může dojít k tzv. warpingu, při kterém dochází k teplotní deformaci výtisku a objekt se začne kroutit a odlepovat od podložky. Pro snadné odstranění výtisku se v současnosti využívá flexibilních plátů. Po jejich prohnutí se výtisk snadno odstraní. Pro různé materiály je třeba různá úprava plátů, kvůli jejich malé nebo naopak velmi velké přilnavosti. Je možné využít tyčinkové lepidlo nebo speciální produkty přímo určené k tomuto účelu. [4; 5]

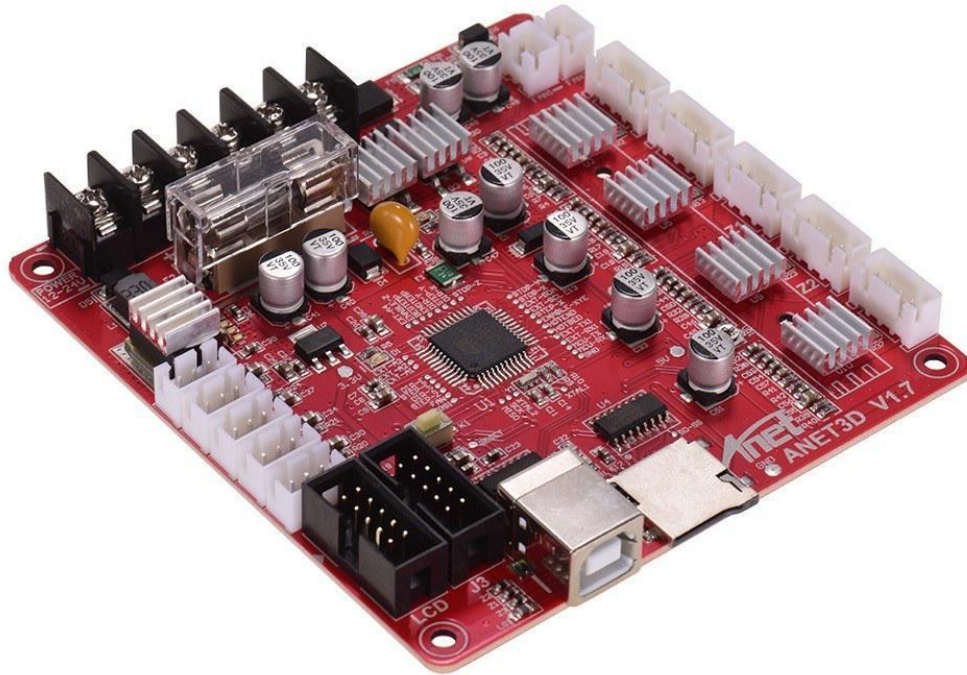
Extruder je část tiskárny, do které vchází materiál v tuhé formě, vychází natavený a je nanášen na výtisk. Dělí se na coldend a hotend. Coldend, jak název napovídá, je nezahříván. Nachází se v něm motor, který tlačí filament dále do hotendu. Většina tiskáren má coldend napojen přímo na hotend, některé mají tyto dvě části extruderu odděleny. Řez extruderem je možné vidět na obrázku 3. V případě odděleného coldendu je třeba vhodně vést filament, aby se nevzpříčil, což může být zajištěno kupříkladu TPFE trubičkou. Filament se dostává do hot endu, kde je taven. Hotend je složen z bloku vyrobeného z teplotně vodivého materiálu, zdroje tepla, teploměru a trysky. Z pravidla bývá přívod filamentu chlazen ventilátorem, aby nedošlo k natavení komponent, které nejsou určeny pro ohřev. Poté, co je materiál nataven, je dále tlačěn do trysky, která je zpravidla zúžena. Z trysky je materiál nanášen na výtisk nacházející se na heatbedu, kde je chlazen dalším ventilátorem, aby ztuhl a nedošlo k jeho nežádoucí deformaci. Důležitým parametrem extruderu je tryska. Průměr trysky ovlivňuje množství vytlačeného materiálu. Více vytlačeného materiálu z trysky většího průměru zkracuje čas tisku na úkor kvality. Dalším parametrem chování trysky je materiál, ze kterého je vyrobena. Nejběžnější materiál je mosazná slitina, která je však měkká, není tedy vhodné s takovou tryskou tisknout abrazivní materiály. K tisku takovýchto materiálů jsou vhodné trysky z tvrzené oceli nebo trysky z rubínu. [4; 5]



Obr. 3 - Řez extruderem, 1 - vstup filamentu, 2 – coldend, 3 – hotend. [7]

Krokové motory zajišťují pohyb jednotlivých os a tlačí filament v extruderu. Využívá se krokových motorů díky jejich přesnosti a snadné ovladatelnosti. [8]

Základní deska ovládá celou tiskárnu. Podrobněji bude popsána v softwarové části tiskárny. Na obrázku 4 je znázorněna základní deska tiskárny Anet A8.



Obr. 4 Základní deska tiskárny Anet A8. [9]

Další situační komponenty:

- Senzor – může například zjišťovat pozici os, přítomnost filamentu v extruderu nebo kalibrovat odsazení zetové souřadnice
- Vedení a uložení filamentu – může být použito zařízení dodané výrobcem nebo vlastnoručně vyrobený díl umožňující snadnější vedení filamentu
- Zařízení pro vícebarevný tisk – provedení může být různé, od dvou extruderů po samostatné zařízení na automatickou výměnu filamentů

Je třeba pospojovat jednotlivé komponenty tiskárny k sobě. Využívají se pevnostní spoje pomocí šroubů a matic, pohybové spoje pomocí například drážkových řemenů a závitových tyčí nebo elektronické spoje pomocí kabelů. [8]

Elektrický zdroj zajišťuje převod střídavého proudu elektrické sítě na stejnosměrný proud, který je potřeba pro pohon základní desky, motorů a zdrojů tepla. Žádoucí vlastností zdroje je jeho proudová a napěťová stabilita při proměnné zátěži.

### 1.1.2 Softwarová část tiskárny

Tiskárnu je třeba ovládat pomocí programu nahraného na základní desce. Program zajišťuje řízení tiskárny, regulaci teplot extruderu, pohyb os, reguluje rychlost ventilátorů a čte data z jednotlivých sond.

Jednoduché základní desky bývají modifikací arduina, což je jednoduchá základní deska, která slouží k edukativním a hobby účelům. Program založený na tomto mikrokontroleru bývá často open-source a dá se snadno nahrát pomocí softwaru Arduino IDE. Uživatel tedy může sám upravovat nebo si vybrat z více variant programu, je-li jich více, a využívat ten, který mu vyhovuje. Hlavní nevýhodou je jejich nízká výrobní cena, která se dost často odráží na kvalitě. [10; 11]

Základní desky vyráběné přímo na míru dodavateli jsou často daleko spolehlivější, protože procházejí náročnějším testováním. Ovládací software bývá vyvinut pro daný typ tiskárny přímo výrobcem, který se o něj stará a poskytuje pravidelné updaty. [12]

Základní deska je propojena s ostatními elektronickými komponenty jako jsou topná tělesa, senzory a motory. Stará se o chod tiskárny a je velice žádoucí, aby měla implementované bezpečnostní funkce. Mezi takovéto funkce se řadí například ochrana proti přehřátí nebo detekce kolize. [12]

Samotný soubor umožňující tisk má příponu GCODE. Jedná se o sérii strojových příkazů, které říkají tiskárně, co má dělat. Podoba GCODE se mění podle softwaru nahraného na základní desce, platí tedy, že jiná tiskárna používá jinou podobu souboru GCODE. [13]

GCODE soubor generuje počítačový program nazývaný slicer. Jedná se o program, který načte soubor s 3D objektem, který by měl být vytisknuto a podle předem přednastavených parametrů tisku, filamentu a tiskárny vygeneruje GCODE. Mezi nejznámější slicery patří Cura 3D, Slic3r nebo jeho modifikace PrusaSlicer. [13]

### 1.1.3 Nejběžnější druhy materiálu

Filament, kterým tiskárna tiskne, může být vyroben z různých druhů polymerů, které mají také každý jiné vlastnosti. Uživatel vybírá materiál podle požadavků hotového výtisku na detaily, mechanické vlastnosti, biodegradabilitu, cenu nebo jednoduchost tisku. [14]

Dříve patřilo ABS (akrylonitrilbutadienstyren) mezi nejběžnější a nejužívanější materiály. Jedná se o houževnatý materiál, který má vysokou teplotní odolnost. Při tisku je nezbytné použít vyhřívanou podložku s teplotou okolo 100°C. Je také rozpustný v acetonu, což umožňuje vyhlazování modelů pomocí acetonových výparů. Jeho ústup je zapříčiněn výčtem nežádoucích vlastností. Je velice náchylný k teplotnímu smršťování, není vhodný pro tisk vysokých detailů, modely jsou náchylné k praskání, vyžaduje speciální podmínky pro dosažení kvalitních a náročných výtisků a při tisku vypouští toxické výpary, je tedy třeba tisknout s tímto materiálem ve větraném prostředí. [5; 15]

ABS je postupně nahrazováno materiálem PLA, který je velmi jednoduchý na tisk, je vhodný pro tisk vysokých detailů, má malé teplotní deformace, tiskne se při relativně nízkých teplotách a u malých modelů není vyžadována vyhřívaná podložka. U některých značek je možné tisknout při teplotě extruderu 190 °C. Materiál je tvrdý, zároveň však také křehký. Je náchylný k teplotním deformacím, v amorfní podobě se začíná deformovat mezi

55 °C a 60 °C. Podléhá biodegradabilitě. Patří také k levnější a dostupnějším materiálům. [5; 16]

PETG (polyethylentereftalát s modifikovaným glykolem) je materiál vlastnosti zařazený vlastnostmi mezi PLA a ABS. Jedná se o polymer, který je náročnější na tisk než PLA, vyžaduje vyhřívanou podložku a tiskne se při teplotách kolem 240°C. Je houževnatější a měkčí než PLA, také je méně vhodný pro tisk detailních modelů. Stejně jako PLA je velice dostupný a relativně levný. [5; 17]

V poslední době je ABS postupně nahrazováno polymerem ASA (stejné složení jako ABS, avšak při výrobě je nahrazen butadienový kaučuk akrylátovým). ASA má oproti ABS menší teplotní roztažnost, přesto však je oproti jiným polymerům velmi vysoká. Také je oproti ABS UV stabilní. Je chemicky odolnější proti acetonu, vychlazování acetonovými parami je tedy o něco složitější, přesto je možné. Mechanické vlastnosti jsou o něco horší než u ABS. [5; 18]

V tabulce 1.1 jsou porovnány mechanické vlastnosti nejběžnějších materiálů.

*Tab. 1.1 - Porovnání vlastností nejběžnějších materiálů od výrobce Fillamentum [19; 20; 21; 22; 23].*

|                                    | PLA | PETG | ABS  | ASA |
|------------------------------------|-----|------|------|-----|
| Mez pevnosti<br>[MPa]              | 60  | 40   | 32   | 26  |
| Houževnatost<br>[J/m]              | 16  | 85   | 205* | 441 |
| Maximální pracovní teplota<br>[°C] | 55  | 86   | 81   | 62  |

*\* pozn.: Hodnota houževnatosti materiálu ASA u výrobce Fillamentum byla zjištěna jinou metodou než u zbylých vzorků. Vzájemné hodnoty nelze převést mezi sebou. Je tedy doplněna hodnota z jiného zdroje*

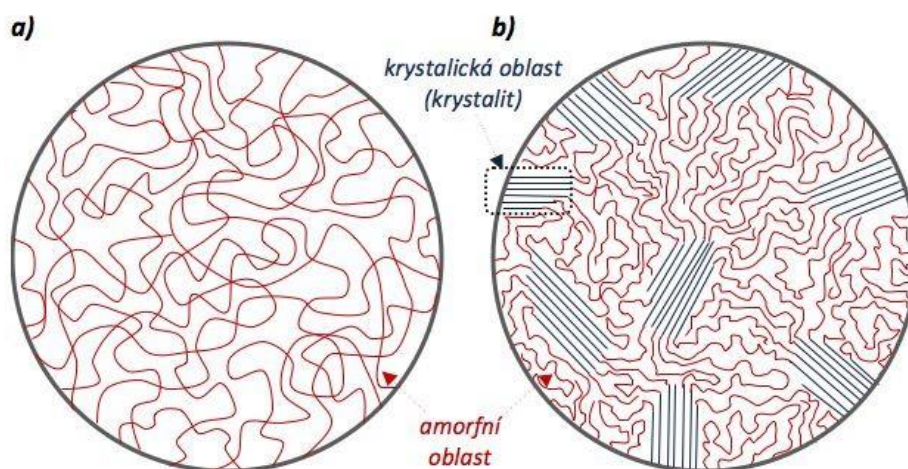
Kromě základního polymeru jsou do filamentu často přidány další přísady, které upravují vlastnosti primárního materiálu. Nejběžnější je úprava optických vlastností materiálu. Nejčastěji se jedná o barviva, méně časté je použití kovového prachu například prachu mědi. Některé materiály obsahují aditiva, která svítí ve tmě, jiná svítí při UV záření. Další kategorií jsou kompozitní materiály, jejichž primárním účelem je úprava vlastností původního polymeru. Může se jednat například uhlíková nebo skleněná vlákna.

## 1.2 Proces temperování PLA

Je důležité si zprvu objasnit terminologii užitou v této práci. V anglické literatuře se objevuje slovo „annealing“, česky žihání. Proces žihání se nejčastěji používá k snížení pnutí, k změkčení materiálu nebo k homogenizaci materiálu. Místo termínu žihání bude použit termín temperování, který vyjadřuje tepelný proces, jehož účel je navýšení různých mechanických vlastností na úkor tvrdosti materiálu. [24; 25]

PLA jakožto polymer je ve výchozím stavu amorfní, což znamená, že jeho struktura je nahodilá. Při tisku je materiál pokládán po vrstvách a následně chlazen, což zapříčiňuje nerovnoměrné mechanické vlastnosti v jednotlivých osách. Mechanické vlastnosti jsou horší v rovinách rovnoběžných s vrstvami tisku. [26]

Při zahřátí PLA nad teplotu skelného přechodu ale pod teplotu tání a následně výdrži se struktura materiálu mění z amorfní na semikrystalickou. Srovnání amorfní a semikrystalické struktury je na obrázku 5. Při zahřátí na teplotu tání se polymerní řetězce začnou uspořádat do semikrystalické struktury, čímž se změní mechanické vlastnosti materiálu a také rozměrové vlastnosti výtisku. Dále se také slíjí jednotlivé vrstvy, po kterých byl objekt tisknut, mechanické vlastnosti v ose kolmé na rovinu tisku se tedy budou přibližovat vlastnostem ve zbylých osách. U PLA je interval mezi teplotou skelného přechodu a teplotou tání relativně veliký, pohybuje se mezi cca. 55°C až 170°C, záleží však na přesném chemickém složení a aditivech v materiálu. Při výběru teploty temperování je třeba myslet na to, že vyšší teplota temperování má za důsledek kratší dobu temperování, lepší slití jednotlivých vrstev, ale také větší rozměrové deformace. Je také vhodné vzít v potaz velikost výtisku, který je temperován. Je-li materiál přímo určený k temperování, výrobce zpravidla doporučí vhodnou teplotu i čas, po který by měl být objekt temperován. [26]



Obr. 5 Srovnání amorfni a semikrystalické struktury, a) amorfni polymer, b) semikrystalický polymer [27].

Objekt určený k temperování je důležité tisknout se 100% výplní a v případě, že byl objekt vytištěn s podporami, je nutné je odstranit až po procesu temperování, jinak hrozí deformace objektu. [26]

Je důležité také vzít v potaz médium, ve kterém má být výtisk temperován. Nejjednodušší volba je vzduch či voda. Voda má vysokou měrnou tepelnou kapacitu, disponuje tedy vysokou tepelnou stálostí. PLA má hydrofilní vlastnost, je tedy žádoucí zjistit, jestli materiál navázal v při procesu nějakou vlhkost a případně objekt následně vysušit. Další limitující faktor je teplota varu vody, je možné tedy materiál temperovat při atmosférickém tlaku pouze do 100°C. Temperování na vzduchu naopak nevyžaduje žádné dodatečné operace, je možné temperovat i při teplotách nad 100 °C avšak vzduch není tak teplotně stálý jako voda.



Temperované PLA by mělo mít oproti původnímu větší houževnatost, větší mez pevnosti a také větší teplotní odolnost. [26]

## 2 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Experimentální část bakalářské práce se sestává z několika částí. Nejprve je třeba vybrat vhodné materiály pro danou problematiku. Následně je materiál použit na tisk vzorků za předem stanovených podmínek a předem určených parametrů, které eliminují nežádoucí proměnné a stanovují rovnocenné podmínky pro všechny vzorky. Vytisknuté vzorky jsou podrobeny temperování. Stejně jako u 3D tisku je třeba stanovit vhodné podmínky. Nakonec jsou vzorky testovány na jejich mechanické vlastnosti a výsledky jsou vyhodnoceny vhodným způsobem.

Zkouška, kterou se bude měřit houževnatost vzorků, bude smluvní. Bylo pro ni sestaveno vlastní zařízení a při jeho tvorbě byla snaha o co největší přiblížení se normě ČSN EN ISO 179-1.

Stanovený cíl experimentální části je změřit houževnatost a mez napětí v tahu u vybraných materiálů. Obě vlastnosti budou měřena u vzorků bez tepelného zpracování a s odlišnými tepelnými zpracováními. Po získání naměřených hodnot budou tyto hodnoty porovnány a následně zpracovány pro vyvození závěru o vhodném postupu temperování pro danou vlastnost. Díky tomu lze následně určit využití tohoto postupu a materiálů, které jsou pro dané tepelné zpracování vhodné.

### 2.1 Volba materiálu

Na tisk vzorků byly vybrány celkem 4 druhy materiály – Fiberlogy HD PLA, Volcano PLA, PLA Extrafill Traffic White (dále jen Fillamentum White), PLA Crystal Clear (dále jen Fillamentum Clear). Není možné zjistit přesné chemické složení těchto materiálů, neboť se jedná o výrobní tajemství.

#### 2.1.1 Fillamentum

Jako zástupci materiálů, které nejsou určeny k temperování byly vybrány filamenty od české firmy Fillamentum.

Materiály PLA White a PLA Clear jsou určeny primárně k tisku detailních modelů. Výrobce uvádí, že jsou vhodné pro použití při vysokých tiskových rychlostech. Lze je použít k výrobě částí, které přichází do styku s elektronikou. Filamenty mají také certifikát, že jsou bezpečné pro styk s potravinami. To však neznamená, že je lze použít na tisk nádobí bez povrchové úpravy. Mezery mezi vrstvami tisku a trhlinky na povrchu výtisků zadržují vody a vytváří vhodné podmínky pro množení bakterií. Pro styk s potravinami je doporučeno učinit vhodnou povrchovou úpravu, která tyto trhlinky vyplní. Doporučuje se výtisk potřít kupříkladu epoxidovou pryskyřicí, která je vhodná pro styk s potravinami. [28; 29; 30]

Transparentní variantu materiálu výrobce doporučuje tisknout při vyšších teplotách.

#### 2.1.2 Volcano PLA

Materiál Volcano PLA vyrábí nizozemská firma Formfutura. Filament je přímo určen pro temperování. [31]

Výrobce deklaruje, že by měl mít materiál po temperaci následující vlastnosti:

- Odolnost vůči teplotám větším než 95 °C,
- Smrštivost po temperování menší než 0,3 %,
- Podobné mechanické vlastnosti jako ABS.

Materiál slibuje snadné tiskové vlastnosti PLA. Materiál však nemá certifikaci pro styk s potravinami. Primární účel filamentu by tedy měly být funkční prvky vyžadující vysoké mechanické vlastnosti v kombinaci s vysokými detaily. [31]

### 2.1.3 Fibrology

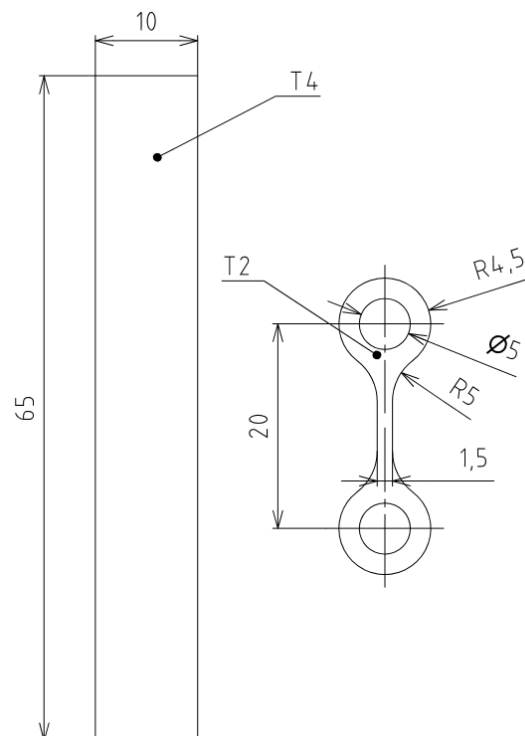
Dalším materiálem určených k temperování je Fibrology HD PLA, které vyrábí polská firma Fibrology. [32]

Filament je doporučen ke dvěma druhům použití. První použití předpokládá, že výtisk bude temperován, takovýto výtisk by měl dosahovat stejných mechanických vlastností jako ABS. Druhé použití předpokládá velkou přesnost a vysokou přilnavost vrstev bez jakéhokoliv postprocessingu. [32]

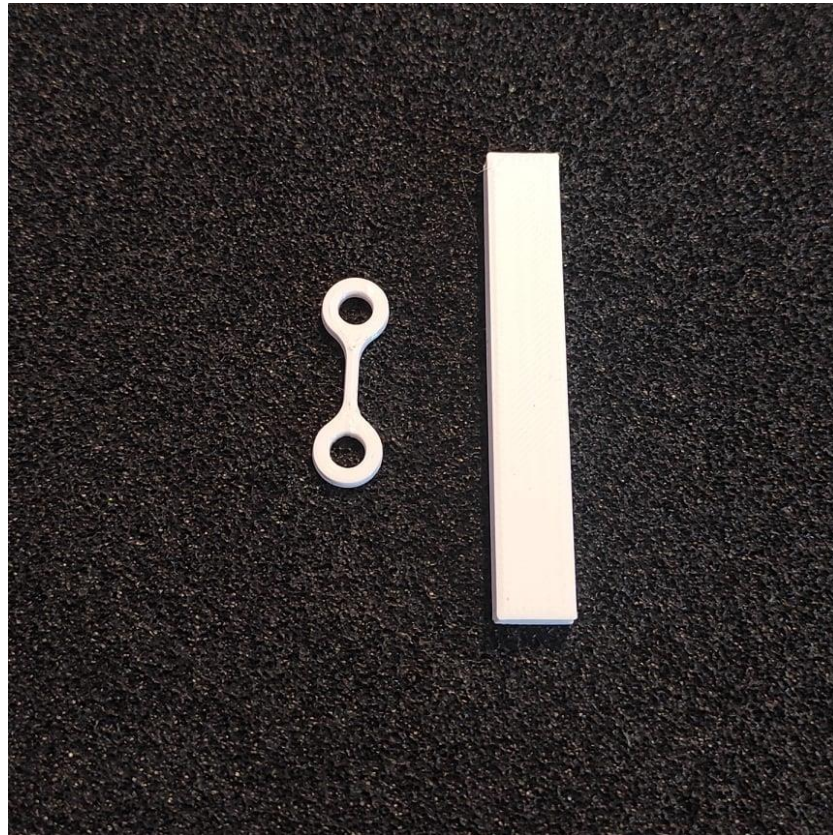
### 2.2 Tisk vzorků

Pro tisk vzorků na zkoušku houževnatosti je zvolen model, který průřezem odpovídá normě ČSN EN ISO 179-1. Tento model je vymodelován pomocí programu Autodesk Inventor. Tvar modelu odpovídá kvádru a je zobrazen na obrázku 6 vlevo.

Ke zkoušce mezi napětí v tahu byly vymodelován vzorek podle obrázku 6 vpravo. Na obrázku 7 je vidět jejich vytištěná podoba.



Obr. 6 – Vzorky pro zkoušky mechanických vlastností.



Obr. 7 – Vytisknuté vzorky pro zkoušky mechanických vlastností.

Tyto modely jsou následně převedeny na G-CODE pomocí sliceru PrusaSlicer. Ve sliceru jsou přímo přednastaveny vhodné parametry pro tuto tiskárnu, které jsou také použity. Jako samotný tiskový profil je použit přímo předdefinované nastavení nesoucí název 0.20mm QUALITY MK3. Jediná modifikace daného nastavení spočívá ve 100% výplni tisku. Pro materiál od firmy Fillamentum je již přímo předdefinovaný optimální profil, který je použit. Pro materiály Volcano PLA a Fiberlogy HD PLA tento profil není vytvořen. Je třeba vytvořit co nejpodobnější podmínky, je tedy modifikován předdefinovaný Fillamentum profil. Jediný změněný parametr je teplota extruderu. U každého materiálu je vybrána střední hodnota pro interval teplot extruderu doporučeným výrobcem, pro Volcano PLA je to 240 °C a pro Fiberlogy HD PLA 215 °C.

Tisk probíhá na tiskárně Prusa i3 MK3S.

### 2.3 Temperování

Nejprve je důležité zvolit vhodné médium. Je vybrána voda pro svoji vysokou měrnou kapacitu, která zajišťuje vysokou teplotní stálost.

K samotnému tepelnému zpracování vzorků je použit hliníkový hrnec, který je určený na zavařování. Součástí hrnce je také vestavěný teploměr, který bude sloužit ke kontrole teploty.

U temperování je třeba vzít v úvahu dvě proměnné: teplotu média a čas procesu. Ostatní vlivy je třeba minimalizovat pro vhodnou výpovědní hodnotu výstupu. Výrobce Fiberlogy HD PLA doporučuje 15 min a 80 °C, výrobce Volcano PLA doporučuje 20 min a 100 °C.

Pro vhodné určení průkazných měření houževnatosti jsou zvoleny 3 stejné časové úseky o různé teplotě média a 3 stejné teploty média s různou délkou trvání procesu. Limitujícím faktorem u volby teploty média je bod varu vody. Tento bod nelze překročit z důvodů vypařování vody a případného pohybu vzorků spojeného s varem. Jednotlivé teploty jsou tedy zvoleny jako 70 °C, 80 °C a 90 °C, při těchto teplotách bude probíhat temperování po dobu 20 minut. Při teplotě 80 °C jsou doplněny parametry tepelného zpracování o časy trvání procesu v hodnotách 10 minut a 30 minut.

Pro každou temperovací kategorii je vytištěno 5 vzorků, což norma ČSN EN ISO 179-1 uvádí jako minimum. Sada vzorků je doplněna o 5 vzorků bez tepelné úpravy pro srovnání výsledků.

U zkoušky meze napětí v tahu jsou navýšeny množství parametrů teplot a časů na úkor počtu vzorků. Při teplotě 80 °C jsou voleny časové hodnoty 10, 15, 20, 25 a 30 min. Při čase 20 min jsou voleny teplotní hodnoty 70, 75, 80, 85 a 90 °C. Pro každou kategorii jsou tištěny 3 vzorky.

U zkoušky houževnatosti by mělo větší množství vzorků představovat přesnější statistické výsledky díky velkému statistickému souboru. Naopak u zkoušky meze napětí v tahu by více parametrů proměnných mělo zajistit patrnější závislost mechanické vlastnosti na parametrech.

#### **2.4 Vysoušení vzorků**

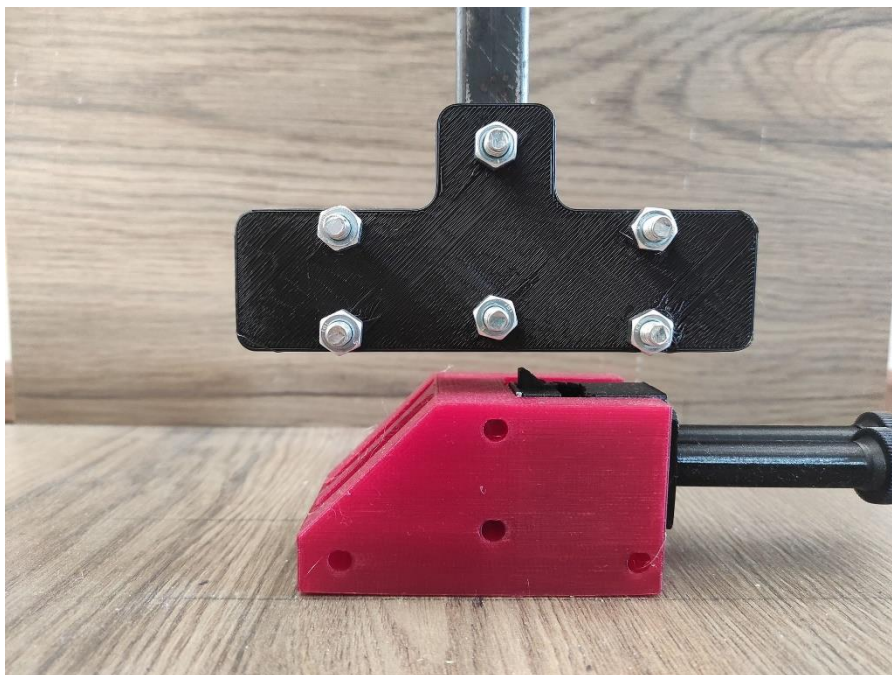
Během procesu na sebe pravděpodobně navážou vlhkost, která může zkoušku houževnatosti negativně ovlivnit, je tedy nutné se následně této nežádoucí vlhkosti zbavit. Pro kontrolu přítomnosti navázaných molekul vody bude zvážen před i po procesu vždy 1 vzorek z každé temperovací skupiny každého materiálu. V případě zjištěného hmotnostního rozdílu bude použita k odstranění navázané vlhkosti sušička určená k dehydrataci ovoce. Vzorky by v takovém případě byly každou hodinu váženy a byly by sušeny, dokud hmotnost nedosáhla původní hodnoty.

#### **2.5 Zkouška houževnatosti.**

Pro zkoušku houževnatosti bylo zkonstruováno vlastní zařízení, jedná se tedy o smluvní zkoušku. Při konstrukci zařízení byly vytištěny díly ze zdroje [33]. Zařízení je zobrazeno na obrázku 8 a 9. Toto zařízení vyvíjí kinetickou energii 2,26 J, je však možné vyvinout větší energie pomocí dodatečných závaží pro přerážení velmi houževnatých materiálů, viz obrázek 10. Pro odečet hodnot byla vytištěna stupnice pro odečet naměřených hodnot. Stupnice má hodnoty od 0 do 100 %, kde procenta představují nespotřebovanou energii kladiva.



*Obr. 8 - Zařízení na zkoušku houževnatosti.*



*Obr. 9 - Detail svěraku s kladivem.*



*Obr. 10 - Řez kladivem.*

## 2.6 Zkouška meze napětí v tahu

Jako měřicí zařízení meze napětí v tahu je použit siloměr. Vzorek je z jedné strany zachycen na zmiňovaný siloměr a z druhé strany pomalu zatěžován navijákem. Jako mez napětí v tahu je zaznamenána hodnota síly, při které se vzorek přetrhne. Vzorky jsou přetrhnuty v místě nejmenšího průřezu materiálu.



### 3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

#### 3.1 Vysoušení vzorků

V popisu experimentu byl vyřčen předpoklad, že materiál v průběhu temperace naváže vlhkost. Po srovnání hmotností vzorků před temperováním a po temperování bylo zjištěno, že vlhkost navázána nebyla, případně navázaná hmotnost je zanedbatelná v podobě promíli hmotnosti vzorku.

Vzorový přepočít ze zbylé procentuální energie kladiva na energii na plochu vzorku pro materiál Fillamentum White při temperovací teplotě 80 °C a délce procesu 10 minut byl zaznamenán do tabulky 3. 1.

Tab. 3. 1 - Hodnoty 1. měření materiálu Fillamentum White.

| Měření            |  | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-------------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fillamentum White | Zbylá procentuální energie kladiva [%] | 63     | 66     | 68     | 63     | 67     |
|                   | Energie na přeražení [J]               | 0,8362 | 0,7684 | 0,7232 | 0,8362 | 0,7458 |
|                   | Energie na délku vzorku [J/cm]         | 1,672  | 1,537  | 1,446  | 1,672  | 1,492  |
|                   | Aritmetický průměr [J/cm]              | 1,564  |        |        |        |        |
|                   | Nárůst [%]                             | 19,3   |        |        |        |        |
|                   | Směrodatná odchylka [J/cm]             | 0,093  |        |        |        |        |

Hodnoty použité ve výpočtu:

$$E_K = 2,26 \text{ J}$$

$$\bar{H}_P = 1,639 \text{ J}$$

Výpočet energie přeražení dle vztahu (3.1):

$$E_V = E_K \cdot \left(1 - \frac{\eta}{100}\right) \text{ [J]} \quad (3.1)$$

Výpočet energie na tloušťku vzorku dle vztahu (3.2):

$$H = E_V \cdot a_H \text{ [J/m]} \quad (3.2)$$

Výpočet aritmetického průměru dle vztahu (3.3):

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n H_i \text{ [J/m]} \quad (3.3)$$

Výpočet nárůstu energie na plochu dle vztahu (3.4):

$$\delta_H = \left( \frac{\bar{H}}{\bar{H}_P} - 1 \right) \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3.4)$$

Výpočet směrodatné odchylky dle vztahu (3.5):

$$s_H = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} \text{ [J/m]} \quad (3.5)$$

Vzhledem ke zvolenému měřicímu zařízení a jeho předpokládané přesnosti je vhodné výsledky zaokrouhlit na dvě platné číslice a tyto hodnoty dosadit do tabulky. Procentuální nárůst a směrodatná odchylka je však počítána z nezaokrouhlených hodnot. Tabulka 3.2 obsahuje hodnoty měření závislé na čase temperování, tabulka 3.3 obsahuje hodnoty závislé na teplotě temperování. Nejlepší dosažený výsledek pro daný materiál byl barevně odlišen.

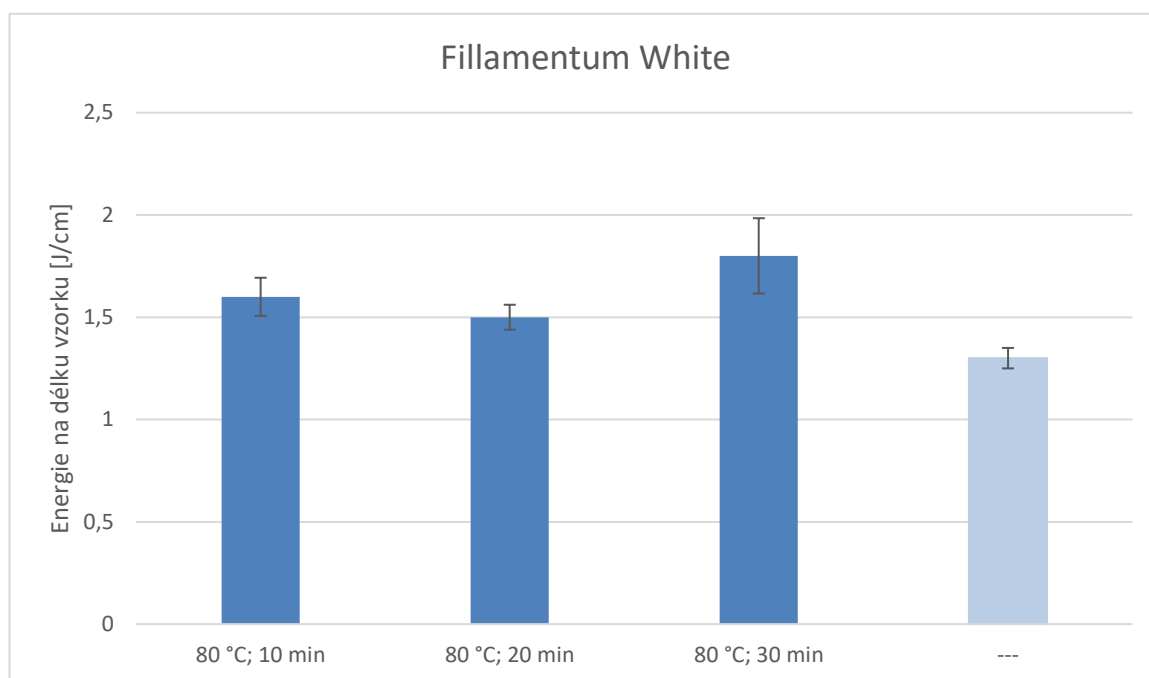
Tab. 3. 2 – Výsledky měření zkoušky houževnatosti v závislosti na čase.

| Temperovací parametry | teplota [°C]     | 80    |       |       | ---   |
|-----------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
|                       | čas [min]        | 10    | 20    | 30    | ---   |
| Fillamentum White     | $\bar{H}$ [J/mm] | 1,6   | 1,5   | 1,8   | 1,3   |
|                       | Nárůst [%]       | 19,3  | 12,4  | 35,2  |       |
|                       | $s$ [J/cm]       | 0,093 | 0,061 | 0,184 | 0,050 |
| Fillamentum Clear     | $\bar{H}$ [J/mm] | 1,7   | 1,8   | 1,7   | 1,5   |
|                       | Nárůst [%]       | 14,3  | 17,3  | 12,5  |       |
|                       | $s$ [J/cm]       | 0,022 | 0,036 | 0,088 | 0,036 |
| Volcano PLA           | $\bar{H}$ [J/mm] | 2,4   | 1,9   | 2,1   | 2,2   |
|                       | Nárůst [%]       | 20,5  | -2,3  | 6,8   |       |
|                       | $s$ [J/cm]       | 0,213 | 0,213 | 0,083 | 0,150 |
| Fiberlogy HD PLA      | $\bar{H}$ [J/mm] | 1,5   | 1,7   | 1,7   | 1,4   |
|                       | Nárůst [%]       | 5,8   | 18,8  | 24,0  |       |
|                       | $s$ [J/cm]       | 0,079 | 0,036 | 0,175 | 0,088 |

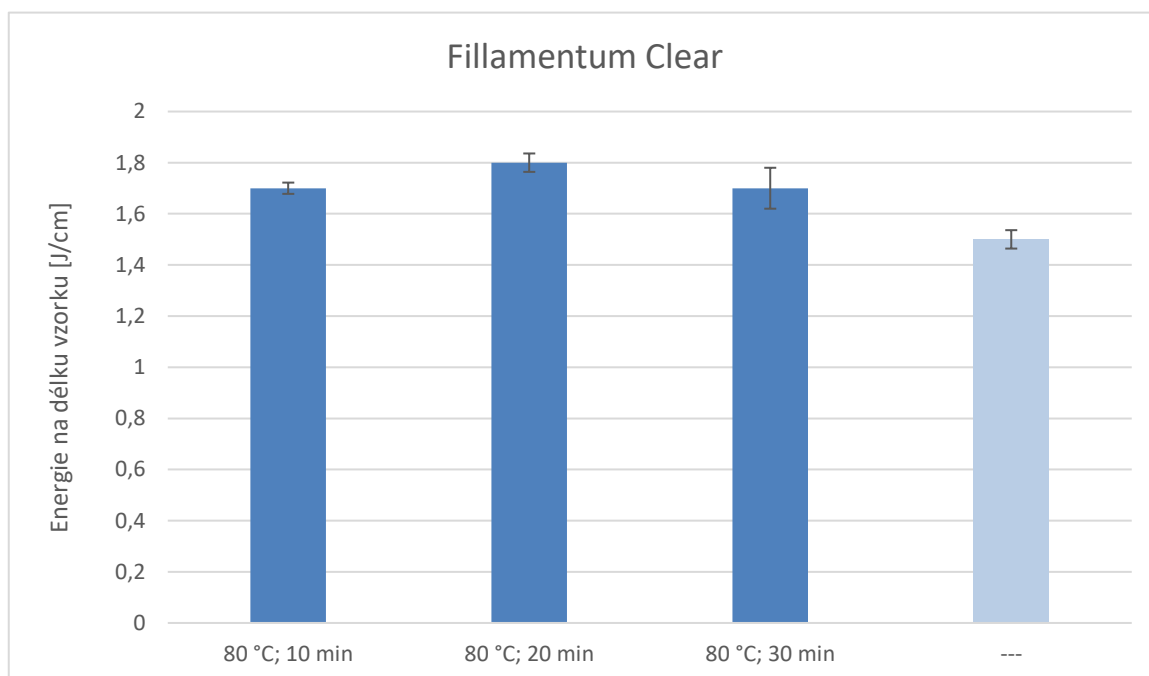
Tab. 3.3 – Výsledky měření zkoušky houževnatosti v závislosti na čase.

| Temperovací parametry | teplota [°C]        | 70    | 80    | 90    | ---   |
|-----------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
|                       | čas [min]           | 20    |       |       | ---   |
| Fillamentum White     | $\bar{H}$<br>[J/mm] | 1,8   | 1,5   | 1,6   | 1,3   |
|                       | Nárůst<br>[%]       | 35,9  | 12,4  | 20,0  | /     |
|                       | s [J/cm]            | 0,127 | 0,061 | 0,182 | 0,050 |
| Fillamentum Clear     | $\bar{H}$<br>[J/mm] | 1,8   | 1,8   | 1,8   | 1,5   |
|                       | Nárůst<br>[%]       | 19,0  | 17,3  | 19,6  | /     |
|                       | s [J/cm]            | 0,154 | 0,036 | 0,160 | 0,036 |
| Volcano PLA           | $\bar{H}$<br>[J/mm] | 2,2   | 1,9   | 1,8   | 2,2   |
|                       | Nárůst<br>[%]       | 10,5  | -2,3  | -9,1  | /     |
|                       | s [J/cm]            | 0,203 | 0,213 | 0,097 | 0,150 |
| Fiberlogy HD PLA      | $\bar{H}$<br>[J/mm] | 1,5   | 1,7   | 1,9   | 1,4   |
|                       | Nárůst<br>[%]       | 8,4   | 18,8  | 35,7  | /     |
|                       | s [J/cm]            | 0,097 | 0,036 | 0,105 | 0,088 |

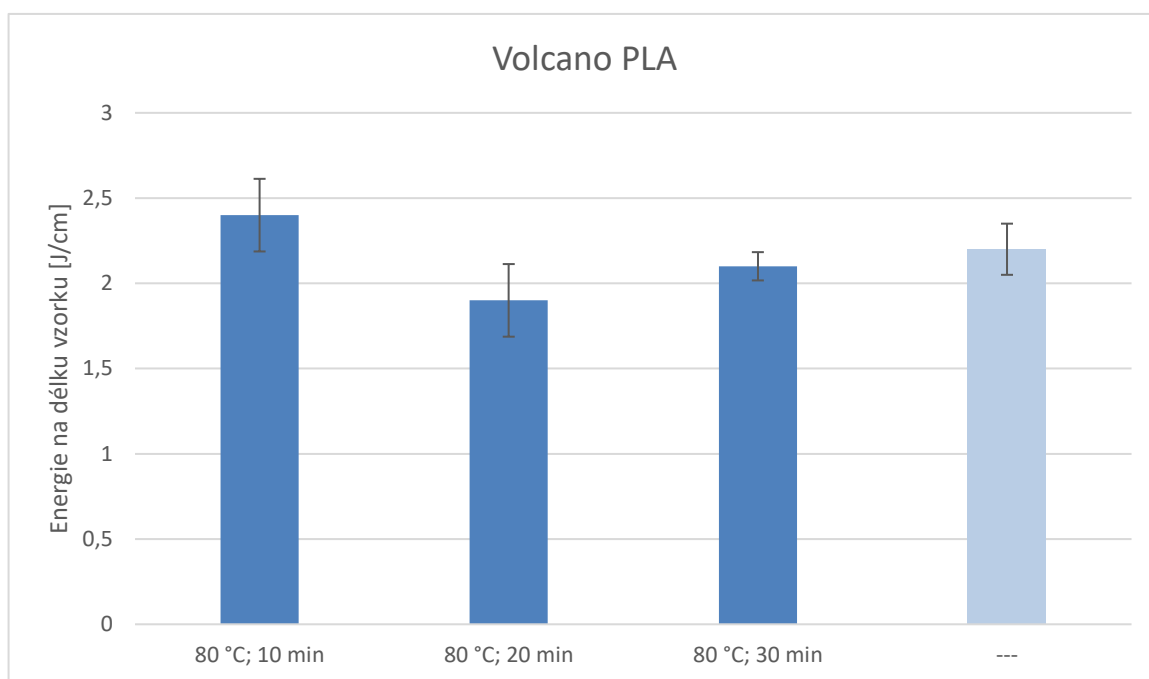
Pro lepší přehlednost jsou výsledky zobrazeny graficky v grafech 3.1 - 3.9.



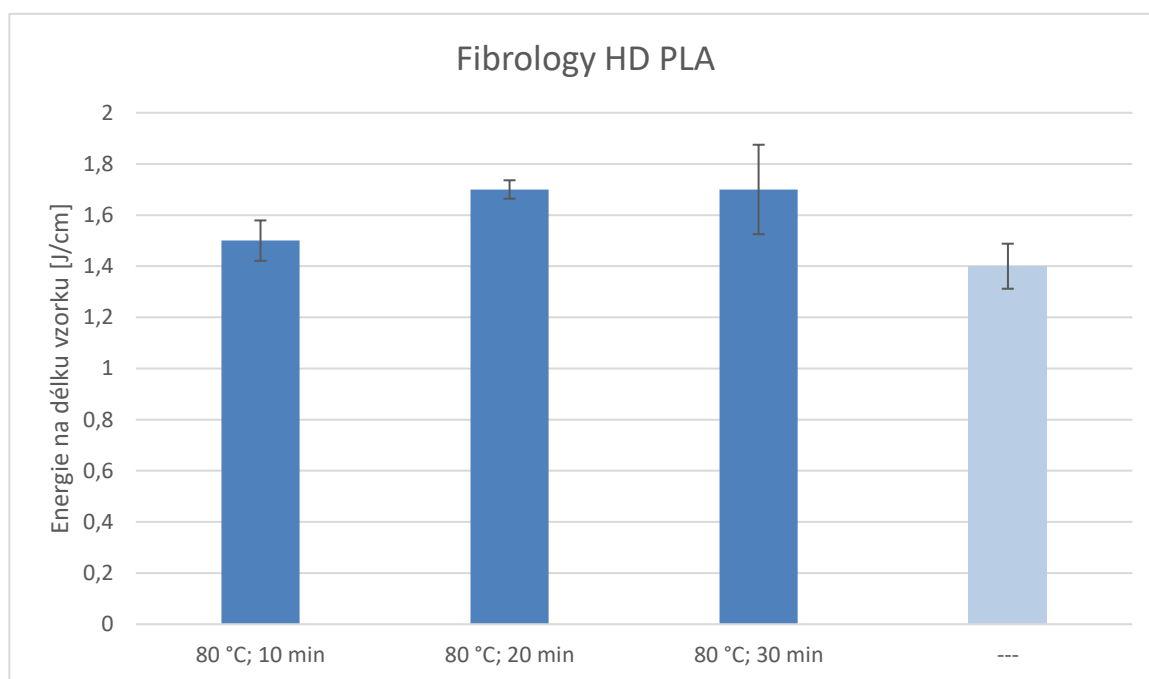
Graf 3. 1 – Závislost houževnatosti na temperovacím čase pro materiál Fillamentum White.



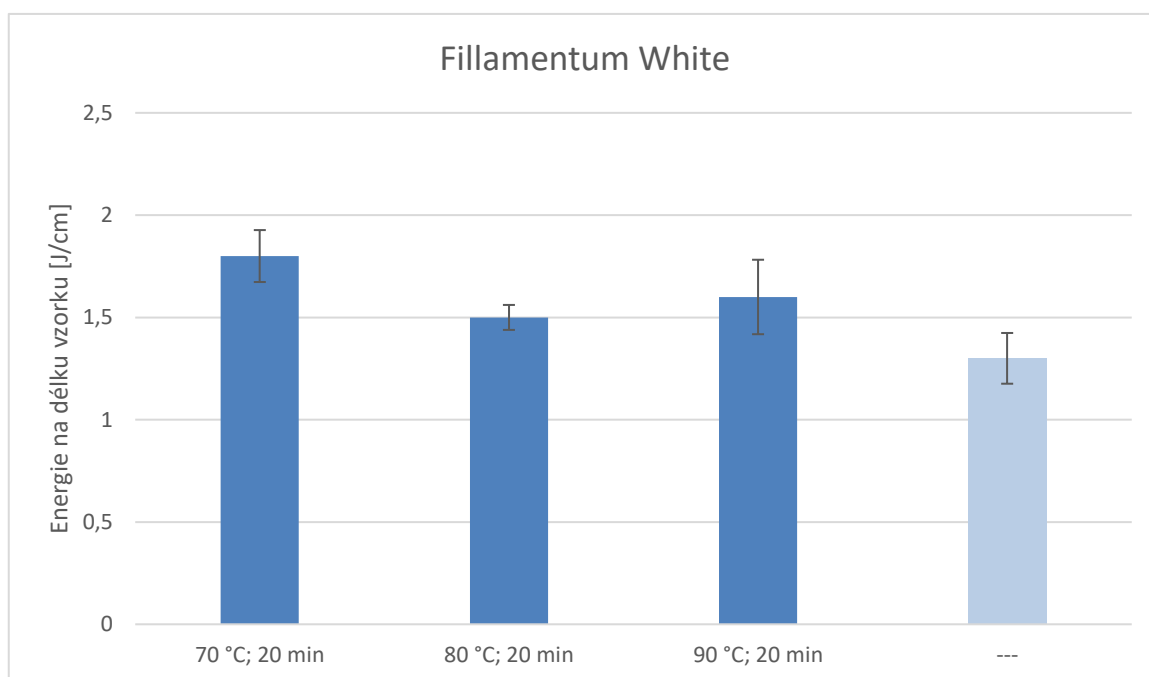
Graf 3. 2 – Závislost houževnatosti na temperovacím čase pro materiál Fillamentum Clear.



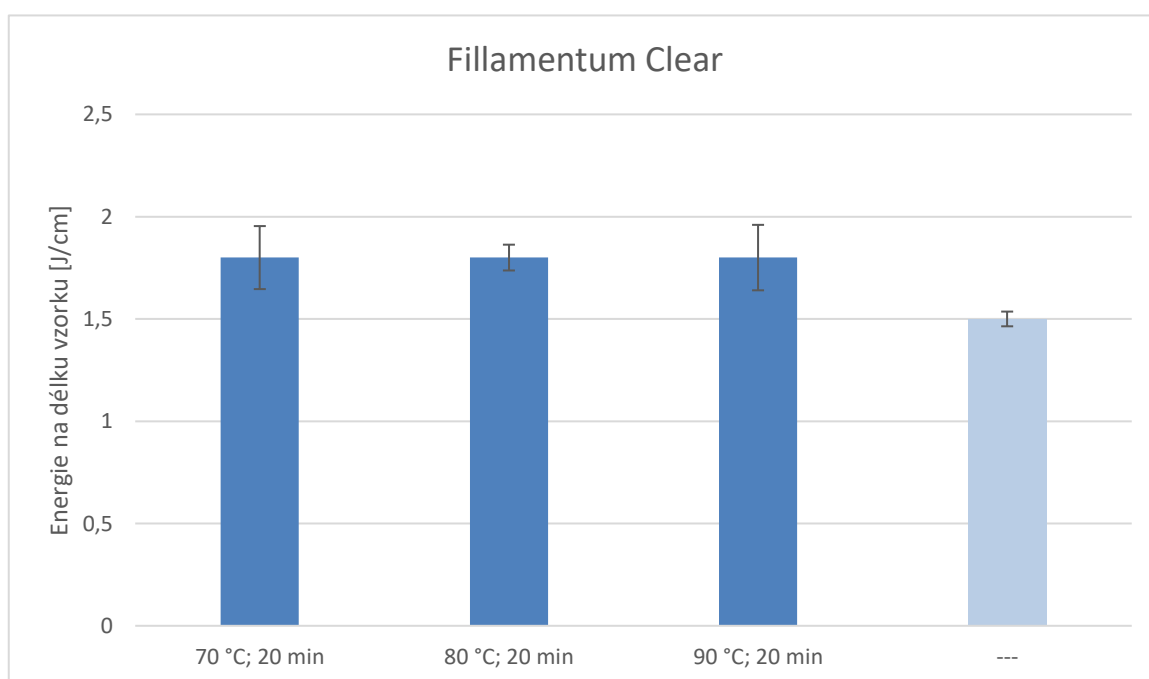
Graf 3. 3 – Závislost houževnatosti na temperovacím čase pro materiál Volcano PLA.



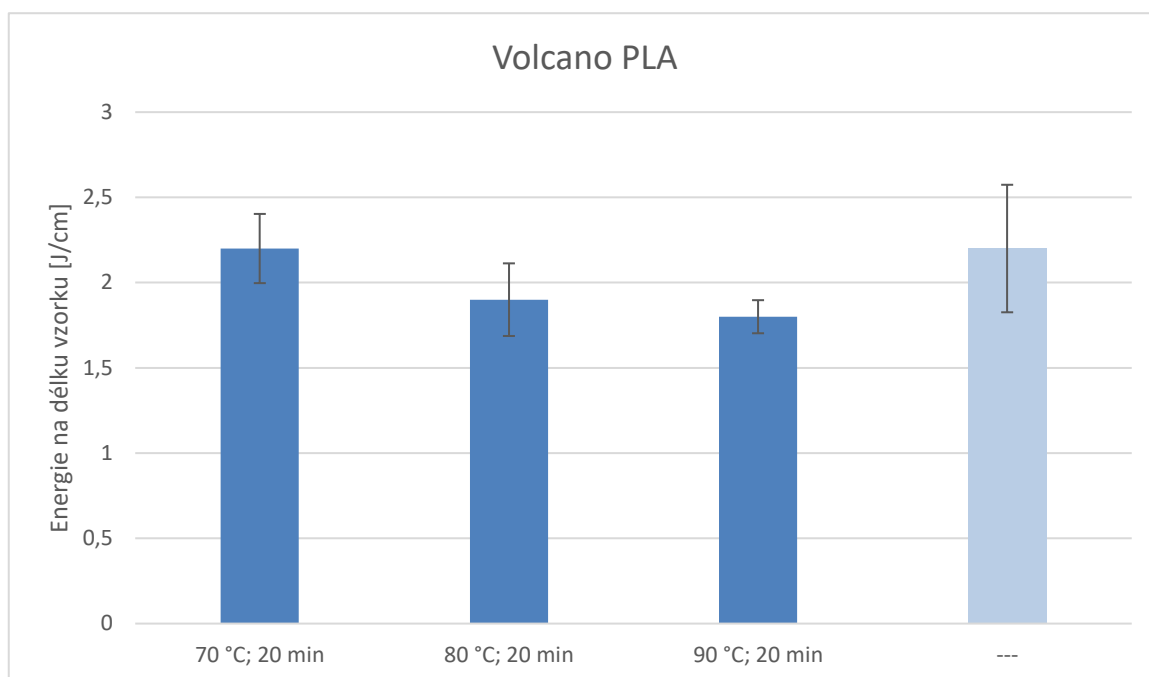
Graf 3. 4 – Závislost houževnatosti na temperovacím čase pro materiál Fibrology HD PLA.



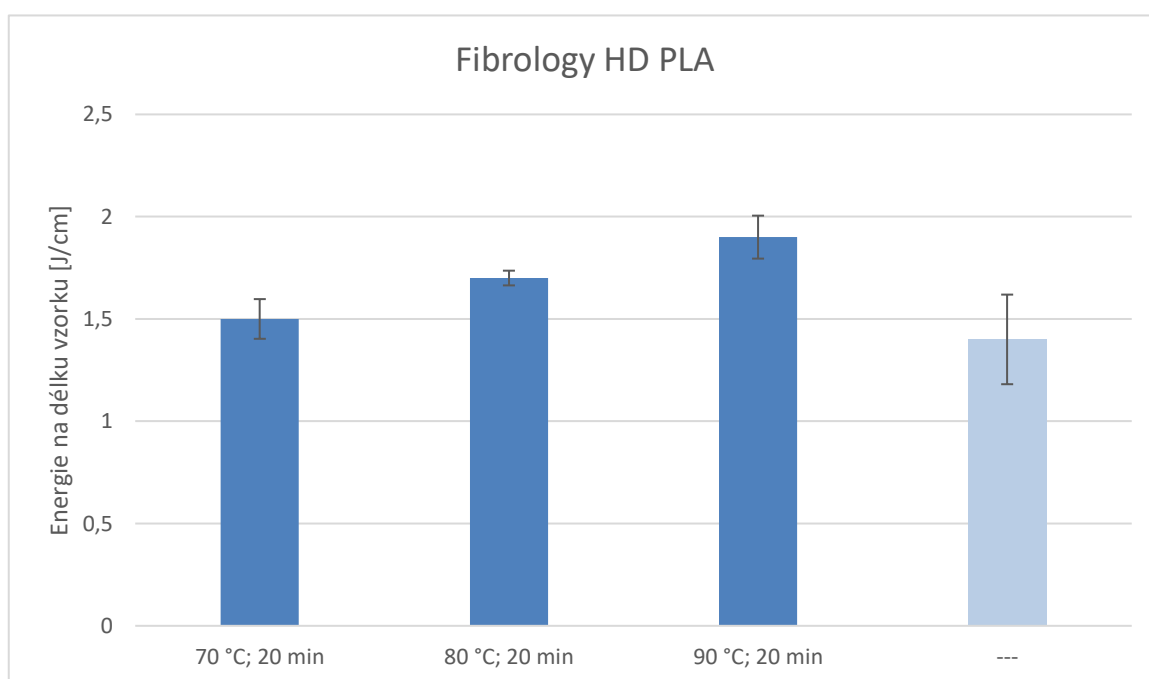
Graf 3. 5 – Závislost houževnatosti na temperovací teplotě pro materiál Fillamentum Clear.



Graf 3. 6 – Závislost houževnatosti na temperovací teplotě pro materiál Fillamentum White.

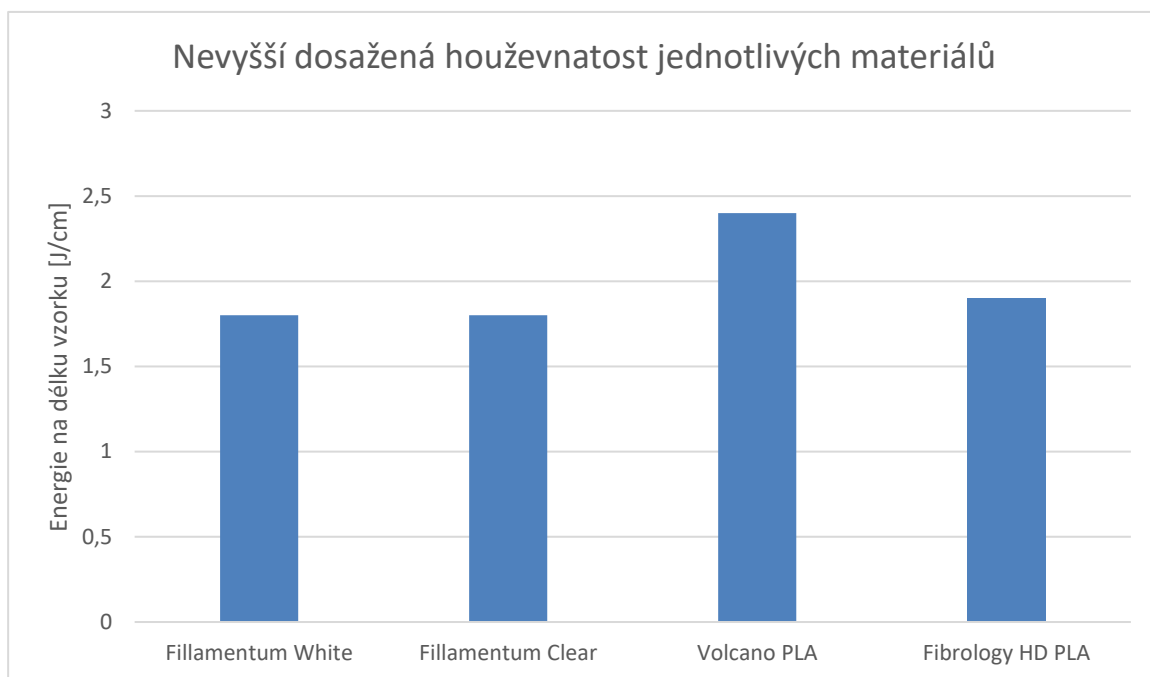


Graf 3. 7 – Závislost houževnatosti na temperovací teplotě pro materiál Volcano PLA.



Graf 3. 8 – Závislost houževnatosti na temperovací teplotě pro materiál Fillamentum White.





Graf 3. 9 – Celkové porovnání nejvyšší dosažené houževnatosti jednotlivých materiálů.

### 3.2 Naměřené hodnoty tahové zkoušky

Vzorový přepočít z naměřené síly na mez pevnosti v tahu pro materiál Fillamentum White při temperovací teplotě 70 °C a délce procesu 20 minut byl zaznamenán do tabulky 3. 4.

Tab. 3. 4 - Hodnoty 1. měření materiálu Fillamentum White.

| Měření            |                                       | 1     | 2     | 3   |
|-------------------|---------------------------------------|-------|-------|-----|
| Fillamentum White | Síla potřebná na přetržení vzorku [N] | 180   | 175   | 150 |
|                   | Mez napětí v tahu [MPa]               | 60    | 58,33 | 50  |
|                   | Aritmetický průměr [MPa]              | 56,11 |       |     |
|                   | Nárůst [%]                            | -11,4 |       |     |
|                   | Směrodatná odchylka [MPa]             | 4,37  |       |     |

Hodnoty použité ve výpočtu:

$$\bar{\sigma}_p = 58,3 \text{ MPa}$$

Výpočet napětí v tahu dle vztahu (3.6):

$$\sigma_V = \frac{F_V}{S_T} = \frac{F_V}{a_T \cdot b_T} [MPa] \quad (3.6)$$

Výpočet aritmetického průměru dle vztahu (3.7):

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_i [MPa] \quad (3.7)$$

Výpočet energie na plochu dle vztahu (3.8):

$$\delta_T = \left( \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}_P} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad (3.8)$$

Výpočet směrodatné odchylky dle vztahu (3.9):

$$s_T = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2} [MPa] \quad (3.9)$$

Vzhledem ke zvolenému měřicímu zařízení a jeho předpokládané přesnosti je vhodné výsledky zaokrouhlit na dvě platné číslice a tyto hodnoty dosadit do tabulky. Procentuální nárůst a směrodatná odchylka je však počítána z nezaokrouhlených hodnot. Tabulka 3.5 obsahuje hodnoty měření závislé na čase temperování, tabulka 3.6 obsahuje hodnoty závislé na teplotě temperování. Nejlepší dosažený výsledek pro daný materiál byl barevně odlišen.

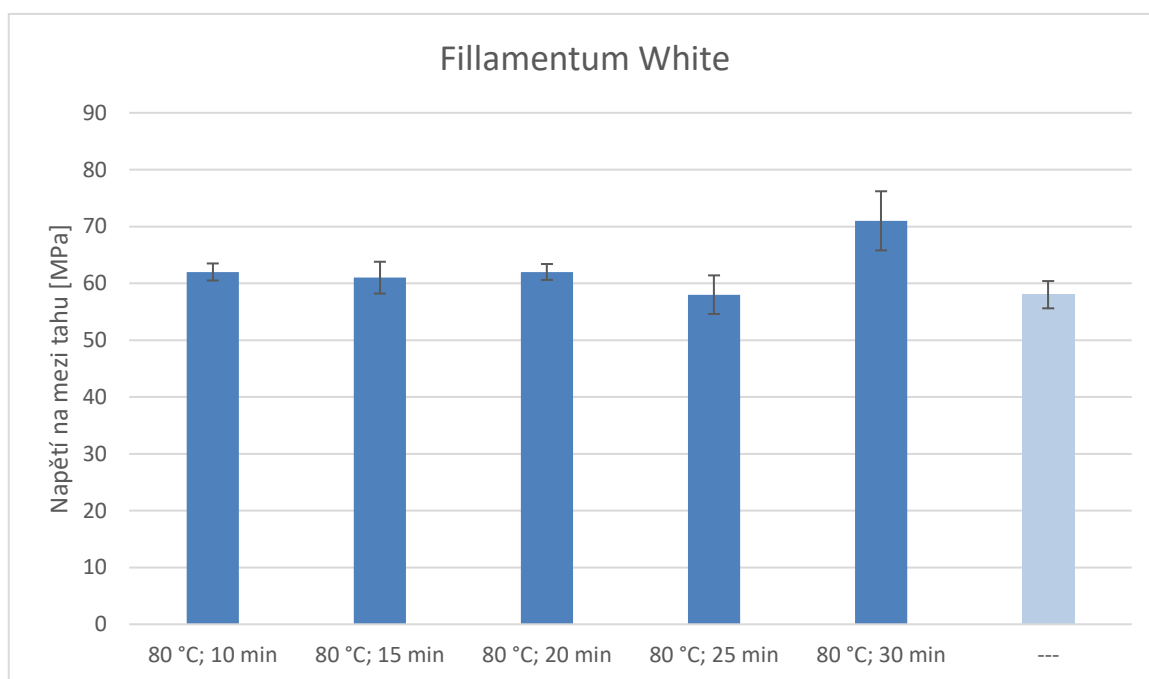
Tab. 3. 5 - Výsledky měření tahové zkoušky v závislosti na teplotě temperace.

| Temperovací parametry | teplota [°C]         | 80   |      |      |      |      | --- |
|-----------------------|----------------------|------|------|------|------|------|-----|
|                       | čas [min]            | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | --- |
| Fillamentum White     | $\bar{\sigma}$ [MPa] | 62   | 61   | 62   | 58   | 71   | 58  |
|                       | Nárůst [%]           | 6,7  | 4,8  | 5,7  | -0,9 | 20,1 |     |
|                       | $s_T$ [MPa]          | 1,5  | 2,8  | 1,4  | 3,4  | 5,2  | 2,4 |
| Fillamentum Clear     | $\bar{\sigma}$ [MPa] | 58   | 63   | 62   | 61   | 65   | 63  |
|                       | Nárůst [%]           | -7,9 | -0,9 | -2,6 | -4,4 | 2,6  |     |
|                       | $s_T$ [MPa]          | 5,9  | 7,7  | 1,4  | 3,4  | 4,1  | 0   |
| Volcano PLA           | $\bar{\sigma}$ [MPa] | 44   | 45   | 47   | 44   | 46   | 45  |
|                       | Nárůst [%]           | -2,5 | 0    | 4,9  | -1,2 | 1,2  |     |
|                       | $s_T$ [MPa]          | 0,8  | 1,3  | 0,8  | 0,8  | 0,8  | 1,4 |
| Fiberlogy HD PLA      | $\bar{\sigma}$ [MPa] | 67   | 69   | 68   | 64   | 67   | 67  |
|                       | Nárůst [%]           | 0    | 3,3  | 2,5  | -4,2 | 0    |     |
|                       | $s_T$ [MPa]          | 2,4  | 1,6  | 1,4  | 2,1  | 2,7  | 2,4 |

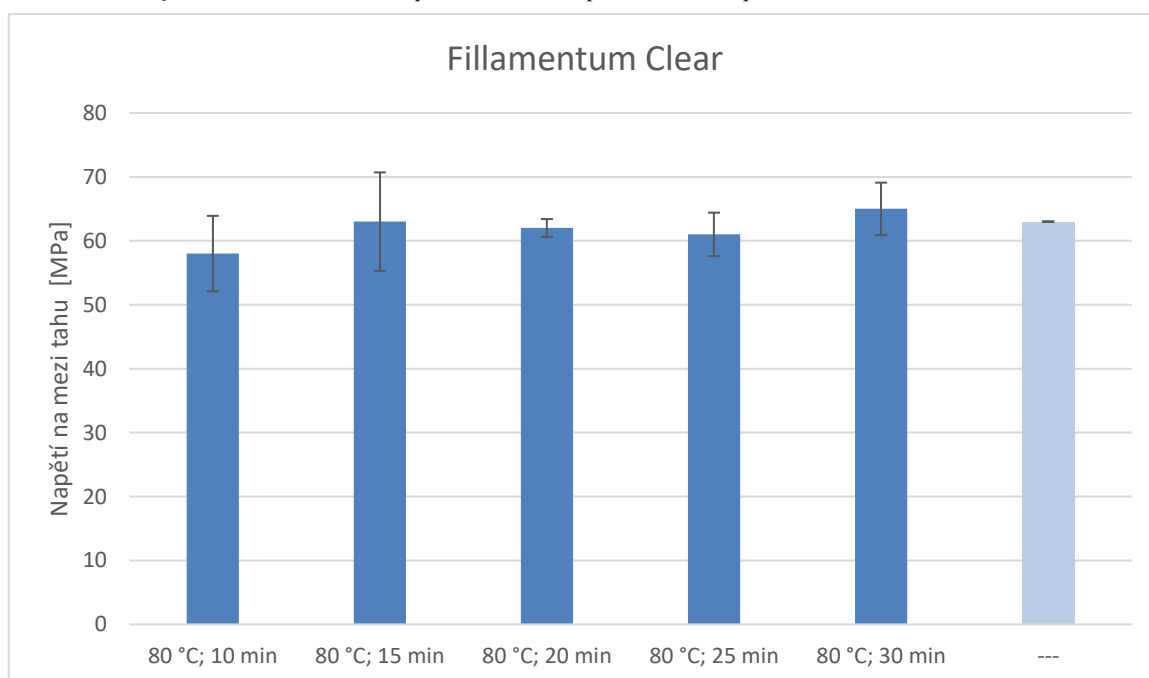
Tab. 3. 6 - Výsledky měření tahové zkoušky v závislosti na času teploty.

| Temperovací parametry | teplota [°C]         | 70    | 75   | 80   | 85   | 90   | --- |
|-----------------------|----------------------|-------|------|------|------|------|-----|
|                       | čas [min]            | 20    |      |      |      |      | --- |
| Fillamentum White     | $\bar{\sigma}$ [MPa] | 50    | 67   | 62   | 65   | 64   | 58  |
|                       | Nárůst [%]           | -17,1 | 5,7  | 5,7  | 11,4 | 9,5  |     |
|                       | $s_T$ [MPa]          | 1,4   | 1,4  | 1,4  | 2,4  | 6,4  | 2,4 |
| Fillamentum Clear     | $\bar{\sigma}$ [MPa] | 56    | 58   | 62   | 67   | 62   | 63  |
|                       | Nárůst [%]           | -11,4 | -7,9 | -2,6 | 5,3  | -2,6 |     |
|                       | $s_T$ [MPa]          | 4,4   | 7,1  | 1,4  | 3,6  | 1,4  | 0   |
| Volcano PLA           | $\bar{\sigma}$ [MPa] | 43    | 44   | 47   | 47   | 45   | 45  |
|                       | Nárůst [%]           | -3,7  | -1,2 | 4,9  | 3,7  | 0    |     |
|                       | $s_T$ [MPa]          | 2,7   | 0,8  | 0,8  | 0    | 2,4  | 1,4 |
| Fiberlogy HD PLA      | $\bar{\sigma}$ [MPa] | 66    | 61   | 68   | 68   | 68   | 67  |
|                       | Nárůst [%]           | -0,8  | -8,3 | 2,5  | 1,7  | 2,5  |     |
|                       | $s_T$ [MPa]          | 6,1   | 4,4  | 1,4  | 0,8  | 2,7  | 2,4 |

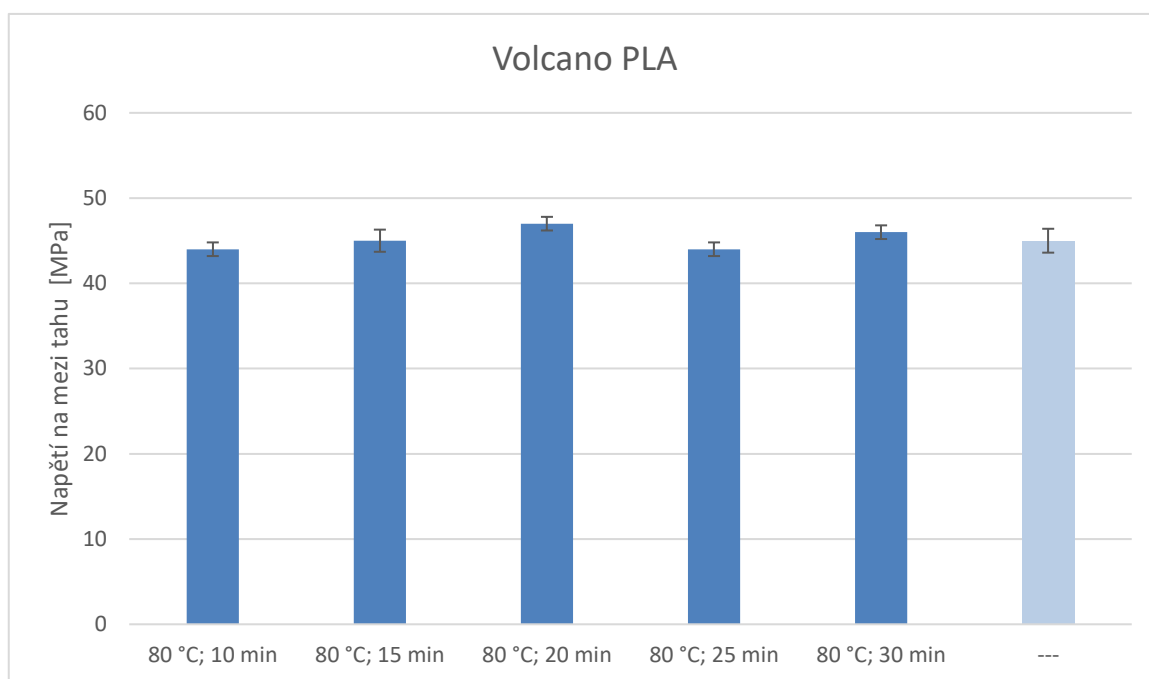
Pro lepší přehlednost jsou výsledky zobrazeny graficky v grafech 3.10 - 3.18.



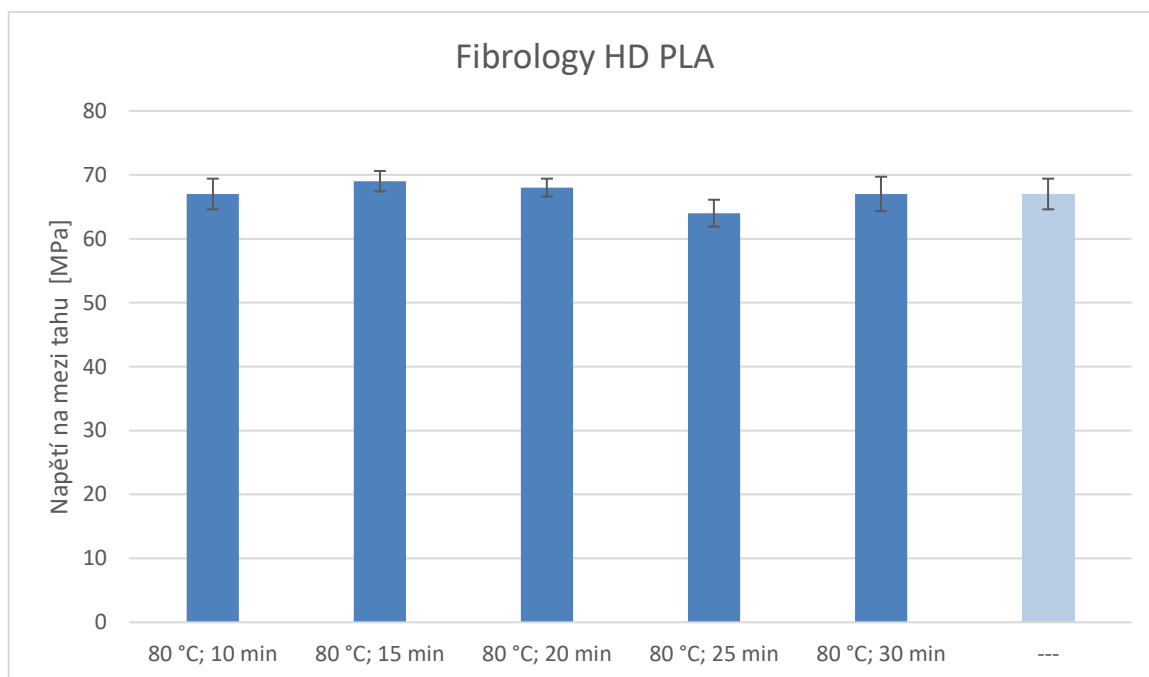
Graf 3. 10 – Závislost mezi napětí v tahu na temperovacím čase pro materiál Fillamentum White.



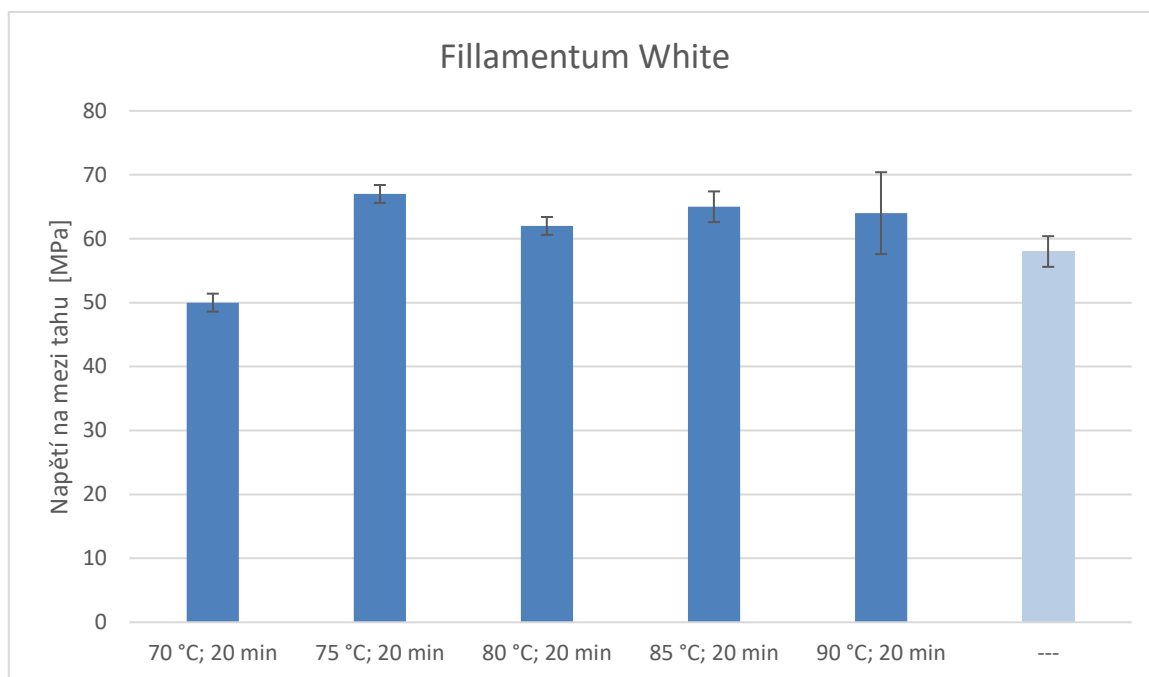
Graf 3. 11 – Závislost mezi napětí v tahu na temperovacím čase pro materiál Fillamentum Clear.



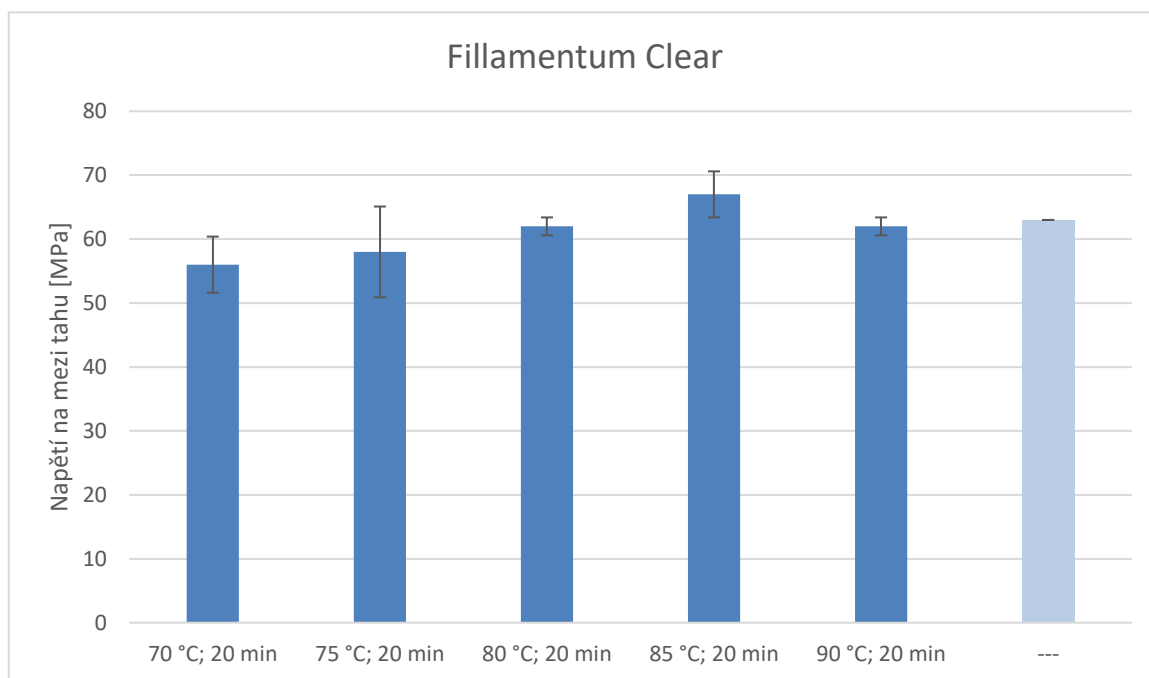
Graf 3. 12 – Závislost mezi napětí v tahu na temperovacím čase pro materiál Volcano PLA.



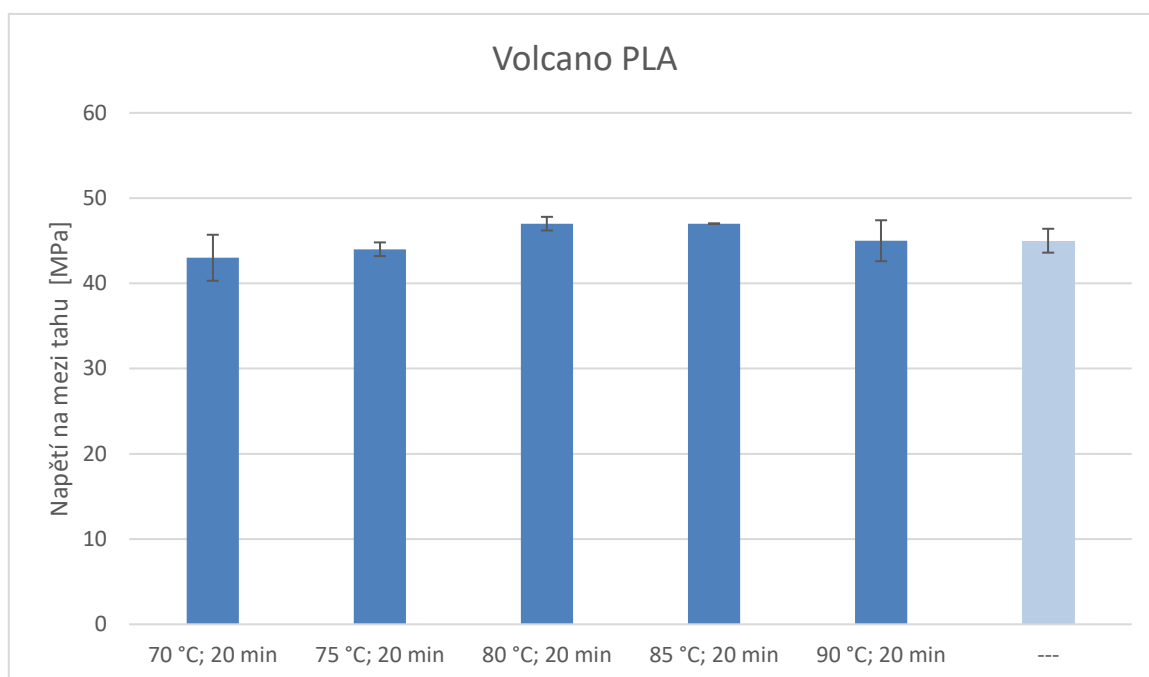
Graf 3. 131 – Závislost mezi napětí v tahu na temperovacím čase pro materiál Volcano PLA.



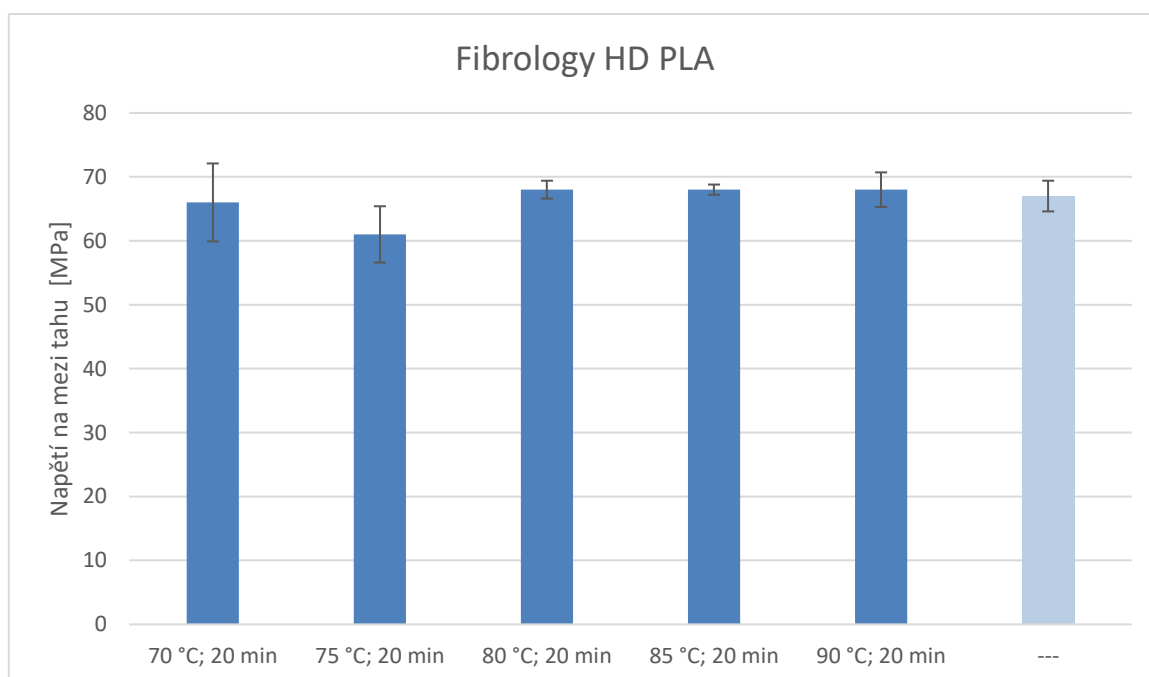
Graf 3. 14 – Závislost mezi napětí v tahu na temperovacím čase pro materiál Fillamentum White.



Graf 3. 15 – Závislost mezi napětí v tahu na temperovacím čase pro materiál Fillamentum Clear.

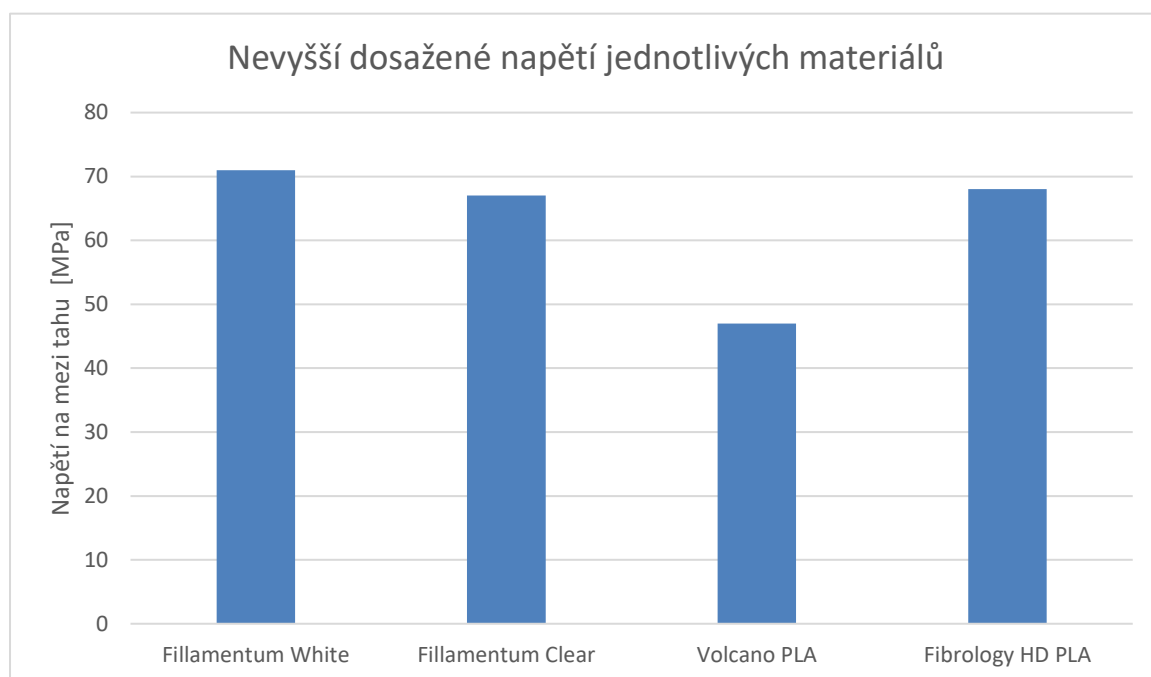


Graf 3. 16 – Závislost mezi napětí v tahu na temperovacím čase pro materiál Volcano PLA.



Graf 3. 17 – Závislost mezi napětí v tahu na temperovacím čase pro materiál Volcano PLA.





Graf 3. 18 – Celkové porovnání nejvyšší dosažené pevnosti v tahu jednotlivých materiálů.

## 4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKU EXPERIMENTU

Z výsledků experimentu, které jsou zobrazeny v kapitole 3 lze vyvodit několik důsledků.

### 4.1 Předpokládané zjištění

Předpokládá se, že nejlepších mechanických výsledků bude dosaženo při měření skupin vzorků, kterých byla nejvyšší hodnota temperovací proměnné. Nevyšší nárůst měřených hodnot tedy bude dosaženo při nevyšší teplotě nebo nejdelším čase. Vyšší teplota při stejné délce procesu bude mít pravděpodobně vyšší vliv na změnu mechanických vlastností, jelikož vyšší teplota urychluje přechod krystalické struktury z amorfni na semikrystalickou, tedy za stejný časový úsek dojde k většímu množství přeměn než u nižších teplot. Delší doba temperování při stejné teplotě média bude mít pravděpodobně vyšší vliv na změnu vlastností, jelikož stejná teplota vody zajistí stejnou rychlost změny krystalické mřížky, za delší časový úsek dojde k více krystalických přeměn.

### 4.2 Vliv temperování na houževnatost

Z výsledků je patrné, že temperování skutečně houževnatost ovlivňuje. Nejvyšší houževnatosti bylo dosaženo u materiálu Volcano PLA

Obecně je možné říct, že předpokládané zjištění platí. Nejjasnější závislost mechanických vlastností je patrná u materiál Fibrology HD PLA. Je možné pozorovat narůstání houževnatosti v závislosti na čase temperování i na teplotě temperovacího média. Zároveň však také narůstá směrodatná odchylka.

### 4.3 Vliv temperování na pevnost v tahu

Také pevnost v tahu je temperováním ovlivněna. Nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu bylo dosaženo u materiálu Fillamentum White

U závislosti mezi napětí v tahu na teplotě je možné u většiny vzorků pozorovat růst napětí do teploty 80 °C. Poté mez napětí narůstá jen velmi minimálně nebo dokonce klesá.

Růst mezi napětí v tahu v závislosti na čase temperování můžeme pozorovat do 20 minut. Poté sice mez napětí v tahu mírně narůstá, avšak také výrazně narůstá směrodatná odchylka, což není žádoucí.

#### 4.4 Tvarová stálost

U několika vzorků je pozorovatelná deformace vlivem teploty. Tato deformace se vyskytovalo primárně u vzorků temperovaných po delší časový úsek nebo při vysoké teplotě. Tyto vzorky jsou viz obrázek č. 11.



Obr. 11 - Deformace vzorků.

#### 4.5 Vizuální vzhled

U vzorků vytištěných z materiálu Filamentum Clear je možné pozorovat změnu ve vzhledu vzorků. Části některých vzorků přešly během procesu temperování z bezbarvého transparentního vzhledu do netransparentního bílého. Tento jev se v určité míře projevoval u všech tepelně zpracovaných prvků, nejmarkantnější byl však u prvků temperovaných při teplotě 90 °C viz vzorek č. 23. Můžeme jej pozorovat na obrázku č. 12.



Obr. 12 - Změna vizuálních vlastností vzorků.

## 5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

### 5.1 Cenové zhodnocení temperování

Průměrná sklokeramická deska, která byla použita k ohřevu vody, má příkon 2,2 kW [34]. Aktuální cena elektřiny je 1,66 Kč/kWh. Ohřev vody na požadovanou teplotu trval 15 minut, samotný proces temperování trval nejdéle 30 minut. Celý proces ohřevu trval tedy 45 minut. Cenu procesu můžeme vypočítat ze vztahu 5.1.

Výpočet nákladů temperace dle vztahu (5.1):

$$N = C \cdot t \cdot P \text{ [Kč]} = 2,74 \text{ Kč} \quad (5.1)$$

Náklady na temperování můžeme považovat za zanedbatelné.

### 5.2 Cenové zhodnocení materiálu

Tab. 5. 1 - Cena materiálu na jednotku hmotnosti [35; 36; 37; 38].

| materiál          | cena/hmotnost<br>[Kč/100 g] |
|-------------------|-----------------------------|
| Fillamentum White | 74,67                       |
| Fillamentum Clear | 88,67                       |
| Volcano PLA       | 142,00                      |
| Fiberlogy HD PLA  | 109,76                      |

Cenové porovnání jednotlivých materiálů je zobrazeno v tabulce 5. 1. U výtisků, u kterých je kladen důraz na houževnatost, se vyplatí investovat do nákladnějšího materiálu Volcano PLA, který je však cca 2x dražší než materiál, který k temperování určen není.

U výtisků namáhaných na tah se nejvíce osvědčil materiál Fillamentum White, který však není určen k temperování. V případě, že uživatel vyžaduje výtisky, které jsou pouze vystaveny napětí v tahu, nevyplatí se investovat do dražších materiálů.

## ZÁVĚR

Během jednotlivých zkoušek bylo prokázáno, že temperování materiálu PLA má na mechanické vlastnosti vliv. Tento proces výrazně zvyšuje houževnatost, a také zvyšuje mez napětí v tahu, ne však tam výrazně. Obecně bylo vyzorováno, že je třeba, aby proces temperování trval alespoň 20 minut při teplotě nejméně 80 °C. Přesné parametry procesu však závisí na materiálu.

Temperování výtisků PLA je výhodné v případě, že uživatel od materiálu žádá vysoké detaily, snadnost tisku a dobré mechanické vlastnosti. Materiál ABS není pro tuto aplikaci vhodný pro jeho tiskovou náročnost a materiál PETG není vhodný pro jeho nízké tiskové detaily.

Vyžaduje-li uživatel vysokou houževnatost objektů, je vhodné použít z testovaných materiálů materiál Volcano PLA, který vykázal nejvyšší hodnoty energie potřebné k přeražení. Nevýhoda tohoto materiálu je jeho pořizovací cena. Jeho vhodné použití jsou kupříkladu zarážky do dveří nebo různé nárazníky.

Je-li výtisk primárně namáhán na tah, je vhodné použít materiál Filamentum White. Tento materiál vykázal nejvyšší mez napětí v tahu. Jeho vhodné použití jsou různá madla, kliky či věšáky. Výhoda materiálu je, že se řadí mezi cenově přijatelnější materiály.

Pro funkční objekty použité v technické praxi je však tato metoda nevhodná. Proti její aplikaci mluví vysoké pořizovací ceny materiálů určených k temperování a nízké hodnoty mechanických vlastností, které nedosahují hodnot jiných materiálů, které lze označit za vhodnější. Mezi takovéto materiály se řadí například ABS nebo ASA. Navíc při technickém tisku uživatel počítá s náročnějším tiskem.

V budoucnu je možné provést dodatečné zkoušky těchto materiálů po temperování, mezi ně se řadí třeba odolnost vůči creepu a nárůst funkční teploty. Další vlastnost, kterou je vhodné otestovat, je rozměrová stálost vzorků.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] 3D tisk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/3D\\_tisk](https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk)
- [2] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [3] KADLECOVÁ, H. *METODY RYCHLÉHO PROTOTYPOVÁNÍ POUŽITELNÉ VE SLÉVÁRENSTVÍ*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSs.
- [4] *Introduction to FDM 3D printing* [online]. 2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [5] PRŮŠA, Josef. *3D Printing Handbook*. Verze 3.11. Praha, 2019.
- [6] *Introduction to FDM 3D printing* [online]. 3D Hubs [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [7] *Inside the makerbot smart extruder plus image* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/593982638329724277/>
- [8] PRŮŠA, Josef. *Návod ke stavbě Original Prusa i3 MK3S*. 3.13. Praha: Prusa Research, 2019.
- [9] *Anet A1284Base V17 Base Control Board* [online]. Joom [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.joom.com/en/products/5ef6ea1e2d236a010624419e>
- [10] Arduino. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- [11] *Nahrání firmware Marlin* [online]. 2018 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2018/05/02/nahrani-firmware-marlin/>
- [12] *Stavebnice 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3S* [online]. Praha: Prusa Research, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/180-stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s.html>
- [13] *PrusaSlicer* [online]. Praha: Prusa Research, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/prusaslicer/>
- [14] 3D printing filament. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing\\_filament](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing_filament)
- [15] Akrylonitrilbutadienstyren. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Akrylonitrilbutadienstyren>
- [16] Polyaktidová vlákna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyaktidov%C3%A1\\_vl%C3%A1kna](https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyaktidov%C3%A1_vl%C3%A1kna)

- [17] Polyethylentereftalát. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyethylentereftal%C3%A1t>
- [18] STRÁTESKÝ, Ondřej. Prusament ASA je tady. Jak a co tisknout s nástupcem ABS?. *Josef Průša* [online]. 2019 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: [https://josefprusa.cz/prusament-asa-je-tady-jak-a-co-tisknout-s-nastupcem-abs/#\\_ga=2.146316532.1973355388.1620674954-30138077.1586110470&\\_gac=1.61337694.1619505852.Cj0KCQjwyZmEBhCpARIsALIZmnJ9ioMcbvZFPgwadYrF55BGY6MpRu7kqpxiUDObVUqB6G4cdxhXCgaAqREEALw\\_wcB](https://josefprusa.cz/prusament-asa-je-tady-jak-a-co-tisknout-s-nastupcem-abs/#_ga=2.146316532.1973355388.1620674954-30138077.1586110470&_gac=1.61337694.1619505852.Cj0KCQjwyZmEBhCpARIsALIZmnJ9ioMcbvZFPgwadYrF55BGY6MpRu7kqpxiUDObVUqB6G4cdxhXCgaAqREEALw_wcB)
- [19] *PLA Extrafill Datasheet* [online]. Hulín: Fillamentum [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: [http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet\\_PLA-Extrafill\\_03012019.pdf](http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_PLA-Extrafill_03012019.pdf)
- [20] *PETG Datasheet* [online]. Hulín: Fillamentum [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: [http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet\\_ASA-Extrafill\\_03012019.pdf](http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_ASA-Extrafill_03012019.pdf)
- [21] *ASA Extrafill Datasheet* [online]. Hulín: Fillamentum [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: [http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet\\_ASA-Extrafill\\_03012019.pdf](http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_ASA-Extrafill_03012019.pdf)
- [22] *ABS Extrafill Datasheet* [online]. Hulín: Fillamentum [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: [http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet\\_ABS-Extrafill\\_03012019-1.pdf](http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_ABS-Extrafill_03012019-1.pdf)
- [23] *ABS PLASTIC MATERIAL PROPERTIES LIST* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://static.webshopapp.com/shops/098890/files/049030006/abs-filament-datasheet-en.pdf>
- [24] Žihání (metalurgie). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BD%C3%ADh%C3%A1n%C3%AD\\_\(metalurgie\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BD%C3%ADh%C3%A1n%C3%AD_(metalurgie))
- [25] Tempering (metallurgy). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tempering\\_\(metallurgy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Tempering_(metallurgy))
- [26] KOČÍ, Jakub. How to improve your 3D prints with annealing. *PRUSAPRINTERS BLOG* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: [https://blog.prusaprinters.org/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing\\_31088/](https://blog.prusaprinters.org/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing_31088/)
- [27] *Struktura polymerů a její vliv na vlastnosti* [online]. [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>
- [28] KOČÍ, Jakub. How to make food-grade 3D printed models. *PRUSAPRINTERS BLOG* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: [https://blog.prusaprinters.org/how-to-make-food-grade-3d-printed-models\\_40666/](https://blog.prusaprinters.org/how-to-make-food-grade-3d-printed-models_40666/)
- [29] *PLA Extrafill* [online]. Hulín [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: [https://www.fillamentum.com/collections/pla-extrafill-filament/?\\_gl=1\\*1tcoqwa\\*\\_ga\\*MTkxNDkwMDM5NC4xNjA2MjE0NDk5\\*\\_ga\\_L7](https://www.fillamentum.com/collections/pla-extrafill-filament/?_gl=1*1tcoqwa*_ga*MTkxNDkwMDM5NC4xNjA2MjE0NDk5*_ga_L7)



- 03XWXLV0\*MTYyMDY0MzQ2MS4xMi4wLjE2MjA2NDM0NjEuMA..&\_ga=2.219839705.1951141477.1620643461-1914900394.1606214499&\_gac=1.45879184.1617189303.EAIaIQobChMI7MW9trPa7wIV0krGCh1KUwA0EAEYASAAEgJQRfD\_BwE
- [30] *PLA Crystal Clear* [online]. Hulín, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: [https://www.fillamentum.com/collections/pla-crystal-clear-filament/?\\_gl=1\\*\\_1tcoqwa\\*\\_ga\\*MTkxNDkwMDM5NC4xNjA2MjE0NDk5\\*\\_ga\\_L703XWXLV0\\*MTYyMDY0MzQ2MS4xMi4wLjE2MjA2NDM0NjEuMA..&\\_ga=2.219839705.1951141477.1620643461-1914900394.1606214499&\\_gac=1.45879184.1617189303.EAIaIQobChMI7MW9trPa7wIV0krGCh1KUwA0EAEYASAAEgJQRfD\\_BwE](https://www.fillamentum.com/collections/pla-crystal-clear-filament/?_gl=1*_1tcoqwa*_ga*MTkxNDkwMDM5NC4xNjA2MjE0NDk5*_ga_L703XWXLV0*MTYyMDY0MzQ2MS4xMi4wLjE2MjA2NDM0NjEuMA..&_ga=2.219839705.1951141477.1620643461-1914900394.1606214499&_gac=1.45879184.1617189303.EAIaIQobChMI7MW9trPa7wIV0krGCh1KUwA0EAEYASAAEgJQRfD_BwE)
- [31] *Volcano PLA* [online]. 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.formfutura.com/shop/product/volcano-pla-2848?category=459>
- [32] *HD PLA* [online]. Fibrology, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://fiberlogy.com/en/fiberlogy-filaments/filament-hd-pla/>
- [33] *IZOD Impact Test Machine by CNCKitchen - Thingiverse* [online]. 2019 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:3511769>
- [34] *Jaký je rozdíl v úspoře energie mezi indukční a sklokeramickou deskou?* [online]. 2008 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zelena-domacnost/dotazy-a-odpovedi/jaky-je-rozdil-v-uspore-energie-mezi-indukcni-a-sklokeramickou-deskou>
- [35] *Volcano PLA White* [online]. 3D Jake [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/formfutura/volcano-pla-white>
- [36] *HD PLA White* [online]. 3D Jake [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/fiberlogy/hd-pla-white>
- [37] *PLA Crystal Clear* [online]. 3D Jake [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/fillamentum/pla-crystal-clear-1>
- [38] *PLA Extrafill Traffic White* [online]. 3D Jake [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.3djake.cz/fillamentum/pla-extrafill-traffic-white>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

| Symbol           | Jednotka | Popis  |
|------------------|----------|--|
| $E_K$            | [J]      | kinetická energie kladiva  |
| $E_V$            | [J]      | energie potřebná na přeražení vzorku   |
| $F_T$            | [N]      | tahová síla potřebná na přetržení vzorku   |
| $H$              | [J/mm]   | energie potřebná na přeražení vzorku vztažená na plochu                                    |
| $\bar{H}$        | [J/mm]   | aritmetický průměr energie potřebné na přeražení vzorku vztažené na plochu                 |
| $\bar{H}_P$      | [J/mm]   | aritmetický průměr energie potřebné na přeražení netemperovaného vzorku vztažené na plochu |
| $S_T$            | [mm]     | plocha průřezu vzorku na zkoušku mezi napětí v tahu  |
| $a_H$            | [mm]     | délka průřezu vzorku na zkoušku houževnatosti  |
| $a_T$            | [mm]     | délka průřezu vzorku na zkoušku mezi napětí v tahu   |
| $b_T$            | [mm]     | šířka průřezu vzorku na zkoušku mezi napětí v tahu   |
| $n$              | [-]      | počet vzorků   |
| $s_H$            | [J/mm]   | směrodatná odchylka houževnatosti  |
| $s_T$            | [MPa]    | směrodatná odchylka mezi napětí v tahu   |
| $\delta_H$       | [%]      | procentuální nárůst houževnatosti oproti vzorkům bez tepelné úpravy                        |
| $\delta_T$       | [%]      | procentuální nárůst meze napětí v tahu oproti vzorkům bez tepelné úpravy                   |
| $\eta$           | [%]      | zbylá procentuální energie kladiva   |
| $\sigma$         | [MPa]    | mez napětí v tahu  |
| $\bar{\sigma}$   | [MPa]    | aritmetický průměr mezi napětí v tahu  |
| $\bar{\sigma}_P$ | [MPa]    | aritmetický průměr mezi napětí v tahu netemperovaného vzorku                               |
| $\sigma_v$       | [MPa]    | mez napětí v tahu vzorku   |