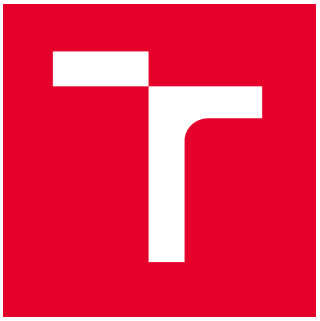


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV DEGRADACE ZVOLENÝCH MATERIÁLŮ PRO FDM 3D TISK V PŘÍRODNÍM PROSTŘEDÍ

THE EFFECT OF DEGRADATION OF SELECTED MATERIALS FOR FDM 3D PRINTING IN NATURAL ENVIRONMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Jan Macháček**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2023

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Jan Macháček**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	**Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok:	2022/23

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 diplomové práce:

Vliv degradace zvolených materiálů pro FDM 3D tisk v přírodním prostředí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor bude zkoumat vliv přírodního prostředí na 3D tištěné materiály. K tomuto účelu vytipuje vhodné materiály, navrhne průběh experimentu a následně jej provede. Provede vyhodnocení testů včetně vlivu na mechanické vlastnosti. V závěru pak vypracuje technicko ekonomické zhodnocení a doporučení využití zvolených materiálů v přírodním prostředí.

Cíle diplomové práce:

– rešerše zvolené problematiky
– návrh experimentu
– provedení experimentu
– vyhodnocení testů
– technicko ekonomické zhodnocení

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 diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je zjistit vliv biodegradačního prostředí na zvolené materiály používané na FDM 3D tisk a jejich vybrané mechanické vlastnosti. Tyto mechanické vlastnosti jsou měřeny v daných intervalech a jsou následně vyhodnoceny. Tímto způsobem je zjištěn vliv biodegradačního prostředí na dané materiálu v průběhu jednoho roku. V technologicko-ekonomickém zhodnocení je doporučen vhodný materiál pro výtisky umístěné v přírodním prostředí.

Klíčová slova

3D tisk, biodegradabilita, FDM, mechanické vlastnosti, degradace, přírodní prostředí

ABSTRACT

The goal of this thesis is to test the effect of biodegradable environment on selected materials used for FDM 3D printing and their mechanical properties. These mechanical properties are measured in intervals and are evaluated. In this manner the effect of biodegradable environment is determined during a year of exposure. In technological-economical evaluation there is a recommendation of a suitable material for printed parts which are exposed in natural environment.

Keywords

3D printing, biodegradability, FDM, mechanical properties, degradation, natural environment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHÁČEK, Jan. *Vliv degradace zvolených materiálů pro FDM 3D tisk v přírodním prostředí* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145746. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou/diplomovou práci na téma Vliv degradace zvolených materiálů pro FDM 3D tisk v přírodním prostředí vypracoval(a) samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Hulín, 23. 05. 2023
místo, datum

Jan Macháček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doktorovi Oskarovi Zemčíkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále chci poděkovat Janu Urbanovi za pomoc s korekturou diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD 9
1 Teoretický úvod 10
1.1 3D tisk 10
1.2 Detailní pohled na FDM tisk 11
1.2.1 Rozdělení FDM tiskáren podle kinematiky 11
1.2.2 Fyzická část tiskárny využívající metodu FDM 14
1.2.3 Softwarová část tiskárny 17
1.2.4 Přehled používaných materiálů k tisku FDM metodou 18
1.2.5 Vliv tiskových parametrů na vlastnosti objektů. 21
1.3 Biodegradabilita polymerů 24
2 Návrh experimentu 28
2.1 Metody testování mechanických a optických vlastností 28
2.2 Volba materiálu 30
2.3 Tisk vzorků 31
2.4 Proces biodegradace 32
3 Zpracování dat experimentální části 33
3.1 Tahová zkouška 33
3.1.1 Výsledky materiálu PLA tahové zkoušky 36
3.2 Rázová zkouška 44
4 Vyhodnocení testů 49
4.1 Vyhodnocení materiálu PLA 49
4.2 Vyhodnocení materiálu PETG 55
4.3 Srovnání obou materiálů 62
5 Technologicko-ekonomické zhodnocení 65
ZÁVĚR 67
6 Bibliografie 68

ÚVOD

V posledních letech se 3D tisk dostal do povědomí široké veřejnosti. Neustálý vývoj v této technologii zapříčinil, že je 3D tisk dostupnější, jednodušší, uživatelsky přívětivější a zároveň levnější než v minulosti. Díky tomuto technologickému vývoji je daleko snadnější implementovat 3D tisk do různých technických odvětví. Namátkově se 3D tisk používá v oblasti konstruování, slévárenství nebo medicíně. [1; 2]

Zároveň uživatelské zjednodušení 3D tisku napomohlo růstu laických tiskařů. 3D tiskárna umožňuje opravy spotřebního zboží, je možné tisknout například časem sešlé držáky, tlačítka nebo jednoduché mechanické komponenty. Další využití 3D tisk nachází v estetické části lidského působení v podobě šperků, dekorativních předmětů nebo je možné běžným předmětům dát netradiční vzhled. Zcela běžné se stalo použití 3D tisku při usnadnění pěstování rostlin a obecně použití v přírodním prostředí. [3]

Právě posledně zmiňovaný bod však nese určitá úskalí. Na trhu s materiály, se kterými jde tisknout, se pohybují materiály, které mají různé výčty vlastností. Některé jsou inzerované jako biologicky odbouratelné, jiné jsou vhodné či nevhodné pro styk s potravinami, další jsou odolné vůči UV záření. Proto jsou nasnadě otázky, co se děje s různými materiály, přijdou-li do styku s bioaktivním prostředím. Co se děje s materiálem, který není vhodný pro styk s potravinami, protože může uvolňovat toxické látky, jenže v podobě květináče se dostává do styku s kořenovým systémem rostliny? Je možné tisknout pomůcku na klíčení avokád z biologicky odbouratelného materiálu? Jak se biologická odbouratelnosti projeví na mechanické vlastnosti a soudržnost takového výtisku?

Cílem této diplomové práce je vytipovat materiály, které jsou vhodné pro aplikace v bioaktivním prostředí. U vytipovaných materiálů budou provedeny zkoušky mechanických vlastností a bude zhodnoceno, jak se v bioaktivním prostředí mění jejich mechanické vlastnosti. Následně bude provedeno ekonomicko-technologické zhodnocení a budou doporučeny vhodné aplikace pro takové materiály.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

Kapitola teoretického úvod obsahuje seznámení s technologií 3D tisku a rozebere nejběžnější metody. Podrobně bude popsána technologie FDM, kterou jsou tištěny vzorky v praktické části. Dále čtenáři objasní problematiku degradability plastů v přírodě.

1.1 3D tisk

Technologie 3D tisku je založena na postupném přidávání materiálu, dokud nevznikne výsledný objekt. Výchozí materiál bývá nejčastěji polymer, tekutá pryskyřice nebo kovový prášek. Výsledný objekt je možné v závislosti na technologii budovat po vrstvách, např. u technologie FDM nebo lokálním přidávání, např. u technologie Cold Spray. [4]

3D tisk se stal velmi významnou součástí Rapid Prototyping (zkráceně RP, česky rychlé prototypování). Nespornou výhodou se stává snadná kusová výroba, která umožňuje levné vytvoření prototypu součásti či sestavy. Je tedy možné pomocí RP dostat fyzický model součásti a vizuálně či mechanicky zhodnotit funkčnost. Díky RP je tedy možné odhalit chybně zkonstruované součásti ještě před zahájením výroby.

Společnou nevýhodou všech technologií 3D tisku je nezbytné tisknutí na již existující kontury. Laicky řečeno není možné tisknout „do vzduchu“. Nejjednodušším řešením této problematiky je vytvoření takového modelu, aby technologicky při tištění nedošlo k tisku mimo hranice fyzické rozměry polotovaru. Dalším možným řešením je např. použití vstupního materiálu jako podpory nebo použití dvou různých materiálů, přičemž jeden je rozpustný v rozpouštědle a druhý ne.

- Stereolitografie

Stereolitografie (zkráceně SLA) je technologie 3D tisku, která jako výchozí materiál využívá fotocitlivé kapaliny, nejčastěji pryskyřice. Tiskárna je vybavena zdrojem světla, který bodově vytvrzuje fotocitlivou kapalinu na tiskové podložce. Vždy je vytvrzována pouze jedna vrstva, až je dokončena, začne vytvrzování další. [5]

Poté co je výtisk hotový, je nezbytný postprocessing modelu. Po samotném tisku je model pokryt kapalinou, která byla využita k jeho tisku a výtisk nemá finální mechanické vlastnosti. Zbylou fotocitlivou kapalinu je nutné odstranit oplachem. K oplachu jsou využívány kapaliny, které jsou k tomu určené. Nejčastěji bývá využíván izopropylalkohol, některé fotocitlivé kapaliny je možné umývat vodou. Špatný oplach nebo přeskočení tohoto kroku vede ke změně rozměrů modelu nebo ke ztrátě detailů. Poté, co je oplach dokončen, je třeba model vytvrdit UV zářením. Tento krok je důležitý kvůli získání očekávaných mechanických vlastností. Postprocessing v podobě odstranění podpor nebo barvení modelů je volitelný. [5; 6]

Významnou předností stereolitografie je její přesnost. Jedná se o velmi přesnou metodu, která je limitována především výškou vrstvy a průměrem laserového paprsku. Ve srovnání s FDM tiskem se jedná o metodu, která produkuje objekty s izotropními mechanickými vlastnostmi. Nevýhodou je naopak malá velikost tiskového prostoru. Obecně se SLA tiskárny řadí mezi tiskárny s nejmenšími tiskovými prostory. Vhodné použití tedy je vytvoření přesných detailních modelů nebo tisk figurek a miniatur do deskové hry. [5]

- Metoda SLS

Selective laser sintering (zkráceně SLS, česky selektivní laserové spékání) je metoda využívající prášek, který je laserem spékán po vrstvách k sobě. Na povrchu částeček dochází k natavení tenké vrstvy materiálu, vrstvy částeček se promísí a při zchladnutí jsou částečky spojeny. Používaný prášek standardně bývá z nylonu či polyamidu, může být i z různých druhů polyuretanu nebo polypropylenu. Výjimečně bývá použit i kovový prášek, který však na rozdíl

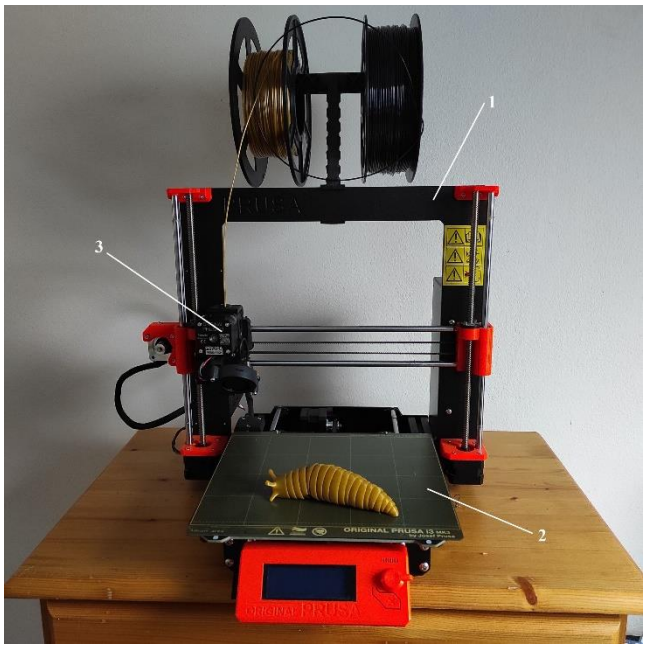
od metody SLM (je popsána dále), není touto metodou zcela roztaven, ale je pouze spečen, což provází snížené mechanické vlastnosti výsledného výtisku. [7]

- Metoda SLM

Selective laser melting (SLM, česky selektivní laserové tavení) je technologie, při které je laserem po vrstvých taven kovový prášek. Může se jednat o širokou škálu materiálů a slitin, mezi používané patří například slitiny mědi, slitiny niklu nebo nerezová ocel. U výtisku je nezbytné následné tepelné zpracování, protože je ve výtisku zbytkové pnutí. U funkčních ploch je nezbytné dodatečné obrábění kvůli veliké drsnosti povrchu, které je charakteristická pro objekty vytvořené touto metodou. Nejběžněji jsou SLM tiskárny používány v letectví, medicíně a ve výzkumných zařízení. [8]

1.2 Detailní pohled na FDM tisk

Fused deposition modeling (zkráceně FDM, česky modelování ukládání tavenin) je metoda využívají roztavené plastové struny, která je nanášena po vrstvách na tiskovou podložku. Nanášení materiálu po vrstvách způsobuje, že výtisk nemá izotropní vlastnosti a soudržnost mezi jednotlivými nanesenými vrstvami je snížena. V současnosti se jedná o jednu z nejpoužívanějších a nejdostupnějších metod, což je zapříčiněno vysokou dostupností materiálů a tiskáren, nízkými pořizovacími a provozními náklady, vysokým množstvím dostupných ovládacích softwarů různé uživatelské náročnosti a přístupnými informacemi na internetu od amatérských uživatelů s neustále se rozrůstajícím počtem přispěvatelů. Příklad FDM tiskárny je na Obr. 1.



Obr. 1 - FDM tiskárna, 1 - rám, 2 - heatbed, 3 - extruder.

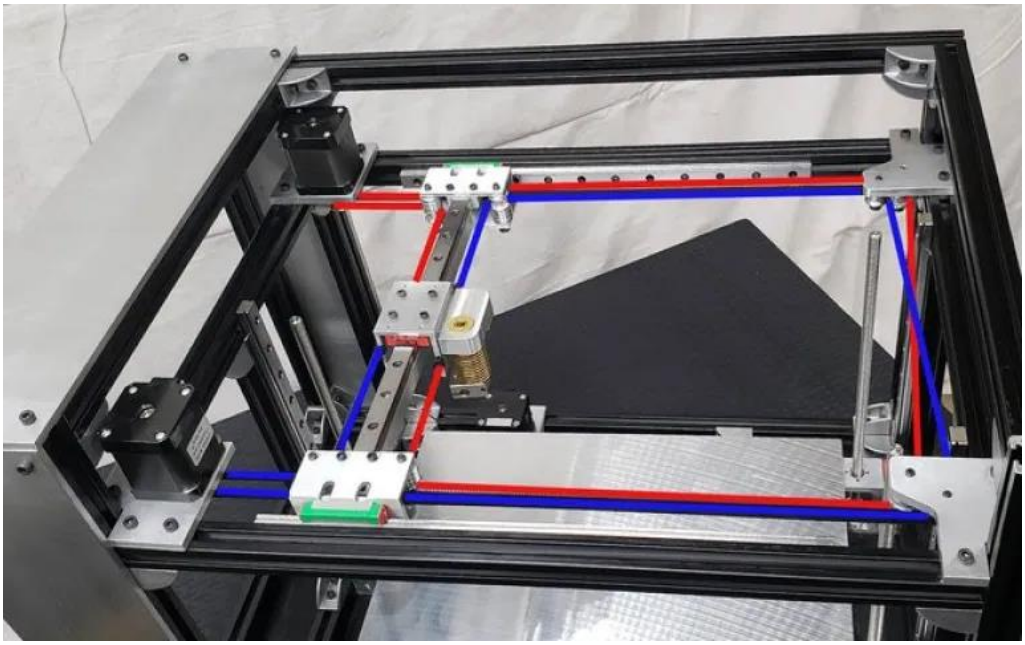
1.2.1 Rozdělení FDM tiskáren podle kinematiky

FDM tiskárny jsou děleny podle kinematiky. Každá kinematika nabízí různé výhody a nevýhody, je tedy třeba při pořízení tiskárny zvážit, k jakému účelu bude tiskárna sloužit a jaká kinematika je nejvhodnější pro danou aplikaci.

U nejběžnější kinematiky 3D tiskáren je využíváno tří nezávislých skupin motorů. Každá skupina pohybuje jednou osou v kartézském systému souřadnic. V praxi jsou používány různá uspořádání. Může se jednat například o řešení, při kterém se tisková hlava pohybuje v osách X

a Y a tisková podložka v ose Z, nebo o řešení, při kterém se tisková hlava pohybuje v ose X a Z a tisková podložka v ose Y. Primární výhoda spočívá v jednoduchosti řízení. Většina těchto kinematik však pohybuje velkou hmotou v podobě tiskové podložky nebo extruderu s motory řídící pohyb jedné osy extruderu, což se při vysokých zrychleních projevuje vibracemi a chvěním. Příklad tiskárny s kinematikou nezávislých motorů je na Obr. 1. [9; 10]

Další kinematika využívá propojení dvou motorů, které závisle ovládají dvě osy. Tento druh kinematiky je označován „Core00“ (za nuly jsou doplněny písmena závislých os). Tuto kinematiku využívá například projekt na bázi licence open source Voron, který využívá kinematiky CoreXY a CoreXZ. Hlavní výhoda spočívá v nízké hmotnosti pohybované hmoty. Běžně je totiž u této kinematiky pohybováno pouze extruderem, což umožňuje velmi vysokou tiskovou rychlost bez možných defektů. Je však náročnější softwarově řídit pohyby motorů, což vyžaduje použití výkonnějších řídících desek než u předchozí kinematiky. [9; 11]

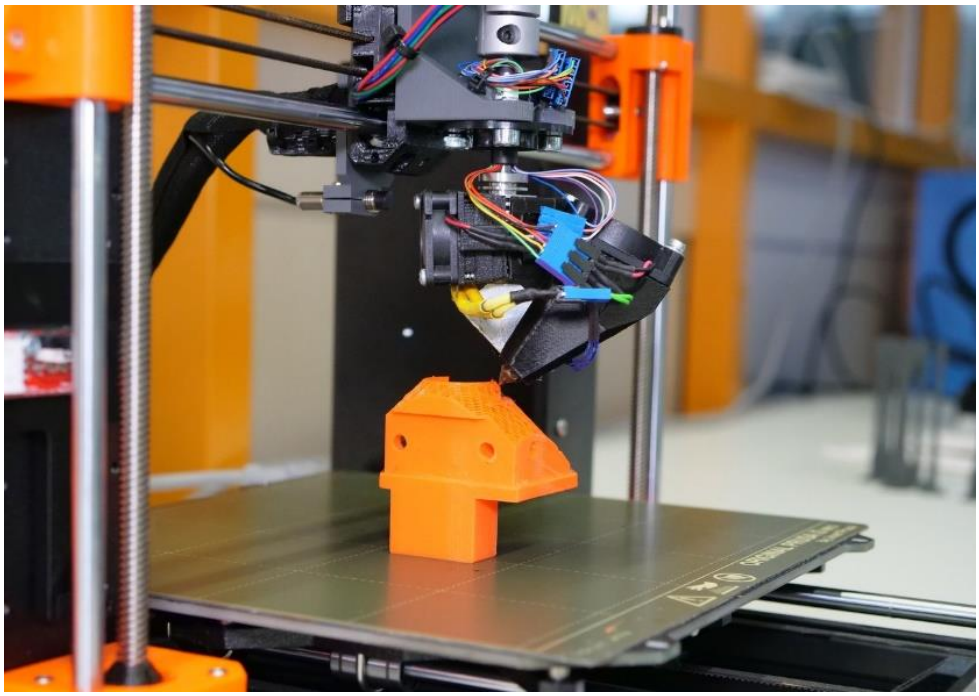


Obr. 2 – Provedení CoreXY kinematiky, barevně zvýrazněny separátní řemeny ovládacích motorů. [12]

Kinematika Delta využívá tří závislých motorů, které ovládají všechny tři osy kartézského souřadného systému, ve kterém se pohybuje tisková hlava. Mezi hlavní výhody patří nízká hmotnost tiskové hlavy, čímž může být dosaženo velkých zrychlení bez vibrací a fakt, že nedochází k pohybu tiskové podložky s tištěných objektem. Provázání všech tří motorů při řízení je však velmi výpočetně náročné, vyžaduje použití kvalitních motorů a tiskárna je velmi náchylná na správné seřízení přesností. Tiskárna využívající delta kinematiku je na Obr. 3 od českého výrobce TRILAB. [13]

Obr. 3 – Tiskárna s kinematikou Delta. [14]

V současnosti se objevují další kinematiky, které jsou však zatím ve fázi experimentů a testování a v současnosti se komerčně nevyrábějí. Jedná se například o kinematiku, která má trysku pod úhlem 45 ° a je doplněna o rotační 4. osu, která otáčí hotendem kolem osy otáčení procházející špičkou trysky, přičmž je osa kolmá k tiskové podložce, viz Obr. 4. Je tak možné dosáhnout daleko větších úhlů převisu a výrazně se snižuje množství potřebných podpěr. [15]



Obr. 4 – Kinematika usnadňující tisk převisů. [12]

1.2.2 Fyzická část tiskárny využívající metodu FDM

Většina FDM tiskáren obsahuje:

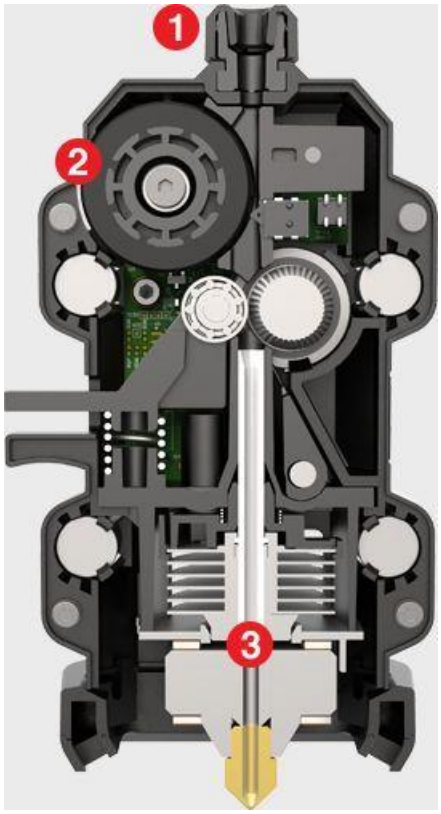
- Rám tiskárny
- Základní desku
- Extruder
- Motory
- Heat bed
- Spojovací prvky
- Zdroj

Rám tiskárny je nejčastěji z kovu, z nichž se mezi běžně používané materiály řadí hliník a ocel. Požadovanými vlastnostmi rámů je tuhost a přesnost. Nízká tuhost rámu způsobuje vibrace, které můžou být přenášeny do podložky nebo do extruderu, čímž vznikají defekty a rozměrové nepřesnosti na tištěném objektu. Nízká přesnost rámu může být provázena snížením přesnosti tisku nebo odchylkami úhlů mezi jednotlivými osami. Spojená s odchylkami úhlů jednotlivých os je ztráta či nepřítomnost rovnoběžnosti vedení, což může vést ke zvýšenému mechanickému namáhání spojovacích prvků či vodicích řemenů. Se zvýšeným namáháním prvků se pojí významné snížení jejich životnosti. Součástí rámu tiskárny může být krytování, které plní především dvě funkce. První funkcí je ochrana před prašností prostředí. Zaprášení komponent se může negativně projevit na životnosti jednotlivých mechanických součástí. Druhou funkcí je tepelná izolace a zadržování tepla uvnitř tiskového prostoru. U některých materiálů není třeba vůbec a je spíše nežádoucí (např. u PLA), u některých je doporučována (např. u ABS nebo ASA) a u některých se jedná o naprostou nezbytnost (např. PEEK). Je-li výtisk, který je z materiálu vyžadujícího zvýšení teploty tiskového prostoru, udržován při vyšších teplotách, než je teplota okolí, snižuje se tím teplotní dilatace způsobená chladnutích plastu, nevzniká v objektu vnitřní pnutí a nedochází tedy k praskání a kroucení dílů. Při užití krytování je žádoucí, aby bylo vystaveno zvýšeným teplotám co nejméně komponent tiskárny, které jsou náchylné na zvýšené teploty. Mezi tyto komponenty patří primárně motory, základní deska a zdroj. Příklad krytované tiskárny je na Obr. 5 [16; 17]

Obr. 5 – Krytovaná 3D tiskárna. [18]

Extruder je část tiskárny, ve které je tisková struna podávána, tavena a nanášena na výtisk. Extruder je dělen na dvě části, coldend a hotend. Řez extruderem je zobrazen na Obr. 6

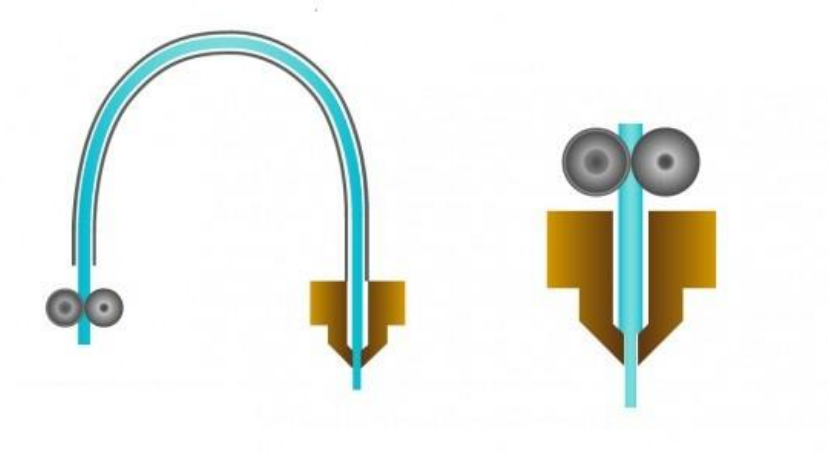
Coldend neobsahuje topná tělesa, jeho funkce je tlačit tiskovou strunu do hotendu. Filament je mechanicky tlačen nejčastěji pomocí vroubkovaných koleček, které jsou napojeny na motor buď přímo nebo přes převodový mechanismus. Hotend obsahuje topné těleso, které zahřívá heatblock, tiskovou trysku a teplotní čidlo. Heatblock je blok materiálu, který kumuluje teplo vytvořené topným tělesem, které mění elektrickou energii na tepelnou. Kumulace tepla zajišťuje teplotní stabilitu, což zajišťuje konstantní podmínky tavby tiskové struny. Požadované vlastnosti heatblocku je vysoká měrná tepelná kapacita a vysoká tepelná vodivost. Teploty tisku se pohybují v závislosti na použitém materiálu od 190 °C pro PLA až po 430 °C pro PEEK. Teplotu heatblocku snímá teplotní čidlo, jehož signál je snímán a vyhodnocován základní deskou. Natavený materiál je z heatblocku nanášen na výtisk pomocí trysky. [16; 17]



Obr. 6 – Řez extruderem, 1 – vstup filamentu, 2 – coldend, 3 – hotend. [19]

Trysky mají v současné době mnoho podob. Jedná se o spotřební zboží, proto je žádoucí, aby byla snadno vyměnitelná. Nejběžněji se do heatblocku zašroubuje pomocí závitu. Vstup do trysky na tavení materiálu má průměr shodný s průměrem používané tiskové struny, což v praxi bývá 1,75 mm nebo 2,85 mm. Průměr trysky na výstupu závisí především na předpokládané aplikaci. Menší výstupní průměr dovoluje tisk větších detailů, prodlužuje však délku tisku, naopak větší průměr výstupu trysky zkracuje délku tisku na úkor kvality. Rozhodující parametry volby průměru trysky jsou funkce výtisku, velikost a požadavky na přesnost. Důležitou vlastností trysky je materiál, ze které je tryska vyrobena. V současnosti jsou nejrozšířenější mosazné, ocelové trysky a trysky s rubínovou špičkou. Tvrdší materiály trysek umožňují tisk abrazivnějších materiálů, např. materiálu s uhlíkovými vlákny, ale cena takových trysek je daleko větší. Dále bývá součástí extruderu ventilátor, který chladí nanesený roztavený materiál, aby nedocházelo k tečení materiálu. [16; 17]

Coldend a hotend můžou být na sebe napojeny přímo nebo přes trubičku, kterou je filament veden. Tato řešení jsou zobrazena na Obr. 7. V případě, že jsou napojeny přímo, je toto řešení nazýváno direct drive extruder (česky extruder s přímým tlačením). Při této variantě provedení je pohybováno celým extruderem, což navyšuje hmotnost, kterou je třeba v daných osách akcelerovat. Při prudkých akceleracích může docházet k vzniku nežádoucích vibrací. Také je zapotřebí ventilátoru, který bude chladit tzv. heatbreak, tedy oblast, která spojuje hotend a coldend, aby nedocházelo k přenosu tepla do coldendu. Hlavní výhodou takového řešení je však krátká dráha, kterou filament musí urazit, při které je na něj působeno tlakové zatížení. Tato skutečnost je především důležitá u flexibilních materiálů, u kterých může dojít ke ztrátě vzpěrné stability, což může zapříčinit, že se filament dostane do míst, které nejsou na jeho zamýšlené trajektorii do hotendu a přerušit tak proces tisku. Při zapojení nepřímo se nejčastěji coldend přichycuje staticky na rám tiskárny a coldend s hotendem se propojují trubičkou z polytetrafluorethylenu (zkráceně PTFE). Takovéto řešení je nazýváno bowdenový extruder. Trubička bývá z polytetrafluorethylenu z toho důvodu, že tento materiál má velmi nízký koeficient tření, není tedy potřeba velké síly k protlačení filamentu. Výhodou tohoto řešení je, že je pohybováno pouze hotendem, je tedy snížena hmotnost pohyblivé části extruderu a je možné dosáhnout vyšších zrychlení bez výrazných vibrací. Další možné řešení je, že je motor umístěn na rám tiskárny, z motoru je vedena ohebná hřídel, která přenáší kroutící moment do pohyblivé části extruderu a mechanismem je tlačena tisková struna přímo do tavné části hotendu. Dochází tím ke spojení obou výhod předešlých řešení. Při použití ohebné hřídele je odlehčena pohyblivá část extruderu, ale zároveň je minimalizována trasa, kterou musí filament urazit při namáhání na tlak. [16; 17]



Obr. 7 – Bowdenový extruder (vlevo), extruder s přímým tlačení (vpravo). [20]

Heatbed neboli vyhřívaná podložka je součást tiskárny, na kterou je nanášena první vrstva. Požadované vlastnosti podložky jsou, aby při tisku držel výtisk pevně na podložce a při dokončení tisku jej bylo možné snadno odstranit. Zvýšení teploty podložky během tisku zvyšuje přilnavost výtisku. Teplota podložky se pohybuje podle použitého materiálu přibližně od 50 °C pro PLA nebo flexibilní materiály do 180 °C pro PEEK. Také hraje roli, jaký povrch daná podložka má. Běžně v praxi bývá použitý ocelový plát s povrchovou úpravou (pro PETG), skleněná deska (pro PLA) nebo nanesení lepící pásky (pro termoplastické elastomery). Pro dosažení ještě větší přilnavosti je možné použít různé prostředky. Je možné použít specializované spreje, rozpuštěné ABS v acetonu nebo tyčinkové lepidlo, které také může sloužit jako separační vrstva pro až příliš přilnavé materiály. Například při tisku PETG na sklo

dochází k velmi důkladnému přilnutí, které může končit destrukcí skleněné podložky. [16; 17; 21]

V tiskárnách jsou nejčastěji používány krokové motory, které jsou použity pro pohyb v jednotlivých osách a pro tlačení filamentu. Jejich nespornou výhodou je přesnost a malá velikost. Na řízení jsou však náročnější než běžné stejnosměrné motory. [10]

Základní deska ovládá celou tiskárnu. Podrobněji bude popsána v softwarové části. Na základní desku je napojen displej, který umožňuje ovládání tiskárny a zobrazuje informace o stavu tisku.

Je třeba pospojovat jednotlivé komponenty tiskárny k sobě. Tyto spoje můžou být: [10; 17]

- pevnostní v podobě šroubů, matic, stahovacích pásek atp.
- pohybové v podobě ozubených řemenů, trapézových tyčí nebo lineárních vedení
- elektronické v podobě spojovacích kabelů

Elektrický zdroj převádí střídavé napětí z elektrické sítě na stejnosměrné, kterým je potom napájena přes základní desku celá tiskárna. Po zdroji je požadováno, aby byl proudově a napěťově stabilní při proměnlivé zátěži. Užití konkrétního zdroje se liší kupříkladu podle maximálních dosahovaných teplot podložky i hotendu, rychlosti tisknu nebo velikosti tiskového prostoru.

U různých tiskáren je možné najít další situační komponenty, které nemusí být přítomny na všech tiskárnách. Tyto komponenty usnadňují samotný tisk nebo zajišťují větší variabilitu tisku. Může se jednat například o [17]:

- Různé senzory – můžou sloužit k měření polohy os, přítomnosti tiskové struny nebo kalibrace jednotlivých os.
- Vedení a uložení tiskové struny – jedná se např. o zařízení, které usnadňuje vedení filamentu nebo umožňuje použití širšího množství špulek, na které je struna namotána.
- Zařízení pro vícebarevný nebo vícemateriálový tisk – může se jednat o více s nezávislých extruderů, které každý tiskne jinou strunou nebo o zařízení, které automaticky mění tiskové struny nebo více strun spojuje do jedné.
- Síťový interface – tiskárna může mít síťový interface, který umožňuje monitoring tisku ve skutečném čase nebo vzdálené zadávání tiskových úloh.

1.2.3 Softwarová část tiskárny

Tiskárna je ovládána firmwarem nahraným na základní desce, čímž jsou zajištěny pohyby jednotlivých os, ovládání tepelných zdrojů a otáček ventilátorů a monitoring teplot a jiných snímačů. Monitoring snímačů a termistorů má také bezpečnostní funkci v podobě ochraně proti přehřátí nebo detekce kolizí.

Jednoduché základní desky bývají modifikací arduina, což je jednoduchá elektronická základní deska, která byla vyvinuta primárně k edukativním a hobby účelům. Zdrojový kód založený na tomto mikrokontroleru bývá často opensource a dá se snadno nahrát pomocí softwaru Arduino IDE. Uživatel tedy může sám upravovat nebo si vybrat z více variant zdrojového kódu, je-li jich více, a využívat ten, který mu vyhovuje. Uživatelsky upravené zdrojové kódy často nabízí možnost vlastních úprav a změn vybavení tiskárny, což se může uživateli umožnit doplnění automatického vyrovnávání osy Z nebo optimalizovat nastavení PID regulátoru, který ovládá a udržuje teploty hotendu či vyhřívané podložky. V možnosti personalizace firmwaru a hardwaru spočívá jejich největší výhoda pro hobby tiskaře. Další výhoda je jejich nízká cena, která se může bohužel významně odrazit na kvalitě. [16; 17; 22; 23]

U kvalitních tiskáren je samozřejmostí možnost aktualizace firmwaru, které zahrnují opravy možných chyb dané verze, doplnění vhodného nastavení nebo zpříjemnění uživatelského rozhraní. Je velmi žádoucí, aby uživatel firmwaru tiskárny průběžně aktualizoval nebo aspoň kontroloval, co daná aktualizace přináší, protože se může jednat o opravu nebo doplnění bezpečnostních funkcí, které mohou zabránit zničení tiskárny nebo významně prodloužit její životnost. [24]

Samotná tiskárna však potřebuje tisková data, která jsou připravována v programu zvaném slicer. Slicer ve svém principu funguje podobně jako CAM program. V nastavení sliceru jsou uloženy běžné uživatelské profily a nastavení tisku a tiskárny, aby byl ušetřen čas a nebylo nutné je při každém tisku nastavovat. Do sliceru je nahrán 3D model výtisku, který je graficky zobrazen. Je možné upravit jeho měřítko, orientaci, případně podle pokročilosti sliceru udělat drobné úpravy modelu. Individuálně je poté doladěno nastavení podle funkce a tvaru konkrétního modelu, např. počty vnějších perimetrů, nastavení podpěr nebo hustota výplně. Model je poté naslicován (český ekvivalent je nakrájen, slicer model „krájí“ po vrstvách a vytváří pokyny pro tiskárny) a následný soubor obsahující tiskové pokyny je uložen. Tento soubor má příponu GCODE. [25]

GCODE je založen na programování CNC strojů. Struktura kódu je stejná, tiskárna však nebude rozumět příkazům specifickým pro obrábění, např. příkazu pro roztočení vřetena po směru hodinových ručiček. Místo těchto příkazů jsou doplněny příkazy specifické pro 3D tisk. Mezi ně patří třeba pro tiskárnu Prusa MK3S kód G10, který zatáhne filament do trysky podle nastavení. Samotná podoba GCODE se však může lišit u každého výrobce. Je tedy třeba správně nastavit, jakou podobu musí mít vygenerovaný soubor, protože chybné nastavení může vést k chybnému tisku nebo poškození tiskárny. [25; 26]

1.2.4 Přehled používaných materiálů k tisku FDM metodou

Tiskový materiál v podobě struny se vyrábí z široké škály materiálů. Různé polymery mají různé vlastnosti a hodí se k různým použití. Samotný materiál je vyráběn v podobě struny v normalizovaných průměrech 1,75 mm nebo 2,85 mm. Příklad tiskové struny je na Obr. 8. Tiskové struny vyrábí velké množství výrobců. Stejný materiál od různých výrobců může mít různé vlastnosti, různou kvalitu, může být hůře či snáze tisknutelný nebo se může výrazně lišit cenou. Uživatel se rozhoduje, jaký materiál k tisku zvolí podle rozličných požadavků. Klíčovou vlastností výrobku může být vzhled, detail, mechanické vlastnosti, tisková náročnost procesu nebo cena tisku, do které se promítá cena materiálu.

Obr. 8 – Tisková struna. [27]

Dříve patřilo ABS (akrylonitrilbutadienstryren) 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 u domácích tiskařů 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. Pro komerční využití se však jedná o velmi oblíbený materiál. [17; 28; 29]

ABS je u hobby tiskařů postupně nahrazováno materiálem PLA (kyselina polymléčná), který je velmi jednoduchý na tisk a je vhodný pro tisk vysokých detailů. Při chladnutí vykazuje malé teplotní dilatace, 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 málo teplotně odolný, bez tepelné úpravy se začíná deformovat mezi 55 °C a 60 °C. Podléhá biodegradabilitě. Patří také k levnější a dostupnějším materiálům. [17]

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, protože způsobuje stringing, což se projevuje tažením vláken plastu za tryskou, které zůstanou na modelu. Z tohoto důvodu není vhodný pro tisk detailních miniatur. Stringing však lze minimalizovat vysušením tiskové struny. Stejně jako PLA je velice dostupný a relativně levný. [17; 30]

V poslední době konkuruje ABS polymer ASA (akronitrylstyrenakrylát, podobné 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, vyhlazování acetonovými parami je tedy o něco složitější, přesto je možné. Mechanické vlastnosti jsou o něco horší než u ABS. [17; 31]

TPE (termoplastický elastomer) a TPU (termoplatický polyuretan) se řadí mezi flexibilní materiály. Tiskové struny se vyrábí v širokém spektru tvrdosti. Čím elastičtější materiál je, tím je náročnější na tisk. Vyžadují krátkou vzdálenost mezi coldendem a hotendem a pomalý tisk, aby byla zvětšena šance na úspěšné vytištění. Některé druhy materiály se špatně přichytávají na běžných tiskových podložkách, u většiny však pomůže je tisknout na lepící pásku. Mají velmi dobrou přilnavost mezi vrstvami, mají vysokou odolnost proti otěru. Jejich použití je velmi specifické, většinou se jedná o díly, na které je kladen požadavek snadné deformace nebo které musejí být schopny velkých elastických deformací. Může se jednat o těsnění, úchyty, tlumiče nebo distanční kroužky. [17; 32; 33; 34]

PC (polykarbonát) je velmi tvrdý materiál, který není tak křehký jako PLA. Je také velmi teplotně odolný. Jedná se o materiál, který je velmi náročný na tisk, k podložce je přichycen za specifických podmínek, vyžaduje úpravu povrchu např. tyčinkovým lepidlem. Jedná se o materiál, který je používán na díly s vysokými mechanickými požadavky, je vhodný kupříkladu na ozubená kola. Díky své teplotní odolnosti je také velmi vhodný na tištěné díly extruderu, které jsou v blízkosti hotendu. [17; 35]

Nylon neboli polyamid se řadí mezi velmi silné a odolné materiály. Samotný nylon má mnoho variant, které se rozlišují podle podoby monomeru a počtu uhlíků, ze kterých je tento monomer složen. Jeho použití je primárně pro mechanicky namáhané součásti. Oproti PC, jehož hlavní výhodou je tvrdost, u nylonu se jedná o houževnatost a ohebnost. Jeho tisk je však velmi problematický, protože se jedná o hydroskopický materiál. Není-li tisková struna vysušena, dochází při tisku k tvorbě bublinek, výtisk pak není rozměrově správný a je narušena soudržnost materiálu. Je třeba skadovat materiál v suchu, případně jej před a při tisku vysoušet. Po vytištění na sebe nylon váže vodu, což má za následek snížení tvrdosti, snížení hodnoty mezi pevnosti, snížení teploty skelného přechodu a navýšení mezi houževnatosti. Schopnost vázat vodu je různá pro polyamidy s různými monomery. [17; 36; 37]

Mezi nejnáročnější a nejpevnější materiál se řadí PEI (polyetherimid), který se běžně označuje jako ULTEM. Jedná se stejně jako v případě nylonu o hydroskopický materiál. Vysoušecí teploty jsou však vyšší, pohybují se kolem 110 °C, při správném vysušení však někteří výrobci deklarují, že se mechanické vlastnosti mohou vyrovnat hliníkovému dílu. Tiskové teploty se pohybují až kolem 370 °C na trysce, 150 °C na podložce. Většina hobby tiskáren není schopna takových teplot dosáhnout a je třeba tento materiál tisknout na průmyslové tiskárně. Tisk tohoto materiálu také vyžaduje vyhřívaný tiskový prostor. [38; 39]

Další z řady průmyslových materiálů je PEEK (polyetheretherketon). Běžně se tento termoplast užívá v letectví, ropném a plynárenském průmyslu. Je třeba jej vysoušet před tiskem a během tisku je třeba udržovat teploty až 410 °C na trysce a 180 °C na podložce. [21]

Existuje mnoho materiálů, které však nejsou příliš rozšířené kvůli jejich specifickému použití. HIPS (high impact polystyrene, polystyren s vysokou rázovou houževnatostí) bývá kombinován s ABS, protože se k sobě oba materiály dobře přichycují k sobě navzájem. HIPS je rozpustné v limonenu, ale ABS je nerozpustné, a proto je možné použít HIPS jako podpůrný materiál pro ABS a podpěry poté rozpustit ve vhodném rozpouštědle. PVA (polyvinylacetát) je materiál rozpustný ve vodě, je proto velmi nepraktické z něj tisknout cokoliv jiného než podpěry, což je jeho vhodné použití. [17; 40; 41]

Do samotných materiálů se často přidávají různá aditiva. Může se jednat o barviva, které mají za úkol změnit vizuál tiskové struny a následný vzhled výtisku nebo o aditivum, které zajistí, že materiál svítí ve tmě. Dále se do tiskových strun přidávají různé částečky, které můžou pozměňovat mechanické vlastnost jako v případě uhlíkových vláken nebo můžou sloužit pouze k vizuální změně jako v případě měděného či bronzového prášku nebo kousíčků dřeva. Velmi často se stává, že přítomnost jiných aditiv než barviv způsobuje vyšší abrazivní vlastnosti

materiálu při tisku. Pro tisk takových materiálů je třeba instalovat ocelovou trysku nebo trysku v rubínovou špičkou. V případě, že se jedná o velké částice, bývá výrobcem tiskové struny doporučováno použít trysku s velkým průměrem špičky. [17]

Důležitou vlastností tiskových strun je tolerance jejich průměru. V současnosti se tolerance pohybují od ±0,02 mm do ±0,1 mm. Tiskovou strunu s tolerancí ±0,02 mm vyrábí český výrobce Prusa Research a.s. Dostupné materiály s takovou tolerancí jsou PLA a PETG. Běžné technické materiály jako například ABS nebo PC se vyrábějí s tolerancí ±0,05 mm a vyšší. Flexibilní materiály zpravidla mají toleranci ±0,1 mm. Menší tolerance znamenají větší rozměrovou přesnost výtisku. Bohužel se mezi tiskové struny s vyšší přesností průměru řadí primárně materiály, které se pro své mechanické vlastnosti nepoužívají pro tisk funkčních objektů. Větší tolerance znamená, že může fluktuovat objem, který je vytlačen z trysky, což může ovlivnit výsledné rozměry, kvalitu povrchu a detail daného objektu. Správným nastavením sliceru je však možné tyto nedostatky výrazně omezit. Správné nastavení sliceru však vyžaduje hlubší znalosti technologie FDM 3D tisku a porozumění vlivů jednotlivých parametrů. [42; 43; 44; 33]

1.2.5 Vliv tiskových parametrů na vlastnosti objektů.

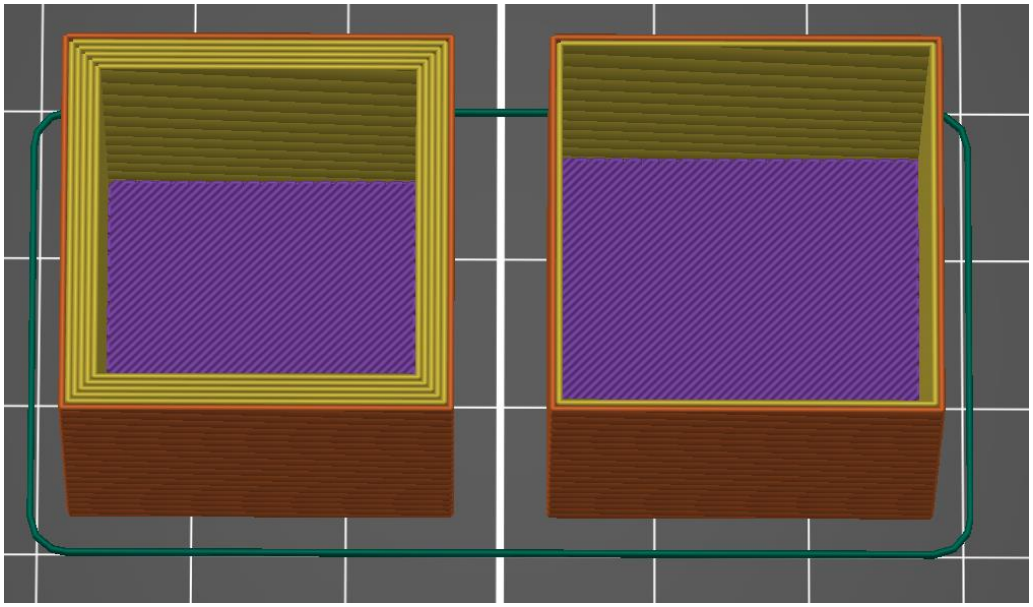
Při tisku objektů je možné nastavit širokou škálu parametrů. Není možné říct, že je pouze jedno nastavení správné. Vždy záleží, jaký je konkrétní účel daného výtisku, vlastnostech a možnostech tiskárny, anebo požadované rychlosti tisku. Je možné najít modely, které slouží jako nástroje na snadnou kalibraci tiskového nastavení. Teplotní věže slouží k nastavení tiskových teplot a chlazení, 3D Benchy, což je velmi oblíbený model lodě, slouží ke kontrole chlazení, tisku převisů, hromadění tepla, tisku detailů a tisku přemostění.

Důležitým parametrem je rychlost a zrychlení při pohybech os. Vyšší rychlosti mají negativní dopady na kvalitu a přesnost vytištěné součásti. V extrémních případech mohou být tiskové rychlosti tak vysoké, že nedochází k celkovému natavení tiskové struny. V takovém případě je nataven pouze částečně a nenatavená část zablokovává trysku, dokud není roztavena. V případě, že k natavení celé tiskové struny nedochází dostatečně rychle, dochází k underextrudingu, což znamená, že je v objektu méně materiálu, než by správně mělo být. Takový výtisk má zhoršené mechanické vlastnosti a je narušena jeho soudržnost. Vysoké rychlosti tisku se hodí převážně v případě, že je důležitý vizuál a není kladen důraz na rozměrovou přesnost nebo mechanické vlastnosti. Vysoká akcelerace může způsobovat vibrace, které se na tisku projevují například nepřesným nanášením materiálu na již vytištěné vrstvy. Naopak velmi nízké rychlosti snižují průtok materiálu tryskou. Dlouhodobé vystavení polymeru degradačním teplotám může negativně ovlivnit jeho vlastnosti. Nízké rychlosti zvyšují přesnost tisku, což je vhodné například u tisku detailních miniatur do deskových her.

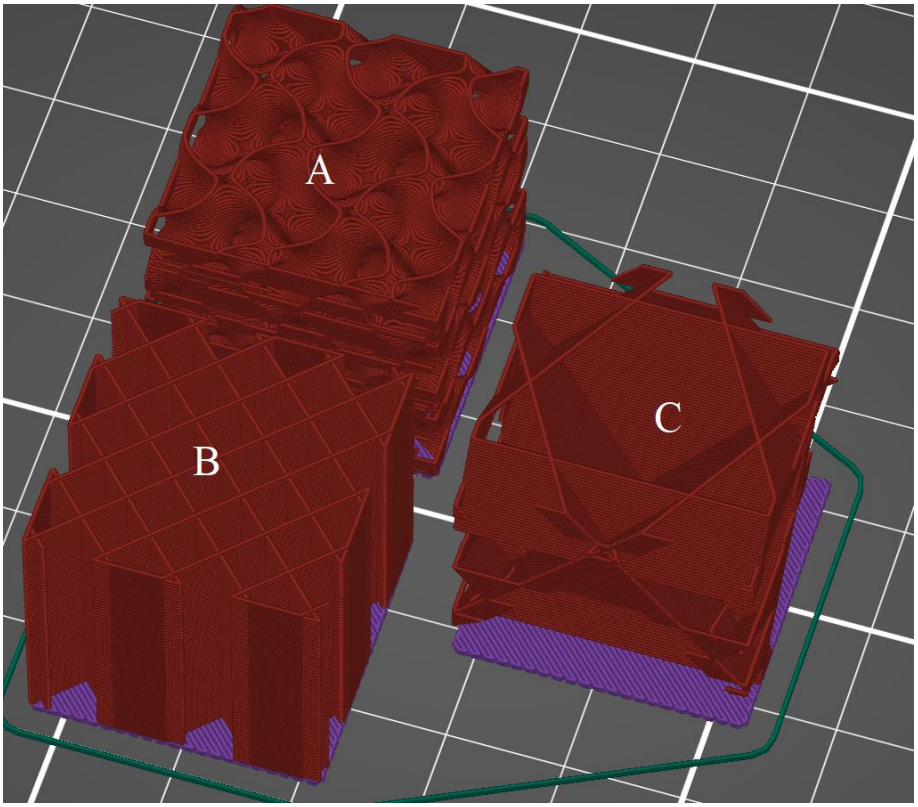
Každý tiskový materiál má interval doporučených tiskových teplot. Při vysokých teplotách je usnadněn průtok tryskou, materiál snáze teče a není potřeba takové síly na vytlačení z trysky. Zároveň dochází k důkladnějšímu spojení materiálu mezi vrstvami, je tedy tištěný objekt silnější v ose Z. Při nižších teplotách materiál rychleji chladne. Kratší časy materiálu v tekutém stavu znamenají snadnější tisk převisů obecně, dovoluje vyšší úhly převisů a usnadňuje tisk přemostění nad místy bez materiálu. Při nižších teplotách tisku se také zmenšuje množství tepla, které je předáváno do již vytištěného materiálu a snižuje se šance, že by se znovu natavil, což hrozí u vysokých tiskových teplot v kombinaci s nízkými rychlostmi tisku.

Většina výtisků se tiskne s určitým počtem perimetrů a s dutinou uvnitř vyplněnou vzorem, který slouží jako podpora pro vrchní části objektu. Vyšší množství perimetrů výtisku zvyšuje pevnost a mechanické vlastnosti za cenu delších tiskových časů a více spotřebovaného materiálu. Nižší množství perimetrů zrychluje tisk, zmenšuje množství vytištěného materiálu,

objekt ale má zhoršené mechanické vlastnosti. Graficky je zobrazený vliv perimetrů na Obr. 9. Výplň, která se nachází uvnitř objektu je vyplněna vzorem, který může mít různou podobu a většina slicerů nabízí různé typy vzorů. Mezi vzory, které šetří čas a slouží pouze jako podpěra se řadí lineární čáry naskládané na sebe nebo čtvercový vzor. Gyroid a 3D plástev se řadí mezi vzory, které zpevňují objekt ve všech osách. Samotná výplň může mít různou hustotu podle potřeby. Faktory, které hustota výplně materiálu ovlivňuje, jsou spotřeba materiálu, doba tisku a pevnost hotového dílce. Různé podpory jsou zobrazeny na Obr. 10.



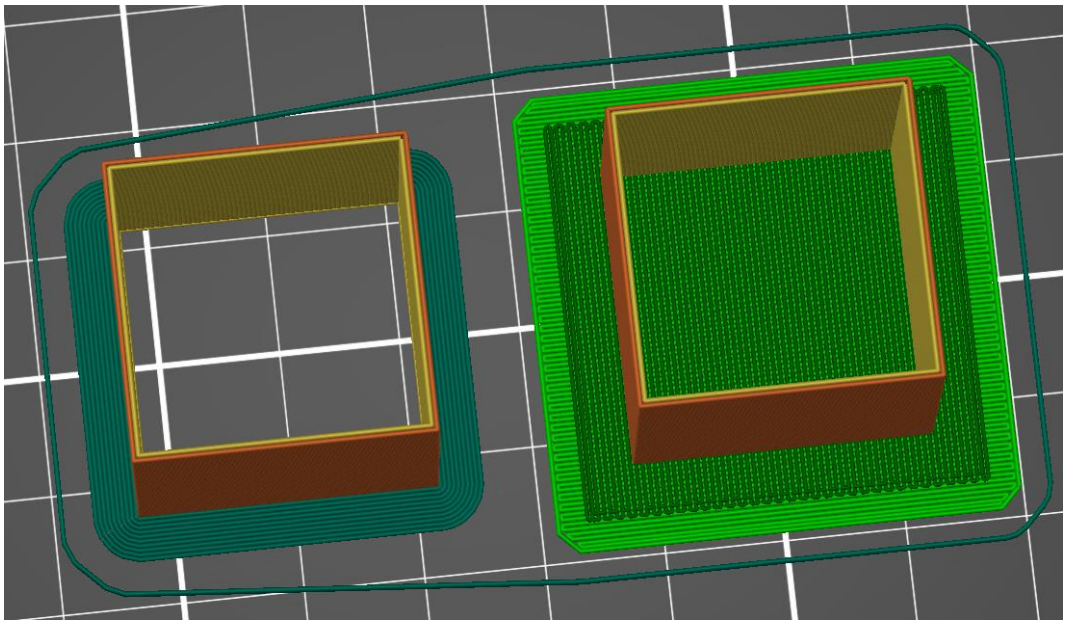
Obr. 9 - Grafické zobrazení počtů perimetrů.



Obr. 10 - Grafické zobrazení výplní (A - gyroid, B - přímočarý, C - kubický).

Důležitým faktorem souvisejícím s teplotou je chlazení již vytlačeného materiálu. Tento parametr však primárně souvisí s materiálem. U PLA je žádoucí, aby byl co nejrychleji schlazen, protože je rychlým chlazením dosaženo nejvyšších detailů. V případě ABS je vytlačený materiál chlazen daleko méně, protože je ABS náchylné na teplotní roztažnosti. Prudké zchlazení tvoří velké pnutí, jehož vlivem může dojít k praskání modelu. Kvůli nezbytnosti pomalého chlazení je proto ABS nevhodné pro díly s velkými a četnými převisy.

Další situační nastavení může pomoci s upevněním výtisků na podložku. Při použití límce dochází k vytištění dodatečného obrysu, který zvětšuje plochu, se kterou s výtisk v kontaktu s podložkou. Tato možnost je obzvlášť užitečná v případě, že má objekt malou styčnou plochu, která je tak navýšena, nebo materiál, ze kterého je objekt tištěn, má špatné přilnavé vlastnosti k podložce. Vizuální zobrazení límce je zobrazeno na Obr. 11 vlevo. Raft slouží jako obětní vrstvy materiálu, které jsou vytištěny pod objekt. Jeho primární funkce je eliminace efektu sloní nohy u objektů, kde je nežádoucí. Efekt sloní nohy je jev, kdy je materiál při nanesení na tiskovou podložku velmi zmáčknut, takže plast nanesený na podložku je rozplácnut do stran a rozměr objektu v místě styku s podložkou není dodržet. Raft je tedy výhodné použít objektů, u kterých je důležité dodržení rozměrových tolerancí, jako jsou ozubená kola nebo součásti, které mají být nalisovány. Raft je zobrazen na Obr. 11 vpravo.



Obr. 11 - Objekt s límcem (vlevo) a s raftem (vpravo).

Je-li to možné, je vhodné navrhovat díly bez nutnosti použít podpěry. V případě, že je nezbytné podpěry použít, je důležité je správně nastavit. Podpěry se nastavují v závislosti na použitém materiálu, složitosti objektu nebo úhlů převisů. Podpěry by měly být nastaveny tak, aby byl zachován požadovaný detail objektu, ale zároveň bylo možné je pohodlně a jednoduše odstranit. Samotné nastavení pak spočívá v hustotě podpor, mezních úhlech nebo ve vzdálenosti v osách od objektů. Velmi často není možné dosáhnout ideálního řešení a pak je třeba udělat kompromis. V případě, že je tiskárna schopna tisknout z více materiálů, je možné k tisku podpor využít rozpustné materiály v různých rozpouštědlech. Takovém případě není třeba nastavit vzdálenost v osách, podpěrný materiál může být v přímém kontaktu se zamýšlenými konturami a není obětován žádný detail.

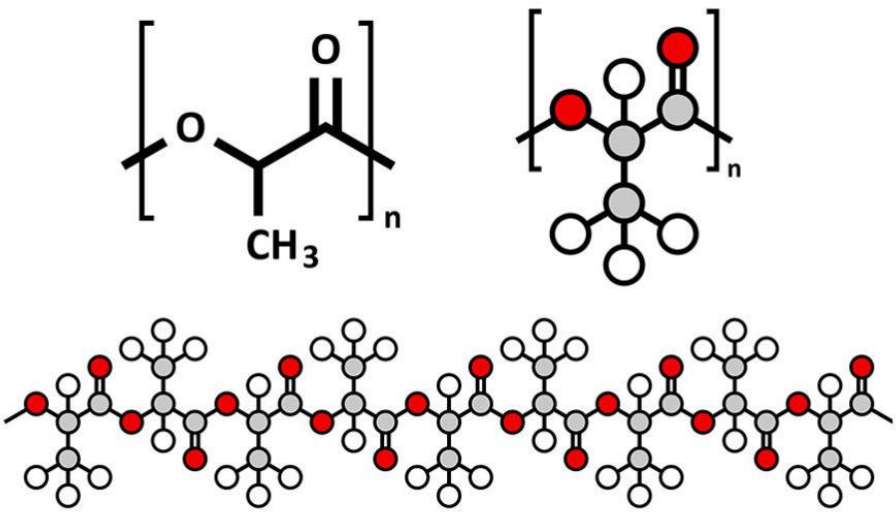
Modifikátor extruze je parametr, který pozměňuje množství vytlačeného materiálu oproti teoretickému objektu, který je vytisknut dokonalou tiskovou strunou s daným průměrem. Úprava tohoto parametru není vhodná pro začátečníky. Ačkoliv je velmi užitečná, je třeba mít

povědomí o procesu tisku a jevech, ke kterým dochází. Je velmi snadné špatně modifikátor nastavit, což může vést k selhání tisku. Při zvýšení modifikátoru extruze dochází k nanášení většího objemu materiálu než je teoretický objem. Přebytečný materiál je vytláčen do stran a dochází k lepšímu a důkladnějšímu propojení materiálu. Může se stát, že je materiál vytlačen nad vrstvu, která je aktuálně tištěna. V extrémních případech může o tento vytlačený materiál zavadit tryska a uvolnit kus z podložky. Toto nastavení je vhodné například pro tisk vodotěsných nádob nebo tenkostěnných objektů, u kterých je materiál vytláčen primárně do stran a ne do výšky. Při snížení modifikátoru extruze je vytlačováno méně materiálu než je teoretický objem. U tlustostěnných objektů by mohly být vytláčením přebytečného materiálu do stran kompromitovány detaily a proto je při tisku takových objektů vhodné nastavit menší modifikátor extruze.

Důležité je, že změna jednoho parametru je provázána se spoustou dalších jevů. Změna rychlosti nemá vliv pouze na rychlost tisku, ale může ovlivnit kvalitu detailů, skutečné množství materiálu, který je nanášen nebo může ovlivnit hromadění tepla nebo chlazení určitých míst na tištěném objektu. Snížení teploty může zlepšit detaily, ale zvýšit potřebnou sílu na vytlačení materiálu a tak bude materiálu nanášeno méně. Při hledání vhodných tiskových parametrů platí, že je vhodné postupovat postupně a měnit jeden parametr a u něj kontrolovat vliv. Za předpokladu, že je změněna rychlost, tisková teplota i modifikátor extruze najednou, není možné určit, který z těchto parametrů způsobuje případný defekt.

1.3 Biodegradabilita polymerů

Polymer je látka, která vzniká spojením organických molekul neboli monomerů do řetězců. Příklad takové molekuly je možné vidět na Obr. 12. Řetězce jsou natolik dlouhé, že jsou jednotlivé molekuly polymerů považovány za makromolekuly. Polymer tvoří řetězec, který se může větvit. Polymery obvykle vznikají polymerizací, polyadicí nebo polykondenzací. Pokud dojde k oddělení či přidání jednotek monomerů, nemá to za následek změnu většiny chemických a fyzikálních vlastností. [45]



Obr. 12 – Polymer – kyselina polymléčná. [46]

Polymery se vyskytují v přírodě nebo můžou být průmyslově vyráběny. Příkladem polymeru vyskytujícího se v přírodě je kupříkladu celulóza, která se využívá například k výrobě papíru. Průmyslové využití v přírodě se vyskytujících polymerů je však limitované. Průmyslově syntetizované polymery se vyrábí z obnovitelných i neobnovitelných zdrojů. Příkladem

polymeru z neobnovitelných zdrojů je ABS nebo PBS (polybutylen sukcinát), které jsou vyráběny z ropy. Mezi polymery vyrobitelné z obnovitelných zdrojů se řadí PLA, které se vyrábí polymerací kyseliny mléčné. Ta se získává například z kukuřičného škrobu. Polymerům vyrobených z přírodních obnovitelných zdrojů se říká biopolymery. [45; 47; 48]

Polymery mohou mít různé uspořádání makromolekul, což ovlivňuje jejich vlastnosti. Je-li uspořádání makromolekul nahodilé, vykazují amorfní vlastnosti. Materiál se potom nahodile větví a větve jsou krátké, což způsobuje nižší hustotu, nižší teplotu skelného přechodu a horší mechanické vlastnosti. Naopak některé polymery mohou mít uspořádané molekuly a vykazovat krystalickou strukturu, v takovém případě jsou jejich molekuly uskupeny do lineárních řetězců s omezeným větvením. Molekuly jsou více uspořádány a naskládány na sebe, což zvyšuje hustotu materiálu, materiál má větší teplotu skelného přechodu a jsou zlepšeny mechanické vlastnosti v porovnání s amorfním materiálem. Některé materiály mohou vykazovat semikrystalické chování. V takovém případě se nachází na škále mezi uspořádanými a nahodilými makromolekulami. [49]

Degradace polymerů je proces, při kterém je narušena chemická soudržnost polymeru a tudíž jsou zhoršeny fyzikální vlastnosti materiálu. Nejvýznamnějšími faktory, které způsobují degradaci, jsou teplo, světlo různých vlnových délek, přítomnost vzduchu nebo vody. Degradace se může projevovat například oxidací nebo sníženým stupněm polymerace. Při degradaci dochází ke zhoršení mechanických vlastností, změně barvy, vzhledu nebo ztrátě soudržnosti. [50]

Proces, při kterém je hmota rozložena pomocí mikroorganismů na oxid uhličitý, vodu a minerální látky, je nazýván biodegradace. Je obecně předpokládáno, že se jedná o přírodní proces. Pokud je tento proces kontrolovaný člověkem, je označován jako kompostování. Doba rozkladu objektu může být velmi rozdílná. V přírodě se běžně pohybuje od jednotek dnů (např. jablko) až po roky (např. spadlý strom). Člověkem vyrobené předměty se mohou rozkládat až tisíciletí (např. sklo). [51]

Samotná biodegradace je souhrn několika procesů, které se můžou v procesu vyskytovat a nemusí. Výsledkem těchto procesů je redukce polymerních řetězců na oxid uhličitý, vodu a soli. Výčet těchto nejdůležitějších procesů je níže: [52]

- Biodeteriorace – souhrn rozkladných procesů, které materiály dělí, štěpí nebo lámou na menší kusy. Může se jednat např. o působení hub, hlodavců, plísní, hmyzu nebo bakterií. [53]
- Depolymerizace – štěpení polymerních molekul, snižování jejich molekulární hmotnost. Vnikají monomery, dimery a oligomery. Ke štěpení dochází enzymy a volnými radikály, které jsou vylučovány mikroorganismy.
- Asimilace – některé molekuly jsou rozeznány receptory mikrobiálních buněk a prostoupí plazmatickou membránou. Takové molekuly jsou v cytoplazmě zahrnuty do metabolismu mikroorganismů. Molekuly jsou využity na výrobu energie, biomasy, nebo různých primárních a sekundárních metabolitů.
- Mineralizace – jednoduché a složité metabolity mohou být vylučovány z buněk a reagovat s okolím za vzniku solí.

Ačkoliv by slovo biodegradace mohlo vzbuzovat domněnku, že se jedná pouze o přírodní procesy, není tomu tak. Aby došlo k rozkladu polymerů se schopností biodegradace, je v přírodě třeba společné působení biologických a nebiologických faktorů. Ve většině případů napomáhají nebiologické faktory (jako je např. světlo, chemické, mechanické nebo tepelné

vlivy) k oslabení polymerní struktury, u které je poté usnadněno působení mikroorganismů. [52]

Biodegradace polymerů je obecně velmi složité téma, protože záleží na mnoho faktorech. Tyto faktory je možné dělit na vnější a vnitřní. Výčet faktorů lze vidět níže: [47]

- Vnější:
    - Prostředí (množství vody, typ půdy, teplota okolí…)
    - Množství přítomných mikroorganismů
    - Druh přítomných mikroorganismů
    - Přítomnost enzymů
- Vnitřní:
    - Druh polymeru
    - Velikost povrchu objektu
    - Fyzikální vlastnosti (hydroskopické, hydrofobní vlastnosti, teplota skelného přechodu, teplota tání…)
    - Chemické vlastnosti (molekulární hmotnost, struktura makromolekul, příměsi…)

V případě, že materiál není rozložitelný, je snaha nepotřebné výrobky z polymerů recyklovat. Ne vždy je to však možné. Je nezbytné, aby výrobky měly na sobě označení, ze kterého materiálu jsou vyrobeny. Tato značka dává recyklačním linkám potřebné informace, aby mohl být odpad určený k recyklaci vytříděn. Polystyren bývá v takovém případě využit jako výplň do jiných polymerů, polyethylentereftalát může být například recyklován a použit při výrobě PET lahví. Je možné najít recyklační značku i na výrobku z materiálu, který není možné recyklovat. Tento materiál je žádoucí vytřídit do správně označeného kontejneru z toho důvodu, že jeho spalování nebo jiný nesprávná manipulace může vypouštět toxické látky. [47; 54]

Obr. 13 – Recyklační značky. [55]

Nejběžnější hobby tiskový materiál v současné době je PLA. Ačkoliv jej mnoho prodejců inzeruje jako biologicky odbouratelný materiál, ve skutečnosti není možné nepotřebné

předměty vyrobené z PLA jen tak hodit do kompostu či do přírody a očekávat, že do týdnů či měsíců po objektu nic nezbude. PLA se totiž rozkládá složitě. Přestože se jedná o materiál vyrobený z kukuřičného škrobu a je tedy přírodního původu, pro svůj rozklad vyžaduje teploty nad 30 °C a zvýšené množství mikroorganismů schopných rozkládat PLA. Problém je, že tyto specifické mikroorganismy nejsou běžně rozšířeny. Pokud jsou podmínky splněny a PLA je rozkládáno v půdě bez zásahu člověka, trvá dlouhou dobu, než je proces rozkladu PLA zahájen a i poté je rozkládání velmi pomalé. Tento rozklad trvá až 80 let. Je však možné tento rozklad uměle urychlit a vhodně navržené industriální kompostéry dokáží PLA rozložit v řádu desítek týdnů. Pro takovýto urychlený rozklad však jsou teplota kolem 60 °C a velmi velké množství organismů schopných rozkladu PLA. [47; 56; 57; 58]

Studie ukazují, že je možné snížit složitost rozkladu PLA přidáním jiného polymeru, který se rozkládá snadněji. Tento přístup zvolila česká firma Fillamentum. Vyrábí tiskovou strunu smícháním PLA a PHB (polyhydrobutyrát), kterou označují názvem NonOilen®. Polymer PHB je schopno rozkládat 0,5-9,6 % ze všech populací mikroorganismů v přírodě, což je více než u polymerů PLA. Díky přítomnosti PHB je zvyšována enzymatická povrchová eroze materiálu. [47; 59]

PETG je další materiál, který je běžně používán jako tisková struna. Je považován za biologicky nerozložitelný. Důvod nerozložitelnosti tohoto materiálu jsou vazby mezi monomery ethylentereftalátu, které jsou esterové. Ačkoliv existují enzymy, které jsou schopné tyto esterové vazby obecně rozkládat, nebyly doposud zjištěny žádné enzymy, které by byli schopné esterové vazby mezi ethylentereftáláty rozbíjet. Přesto je možné, že s rapidním nárůstem v počtu objevených mikrobiálních genomů, budou v budoucnu objeveny enzymy, které jsou schopné rozkládat tyto esterové vazby mezi monomery ethylentereftalátu. [60]

Nejběžnější materiál využívaný na tisk mechanicky namáhaných součástí, je ABS. Jedná se o polymer vyráběný z ropy. Obecně jsou výrobky z ABS považovány za netoxické a vyrábí se z něj například i dětské hračky. Tento polymer je však bezpečný pouze v podobě hotového produktu a změna určitých vnějších faktorů může představovat zdravotní rizika. Při překročení jeho teploty skelného přechodu jsou vypouštěny toxické plyny. Prach a částice ABS jsou dráždivé pro oči, kůži a plíce. Dlouhodobé vystavení UV záření způsobuje postupné vypouštění škodlivých chemikálií. Natavení materiálu způsobuje rozpad polymeru na jednotlivé jeho monomery. Styren je škodlivý a akrylonitril je vysoce toxický. Materiál je biologicky nerozložitelný a jeho snaha o kompostování může vypouštět toxické látky do okolního prostředí při zvýšení teploty nebo při přítomnosti UV záření. Přesto však většina výrobků z ABS končí na skládkách nebo ve spalovnách. [61; 62]

Vyvstává otázka, jak se tedy ekologicky zbavit nepovedených výtisků a odpadu vzniklého tiskem. Ačkoliv se jedná o plasty, není možné tento odpad vyhodit do kontejnerů na recyklovaný odpad. Výtisky nejsou označeny a recyklační linky nejsou schopny zjistit, o jaký konkrétní polymer se jedná. V současné době je tedy jediná možnost vyhodit odpad do komunálního odpadu. [61; 63]

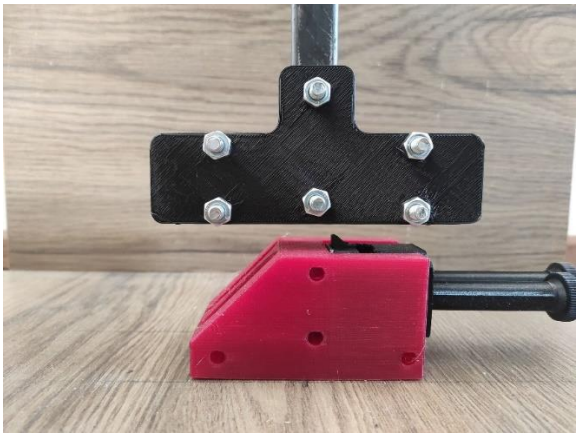
2 NÁVRH EXPERIMENTU

Návrh experimentu diplomové práce se sestává z několika částí. Před volbou materiálu je třeba určit vlastnosti, které budou testovány a metodu, kterou budou měřeny. Je třeba zvolit vhodné materiály, které budou testovány. Od toho se odvíjí tvar vzorků, které budou tištěny. Po určení metod testování mechanických vlastností a vytištění vzorků je třeba určit proces biodegradace, který bude měřen a časové intervaly působení biodegradabilitačního prostředí na jednotlivé vzorky. Poté budou provedeny samotné testy.

2.1 Metody testování mechanických a optických vlastností

Pro zkoušku houževnatosti bylo zkonstruováno vlastní zařízení, jedná se tedy o smluvní zkoušku. Zařízení je zobrazeno na Obr. 14. Zvednuté kladivo ve výchozí poloze má potenciální energii v závislosti na jeho hmotnosti. Po uvolnění kladiva je potenciální energie měněna na kinetickou energii. Tato kinetická energie je spotřebována na přeražení vzorku a poté znovu přeměněna na potenciální energii. Rozdíl počáteční potenciální energie a konečné je roven množství energie, která byla spotřebována na přeražení vzorku. Aby bylo možné měnit potenciální energii kladiva, hlavice byla vytištěna s volným prostorem, kam mohou být vložena závaží. Řez kladivem s volnými místy pro závaží je zobrazen na obrázku Obr. 16. Jako závaží je možné použít rybářská olůvka nebo odřezané stopky fréz ze slinutého karbidu. Pro odečet hodnot byla vytištěna stupnice pro odečet naměřených hodnot. Stupnice má hodnoty od 0 do 100 %, kde procenta představují nespotřebovanou energii kladiva. Při změně váhy kladiva je třeba použít jinou stupnici, protože se změní energie kladiva. Tato zkouška byla prováděna ve dvouměsíčních intervalech.

Obr. 14 – Zařízení na měření houževnatosti vzorků.

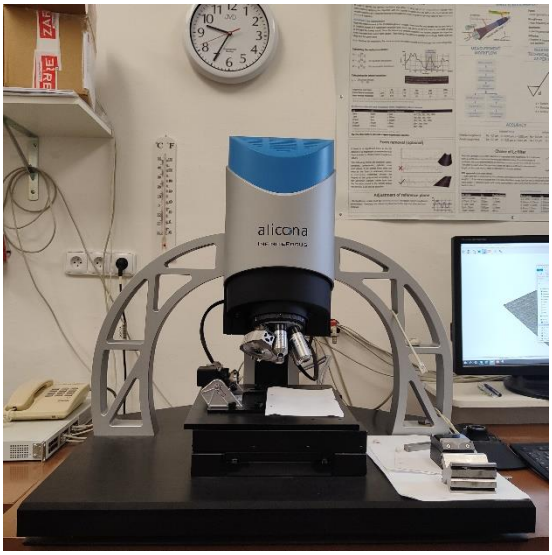


Obr. 15 – Detail přerážecího kladiva se svěrákem.

Obr. 16 – Rozložené kladivo s místy pro závaží.

Zkouška tahem byla provedena na zařízení vlastní výroby doktora Zemčíka. Jedná se o zařízení, které je ovládáno deskou Arduino, do které jsou připojeny krokový motor, tenzometr, snímač polohy a ovládací tlačítka. Samotné Arduino je připojeno pomocí USB kabelu k počítači, se kterým komunikuje pomocí konzole programu Arduino. Vzorek je vložen do zařízení, ve výchozí poloze. Po startu dochází k napínání vzorku pomocí krokového motoru. Do počítače jsou posílány hodnoty síly odečtené z tenzometru a hodnoty aktuální polohy pohyblivé části upínky v předem definovaných intervalech. Poté, co je vzorek přetržen, je možné odečíst z konzole data, která určují, jaká síla působila na vzorek při jeho přetržení a jaké bylo prodloužení vzorku. Tato zkouška, stejně jako zkouška houževnatosti, byla prováděna ve dvouměsíčních intervalech

Optická zkouška byla provedena na dílenském mikroskopu a na zařízení Alicona InfiniteFocus G5. Zařízení Alicona, které je zobrazeno na Obr. 17, je využíváno k mapování povrchu a grafického zobrazení struktury objektu nebo měření drsnosti povrchu. Vhodné použití je např. grafické zobrazení špičky nástroje a zjištění defektů. Optická zkouška je pouze slovní hodnocení pozorování a není z ní datový výstup. Proto byl zvolen čtyřměsíční interval.



Obr. 17 – Zařízení Alicona.

2.2 Volba materiálu

PLA je tiskařský materiál, který je nejběžněji používán. Kvůli svých mechanickým vlastnostem se většinou nepoužívá na funkční mechanicky namáhané modely, nejběžněji se používá na prototypování, vizualizace a estetické modely. Může se zdát bezpředmětné měřit jeho mechanické vlastnosti v průběhu biodegradace, protože se nevyužívá na funkční modely. Jelikož se ale jedná o nejběžněji používaný materiál, množství odpadu, které vniká jeho tiskem je ohromné, což v kombinaci s marketingem, že se jedná o biologicky odbouratelný materiál, může znamenat, že velké množství nepodařených výtisků skončí v přírodě. Současně je také nemalé množství výtisků používáno jako květináče, pomůcky na klíčení avokád nebo vermikompostéry, tedy objekty, které sice nejsou mechanicky namáhané, ale jsou vystaveny biodegradačním vlivům. Z těchto důvodů je PLA zvoleno jako vhodný materiál k testování.

Mnoho tiskařů sáhne po PETG v případě, že potřebují houževnatý, ale levný materiál. Díky jeho vlastnostem je vhodný pro mechanicky namáhané součásti, proto je stěžejní, aby nedegradoval. Zároveň má oproti PLA vyšší teplotu skelného přechodu, takže je možné jej použít kupříkladu na držáky telefonů v automobilu, u kterých hrozí, že ztratí za horkých letních dnů svou soudržnost nebo při použití ve sklenících, kde panují vysoké teploty. Právě u objektů umístěných ve sklenících nebo pařeništích může docházet k biodegradabilitě. U tištěných objektů, které slouží k označení druhu sazenic nevadí, když dojde ke zhoršení mechanických vlastností, ale u květináčů, podtácků nebo třeba podpůrných konstrukcí je stálost mechanických vlastností nezbytná, proto je zkoumán vliv biodegradability na polymer PETG.

Další materiál používán pro jeho mechanické vlastnosti je ABS. Jedná se o náročný materiál na tisk, jeho předností jsou ale mechanické vlastnosti a odolnost vůči vysokým teplotám. Ačkoliv by se mohlo jevit adekvátní jej pro tyto vlastnosti používat v prostředí, které působí biodegradačně, není to vhodné. Ačkoliv PLA i PETG nejsou UV stabilní, jejich degradace nezpůsobuje vypouštění nebezpečných látek. To však není pravda u ABS. Při jeho rozkladu dochází k vypouštění styrenů nebo akrylonitrilu, což jsou toxické látky. Ačkoliv se jedná o stabilní polymer, který je považován za biologicky nerozložitelný, je nebezpečné ho vkládat do kompostu nebo z něj případně tisknout květináče či jiné objekty ve styku s rostlinami. Při jeho rozkladu jinými mechanismy než biodegradací mohou být zmiňované toxické látky vypouštěny do okolí a do půdy. Vzorky byly umístěny do kompostu, aby byly zjištěny vlivy biodegradace a při zvolení ABS by hrozila jeho rozpadem kontaminace kompostu, což vedlo k nezvolení ABS pro tyto testy. [64; 65]

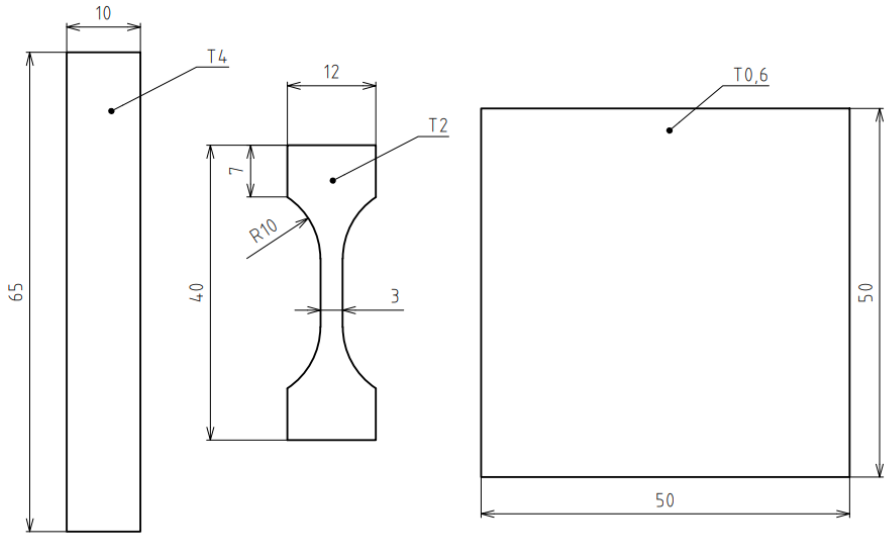
V teoretické části byl zmíněn materiál NonOilen® od české firmy Fillamentum, který je adresován, že se se rozloží za 90 dní v průmyslovém kompostéru. Ačkoliv se jedná o pevný, tvrdý materiál a je možné ho použít na mechanické součásti, jeho použití na mechanicky namáhané součásti v prostředí s biodegradačním vlivem je bezpředmětné, protože právě degradací by se mechanické vlastnosti zhoršovaly. Vhodné použití je tisk objektů, u kterých se předpokládá, že budou třeba jen omezenou dobu. Ideální aplikace je tisk prototypových objektů, které jsou vyžadovány ve své fyzické podobě a po splnění svého účelu jsou místo vyhození do komunálního odpadu biologicky rozloženy. Měření mechanických vlastností vlivem biodegradability je proto bezpředmětné a materiál není zkoumán. [59]

Ostatní materiály popsané v teoretické části nejsou zvoleny. Nylon, PC, PEEK a ULTEM nebyly vybrány pro jejich tiskovou náročnosti a nevhodné aplikaci pro výtisky z nich. Je jen opravdu velmi málo aplikací v biodegradačním prostředí, které vyžadují vyšší mechanické vlastnosti, než které nabídne PETG. U flexibilních materiálů je nemožné zvolenými metodami měřit jejich mechanické vlastnosti. Materiál ASA vybrán není, ačkoliv by se mohlo jednat o

vhodnou volbu. Jedná se o velice stabilní materiál, který má dobré mechanické vlastnosti. Důvod, pro jeho nezvolení, je, že obsahuje toxické monomery akrylonitril a styren, na které by se mohl rozkládat. Ačkoliv by k rozkladu dojít nemělo, není možné riskovat kontaminaci kompostéru.

2.3 Tisk vzorků

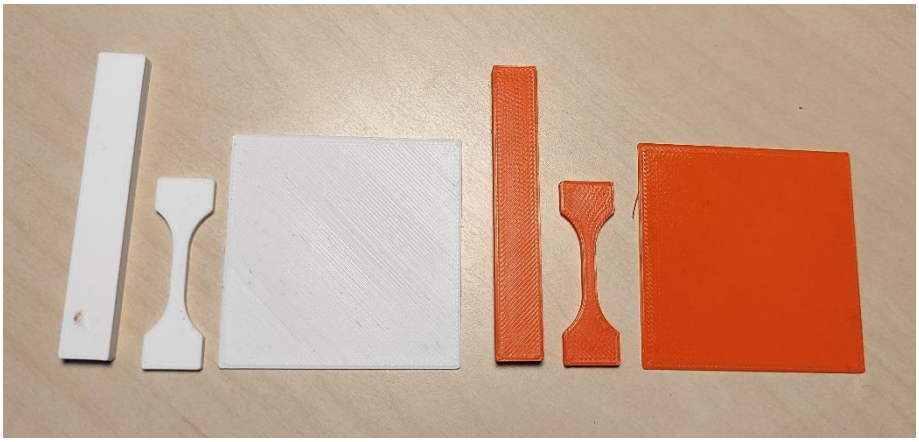
Pro tisk vzorků na zkoušku houževnatosti je zvolen model, který průřezem odpovídá normě ČSN EN ISO 179-1. Tento model je vymodelován pomocí programu Autodesk Inventor. Tvar modelu odpovídá kvádru je patrný na Obr. 18 vlevo. Ke zkoušce mezi napětí v tahu je vymodelován vzorek podle Obr. 18 uprostřed tak, aby byl kompatibilní s upímkou zařízení, na kterém bude zkouška prováděna. Pro optickou zkoušku je vytištěn tenký vzorek čtvercového tvaru, který je vidět na Obr. 18 vlevo.



Obr. 18 – Vzorky použité na měření (zleva – vzorek na měření houževnatosti, vzorek na měření tahových charakteristik, vzorek na optické měření).

Tyto modely jsou následně převedeny na G-CODE pomocí sliceru PrusaSlicer. Ve sliceru jsou přímo přednastaveny vhodné parametry pro tuto tiskárnu, které jsou použity. Jako samotný tiskový profil je použito přímo předdefinované nastavení nesoucí název 0.20mm QUALITY MK3. Jediná modifikace daného nastavení spočívá ve 100% výplni tisku. Plný materiál je zvolen pro maximální homogenizaci vzorku. Různě orientovaná nebo posunutá výplň by mohla mít výrazný vliv na mechanické vlastnosti. Pro materiál PLA od firmy Fillamentum je již přímo předdefinovaný optimální profil, který byl použit. Pro materiál PETG od firmy Fillamentum tiskový profil vytvořený není. Je použito přednastavení materiálu Generic PETG se změnou teplot na středy doporučených tiskových intervalů. Konkrétně se jedná o teplotu 245 °C na trysce a 70 °C na podložce. Zbylé nastavení není třeba nastavovat, protože se jedná o parametry ovlivňující estetiku modelu a ne mechanické vlastnosti.

Samotný tisk proběhl na tiskárně Prusa i3 MK3S. PLA bylo vytištěno na ocelovém plátu s hladkým oboustranným PEI povrchem, PETG bylo vytištěno na ocelovém plátu se zrnitým práškovým PEI povrchem. Oba pláty jsou zakoupeny od výrobce Prusa spolu s tiskárnou. Vytištěné vzorky je možné vidět na Obr. 19



Obr. 19 – Vytištěné vzorky použité na měření (bílé – materiál PLA, oranžové – materiál PETG).

2.4 Proces biodegradace

Při provádění experimentu je cílem umístit vzorky prostředí, které má nejpříznivější vliv na biodegradabilitu, která může nastat. V úvahu připadá kompostér (na Obr. 20) nebo vermikompostér (na Obr. 21). Obě jsou zařízení, které slouží k biologickému rozkládání organických zbytků. Do vermikompostéru se však vkládá k rozložení méně druhů organických materiálů než do kompostéru. Je možné vložit pouze zbytky ovoce a zeleniny. Do kompostu je na druhou stranu možné vložit vše, u čeho se předpokládá, že bude rozloženo maximálně v řádu měsíců. Širší spektrum rozložitelných organických zbytků předpokládá širší spektrum organismů, kteří jsou schopni biologického rozkladu. Z toho důvodu jsou vzorky umístěny do kompostu.

Obr. 20 – Kompostér. [66]

Obr. 21 – Vermikompostér. [67]

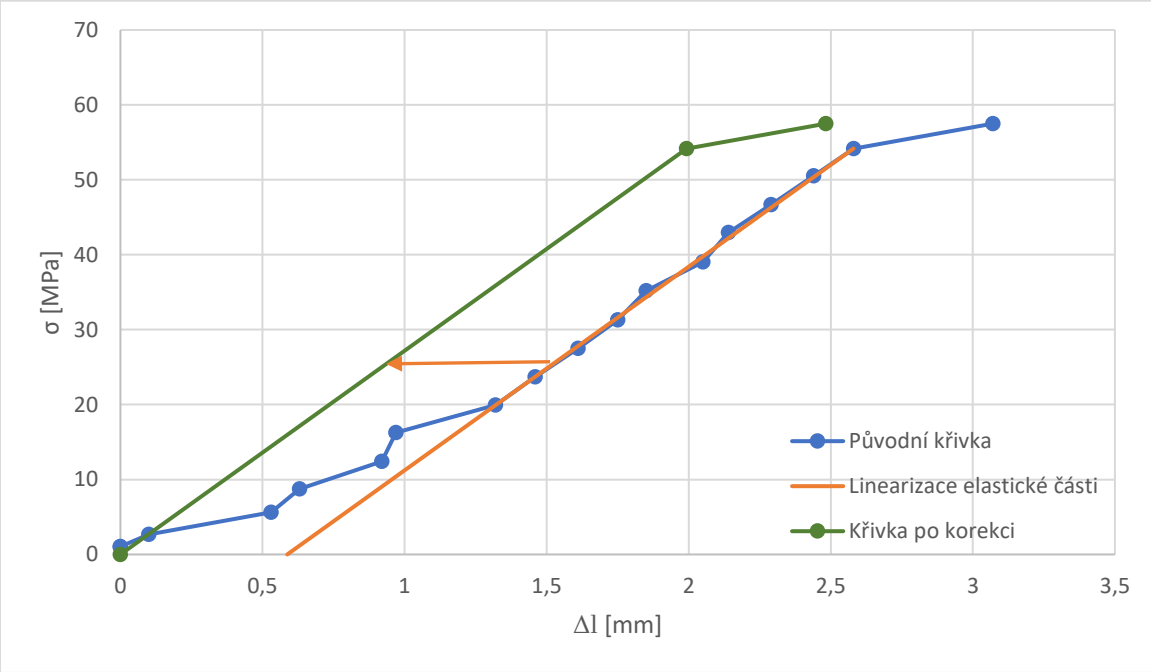
Vzorky jsou ponechány v biodegradačním prostředí a jsou vytaženy po časových intervalech 2, 4, 6, 8, 10 a 12 měsíců. Dochází k oplachu hlíny a zbytků rozložených biologických materiálů a vzorky jsou usušeny. Poté jsou provedeny zkoušky mechanických vlastností. Zároveň jsou provedeny zkoušky mechanických vlastností na kontrolní skupině vzorků, které nejsou vystaveny biodegradačním vlivům.

3 ZPRACOVÁNÍ DAT EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

3.1 Tahová zkouška

Při tahové zkoušce byl získán výstup dat provedených měření v krocích. Každý krok obsahuje zaznamenaná data o aktuální poloze pohyblivé části svěráku a síle, která v daný okamžik působila.

Při měření má zařízené určitou vůli. U prvních kroků je patrné, že se vymezují vůle v zařízení. Poté, co jsou vůle vymezeny, je napínán samotný vzorek. Elastická deformace vzorku má lineární charakter. Následuje plastická deformace, která má charakter křivky. Při vyhodnocování dat je třeba provést korekci, která odstraní z měření projev vymezování vůlí v zařízení. Celý proces je graficky znázorněn na Obr. 22. Je třeba určit přímku, která charakterizuje lineární část deformace a najít její průsečík s osou prodloužení. Celé měření je poté posunuto o velikost vzdálenosti průsečíku od počátku souřadnic. Elastická část je poté nahrazena úsečkou.



Obr. 22 – Provedení korekce měření.

Za nulovou polohu upnutí je považována hodnota polohy v počátku souřadnic úsečky znázorňující elastickou deformaci během měření. Došlo tak k redukci a zjednodušení celkového počtu bodů. Změna délky vzorku v i-tém kroku je vypočteno podle (4.1). Procentuální prodloužení v i-tém kroku je získáno z (4.2). Výpočet napětí v i-tém kroku je proveden užitím rovnice (4. 3).

$$\Delta l_i = |l_0 - l_i|, \tag{4.1}$$

kde: Δl_i – protažení vzorku v i-tém kroku $[mm]$,
l_0 – nulová poloha svěráku daného vzorku $[mm]$,
l_i – poloha svěráku daného vzorku v i-tém kroku $[mm]$.

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_v} \cdot 100\ \%, \tag{4.2}$$

kde: ε_i –procentuální protažení vzorku v i-tém kroku [%],

Δl_i – protažení vzorku v i-tém kroku $[mm]$,
l_v – původní délka daného vzorku $[mm]$.

$$\sigma_i = \frac{F_i}{S}, \tag{4. 3}$$

kde: σ_i – napětí působící na i-tý vzorek $[MPa]$,
F_i – síla působící na i-tý vzorek $[N]$,
S – průřez vzorku $[mm^2]$.

Maximální zjištěná hodnota napětí je zaznamenána jako mez pevnosti daného materiálu a je značena jako σ_p. Při překročení této hodnoty napětí dochází k porušení celistvosti vzorku. Tato hodnota je následně statisticky zpracována spolu s procentuálním prodloužením.

Pro statistické zpracování byla využita průměrná hodnota ze statistického souboru pro daný časový interval. Výpočet pro průměrnou mez pevnosti a průměrné procentuální prodloužení je podle vzorců (4.4) a (4.5). Průměrné procentuální prodloužení a směrodatná odchylka procentuálního prodloužení byla vypočtena dle vzorců (4.6) a (4.7). Pro výpočet procentuální změny mezi pevnosti materiálu vlivem biodegradačních účinků oproti kontrolnímu vzorku byl užit vzorec (4.8). Obdobně bylo využito vzorce (4.9) pro vyjádření procentuální změny prodloužení materiálu, na který působil vliv biodegradace, oproti kontrolnímu vzorku. Je-li procentuální změna rovna 100 %, znamená to, že je daná charakteristika stejná jako u kontrolního vzorku. Vypočtené hodnoty byly vloženy do tabulek v následujících podkapitolách.

$$\overline{\sigma_{pJ}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sigma_{pi}, \tag{4.4}$$

kde: $\overline{\sigma_{pJ}}$ – průměrná mez pevnosti pro daný statistický soubor $[MPa]$,
σ_{pi} – mez pevnosti pro i-tý vzorek statistického souboru $[MPa]$,
n – počet vzorků ve statistickém souboru $[-]$.

$$s_{\sigma J} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\cdot\sum_{i=1}^{n}\left(\sigma_{pi} - \overline{\sigma_{pJ}}\right)^2}, \tag{4.5}$$

kde: $s_{\sigma J}$ –směrodatná odchylka mezi pevnosti odhadnutá aritmetickým průměrem $[MPa]$,
$\overline{\sigma_{pJ}}$ – průměrná mez pevnosti pro daný statistický soubor $[MPa]$,
σ_{pi} – mez pevnosti pro i-tý vzorek statistického souboru $[MPa]$,
n – počet vzorků ve statistickém souboru $[-]$.

$$\overline{\varepsilon_J} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i, \tag{4.6}$$

kde: $\overline{\varepsilon_J}$ – průměrné procentuální prodloužení pro daný statistický soubor [%],
ε_i – procentuální prodloužení pro i-tý vzorek statistického souboru [%],
n – počet vzorků ve statistickém souboru$[-]$.

$$s_{\varepsilon J} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\cdot\sum_{i=1}^{n}\left(\varepsilon_i - \overline{\varepsilon_J}\right)^2}, \tag{4.7}$$

kde: $s_{\varepsilon J}$ –směrodatná odchylka procentuálního prodloužení odhadnutá aritmetickým průměrem [%],
$\overline{\varepsilon_J}$ – průměrné procentuální prodloužení pro daný statistický soubor [%],
ε_i –procentuální prodloužení pro i-tý vzorek statistického souboru [%],
n – počet vzorků ve statistickém souboru [−].

$$\psi_{\sigma J} = \frac{\overline{\sigma_{pJ}}}{\overline{\sigma_{p0}}} \cdot 100\ \%, \tag{4.8}$$

kde: $\psi_{\sigma J}$ – procentuální změna mezi pevnosti vlivem biodegradace daného statistického souboru oproti kontrolní skupině [%],
$\overline{\sigma_{p0}}$ – průměrná mez pevnosti kontrolní skupiny $[MPa]$,
$\overline{\sigma_{pJ}}$– průměrná mez pevnosti daného statistického souboru $[MPa]$.

$$\psi_{\varepsilon J} = \frac{\overline{\varepsilon_J}}{\overline{\varepsilon_0}} \cdot 100\ \%, \tag{4.9}$$

kde: $\psi_{\varepsilon J}$ – procentuální vyjádření hodnoty prodloužení daného statistického souboru oproti kontrolní skupině [%],
$\overline{\varepsilon_0}$ – průměrné procentuální prodloužení kontrolní skupiny [%],
$\overline{\varepsilon_J}$– průměrné procentuální prodloužení daného statistického souboru [%].

Pro grafické zobrazení závislosti napětí na procentuálním prodloužení v průběhu biodegradace byl vybrán takový vzorek ze statistického souboru, jehož hodnota mezi pevnosti je mediánem v daném statistickém souboru. Pro získání grafických výstupů byla závislost vynesena do grafu.

3.1.1 Výsledky materiálu PLA tahové zkoušky

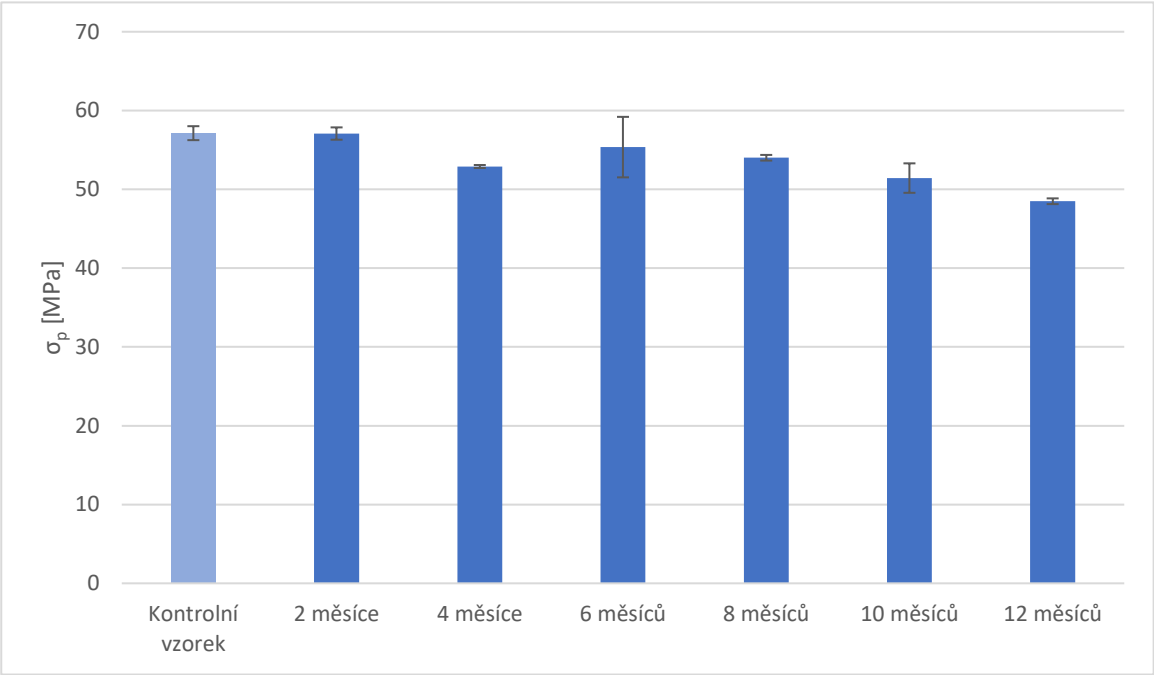
Tab. 1 - Vliv biodegradability na tahové vlastnosti materiálu PLA

Měsíce		0	2	4	6	8	10	12
Průměrná mez pevnosti	$[MPa]$	57,13	57,08	52,90	55,36	54,01	51,43	48,49
Směrodatná odchylka mezi pevnosti	$[MPa]$	0,885	0,782	0,188	3,840	0,359	1,869	0,365
Procentuální změna oproti kontrolní skupině	[%]	100	99,9	92,6	96,9	94,6	90,0	84,9
Průměrné prodloužení	[%]	5,97	5,73	5,70	5,62	5,49	4,86	5,54
Směrodatná odchylka prodloužení	[%]	0,522	0,478	0,503	0,793	0,263	0,725	0,954
Procentuální změna oproti kontrolní skupině	[%]	100,0	96,0	95,5	94,2	91,9	81,5	92,9

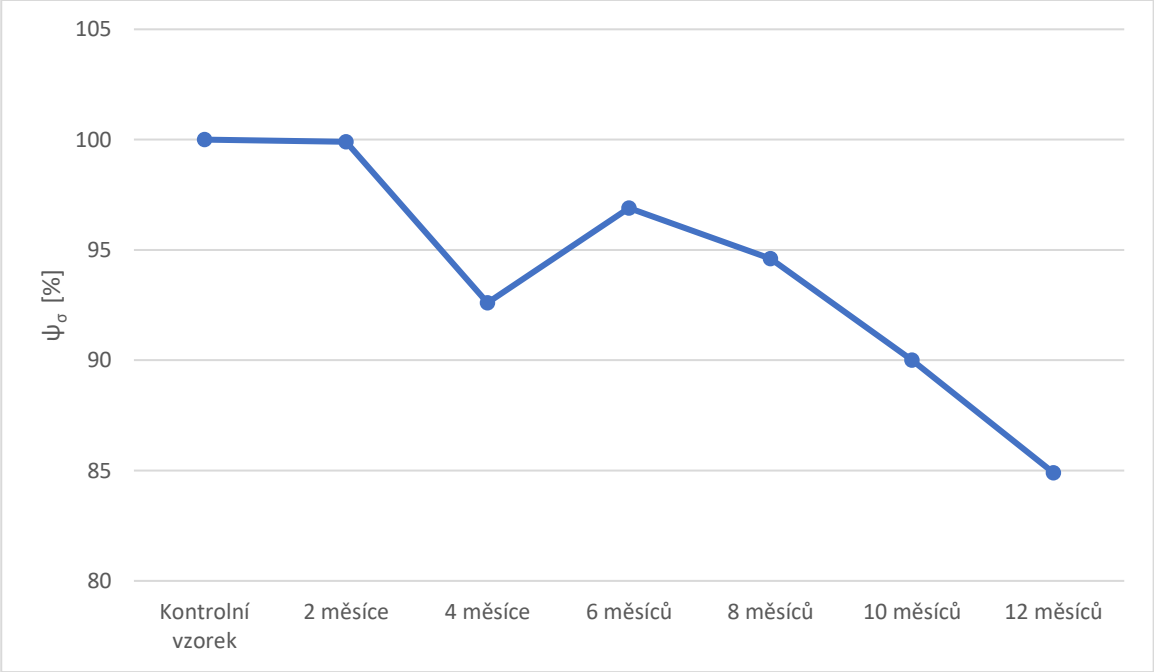
V Tab. 1 jsou vypsány výsledky tahové zkoušky materiálu PLA. Pro lepší přehlednost jsou poté vyneseny do grafů. Na Obr. 23 je možné pozorovat vývoj hodnot mezi pevnosti v MPa, na Obr. 24 jsou vyneseny procentuální změny oproti původní hodnotě mezi pevnosti. Obr. 25 zobrazuje vývoj prodloužení vzorků v okamžiku, kdy bylo dosaženo mezi pevnosti. Obr. 26 zobrazuje procentuální vývoj prodloužení v závislosti na kontrolním vzorku bez vlivu biodegradace. U materiálu je možné pozorovat postupné snižování mezi pevnosti s výjimkou 4. měsíce. Mez pevnosti postupně nelineárně klesá až na hodnotu 84,9 % původní hodnoty bez vlivu biodegradability, což je možné pozorovat na Obr. 24.

Měření vzorků po 4 měsících je měření s nejmenší směrodatnou odchylkou u mezi pevnosti, jedná se tedy o velmi konzistentní hodnoty, ačkoliv se jedná výsledky, které se vymykají pomyslné křivce poklesu mezi pevnosti. U měření po 6 měsících byla odhadnuta směrodatná odchylka 3,84 MPa, což je daleko větší než u zbylých případů. Tento velký rozptyl naměřených hodnot u tohoto statistického souboru vyvolává otázku, je-li měření validní. U měření po 4 měsících i u měření po 6 měsících je možné, že bylo provedeno chybné měření nebo hodnota skutečně odpovídá realitě. Pro určení validity výsledku měření je vhodné provést další měření se stejnými parametry a porovnat s naměřenými hodnotami, celkový trend vlivu na mechanické vlastnosti je však možné odhadnout i bez opakovaného měření.

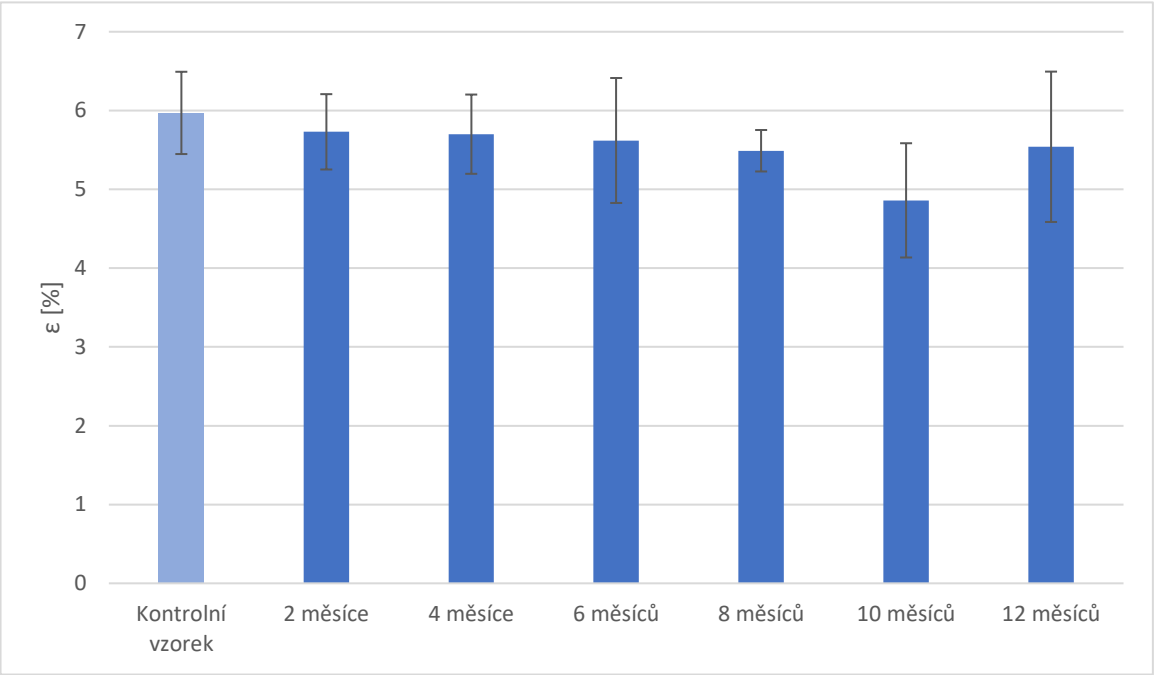
Na vývoji prodloužení v momentě přerušení soudržnosti vzorku je možné pozorovat klesající závislost s výjimkou měření po dvanácti měsících. Toto měření má však největší směrodatnou odchylku, a může se proto jednat o měření s chybou. Nezdá se, že by odhad směrodatné odchylky sledoval nějaký trend.



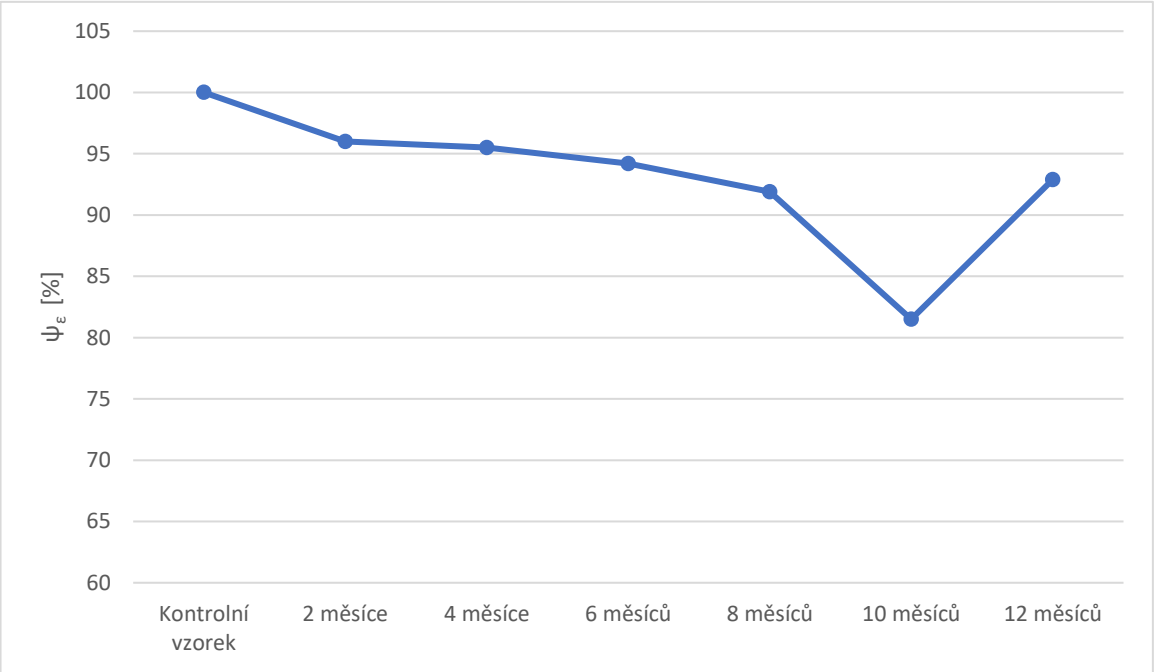
Obr. 23 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na mez pevnosti materiálu PLA.



Obr. 24 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změny mezi pevnosti materiálu PLA.

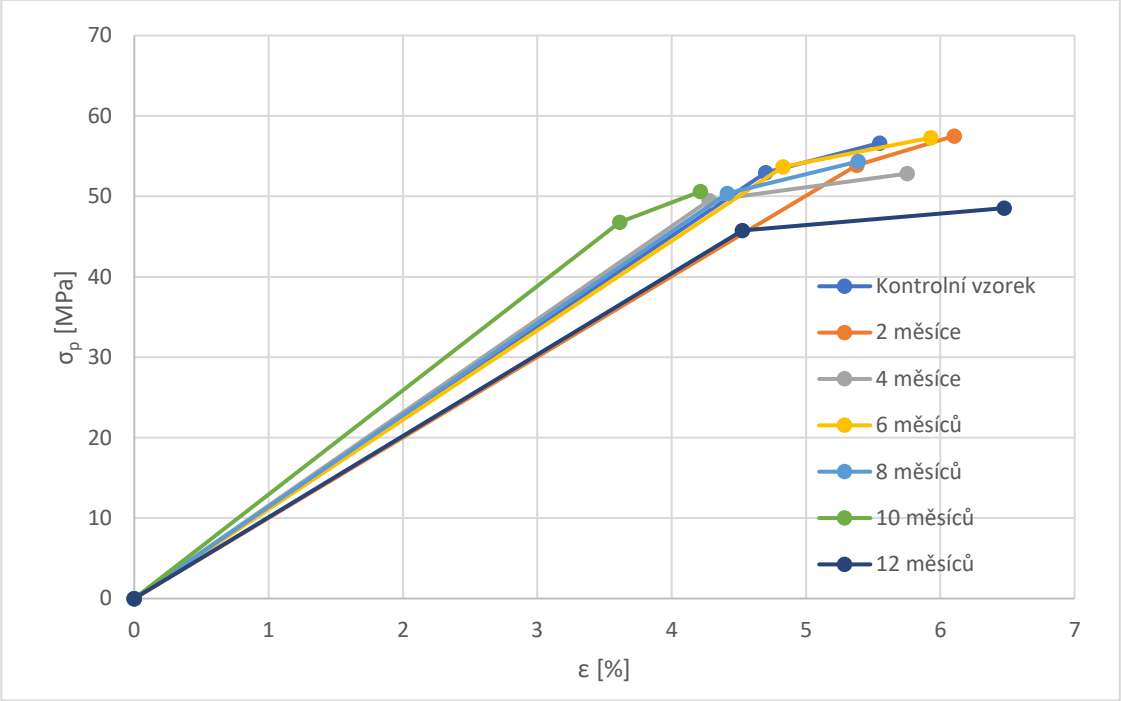


Obr. 25 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na prodloužení materiálu PLA.

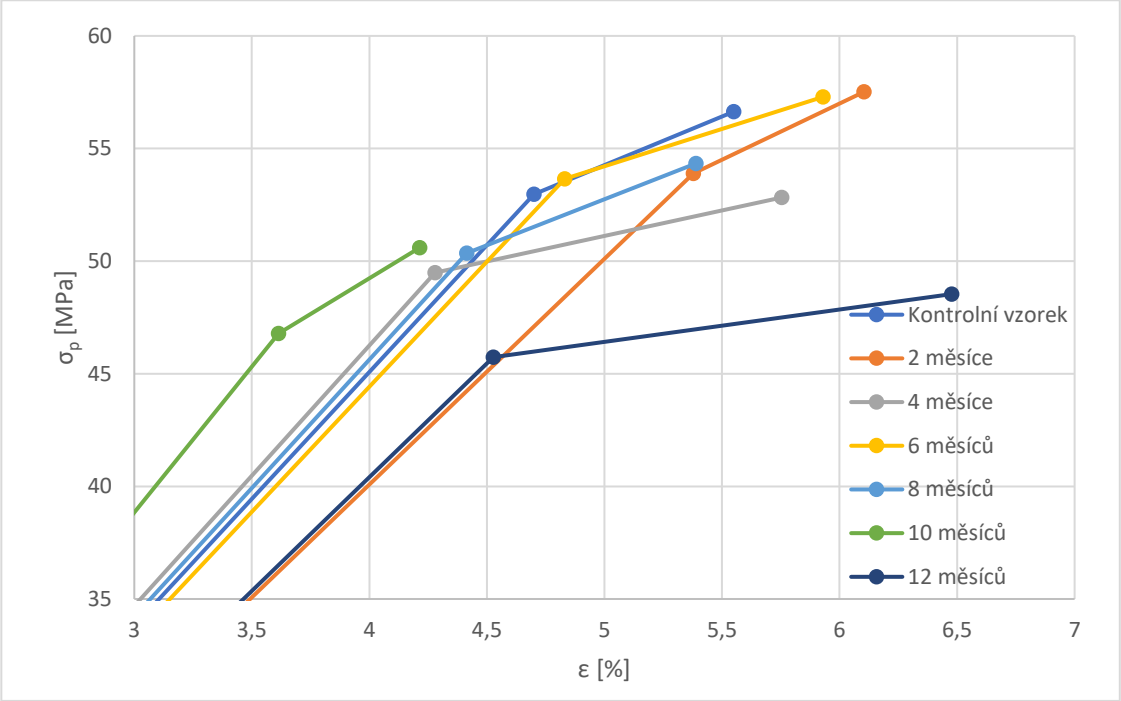


Obr. 26 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změnu prodloužení materiálu PLA.

Na Obr. 27 je zobrazena závislost napětí působící na vzorky v závislosti na prodloužení. Obr. 28 je zobrazena v detailu oblast plastické deformace. Je důležité zmínit, že se jedná pouze o orientační hodnoty, protože byl vždy vybrán vzorek s mediánem napětí mezi pevnosti. Nebylo možné hodnoty průměrovat, protože v některých statistických souborech docházelo k porušení soudržnosti materiálu v jiných krocích měření. Na obrázcích nelze pozorovat výraznou závislost.



Obr. 27 – Grafické zobrazení závislosti napětí na procentuálním prodloužení PLA.



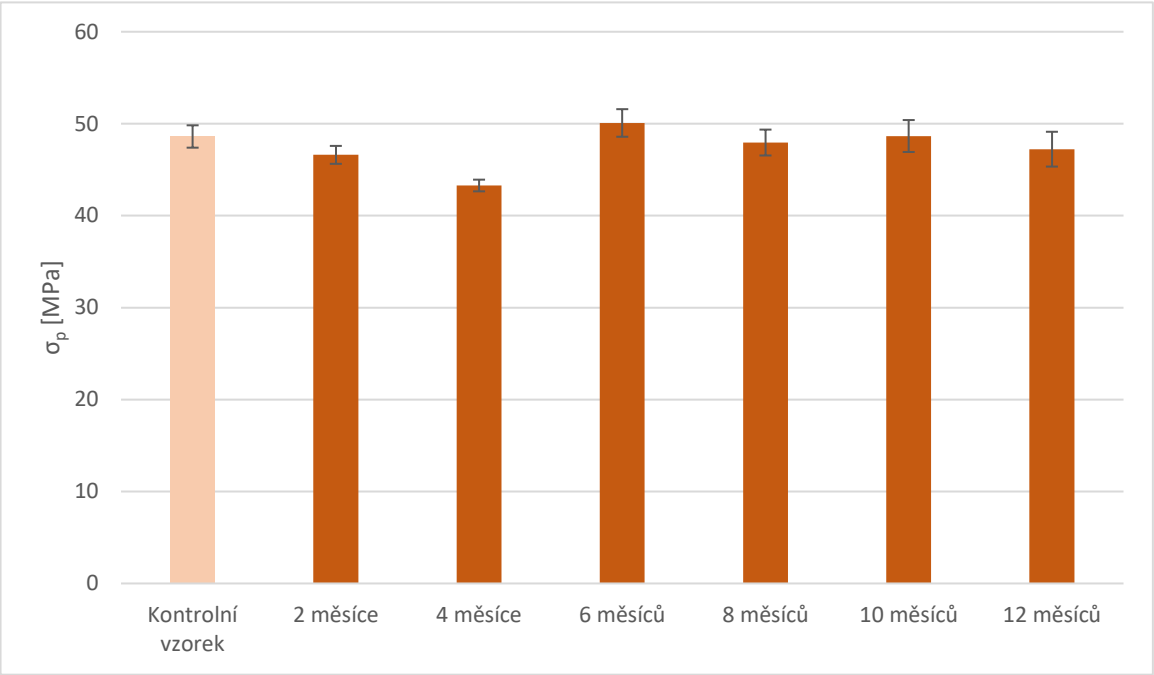
Obr. 28 – Grafické zobrazení detailu plastické oblasti deformace závislosti napětí na procentuálním prodloužení PLA.

Tab. 2 - Vliv biodegradability na tahové vlastnosti materiálu PETG

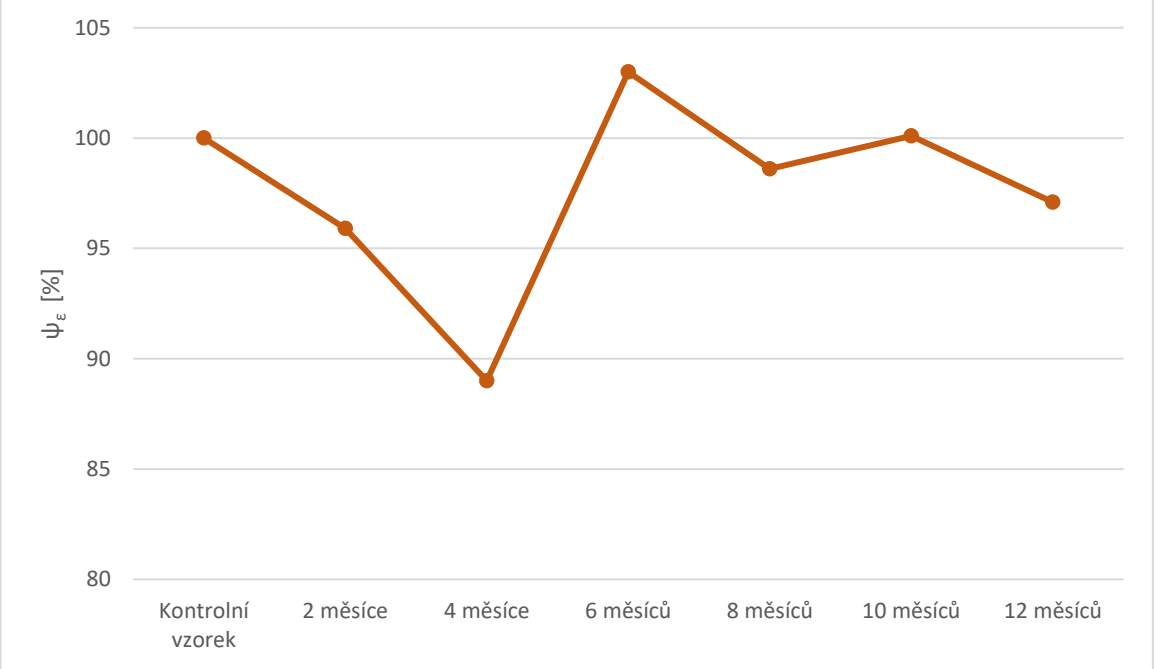
Měsíce		0	2	4	6	8	10	12
Průměrná mez kluzu	$[MPa]$	48,61	46,61	43,28	50,80	47,95	48,66	48,49
Směrodatná odchlka mezi kluzu	$[MPa]$	1,216	0,975	0,635	1,499	1,407	1,737	1,892
Procentuální změna oproti kontrolní skupině	[%]	100	95,9	89,0	103,0	98,6	100,1	97,1
Průměrné prodloužení	[%]	5,71	5,46	5,42	6,52	5,55	5,68	5,17
Směrodatná odchylka prodloužení	[%]	0,212	0,481	0,280	0,751	0,384	0,388	0,361
Procentuální změna oproti kontrolní skupině	[%]	100,0	95,7	95,0	114,2	97,2	99,5	90,7

Tab. 2 zobrazuje naměřené hodnoty tahové zkoušky materiálu PETG. Obr. 29 graficky zobrazuje vývoj hodnot mezi pevnosti v závislosti na čase. Obr. 30 vyjadřuje procentuální změnu materiálu po čase v porovnání s kontrolním vzorkem bez vlivu biodegradability. Do 4 měsíce je patrné klesání mezi pevnosti, která však rapidně naroste 6 měsíc. V intervalu od 6. do 12. měsíce je opět vidět pokles hodnoty mezi kluzu. Odhadnuté směrodatné odchylky mají hodnoty do 2 MPa a pohybují se na podobných hodnotách.

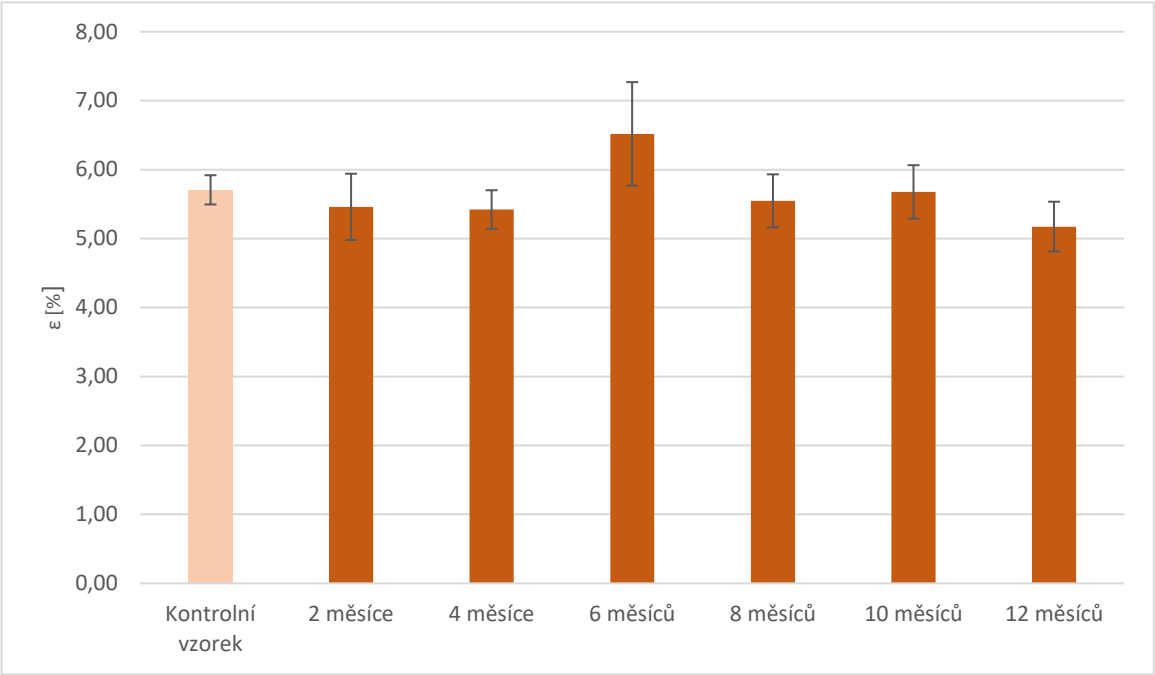
Vývoj prodloužení kopíruje trend vývoje mezi pevnosti co se týče nárůstů a poklesů. Na Obr. 31 je zobrazen vývoj hodnot prodloužení, na Obr. 32 je zobrazeno procentuální porovnání s kontrolním statistickým souborem. Do 4. měsíce je pozorován klesající trend, následovaný nárůstem při 6 měsících působení biodegradačního prostředí. Po 6. měsíci je pozorován další klesající trend. Odhadnuté směrodatné odchylky se hodnotami pohybují do 0,8 %.



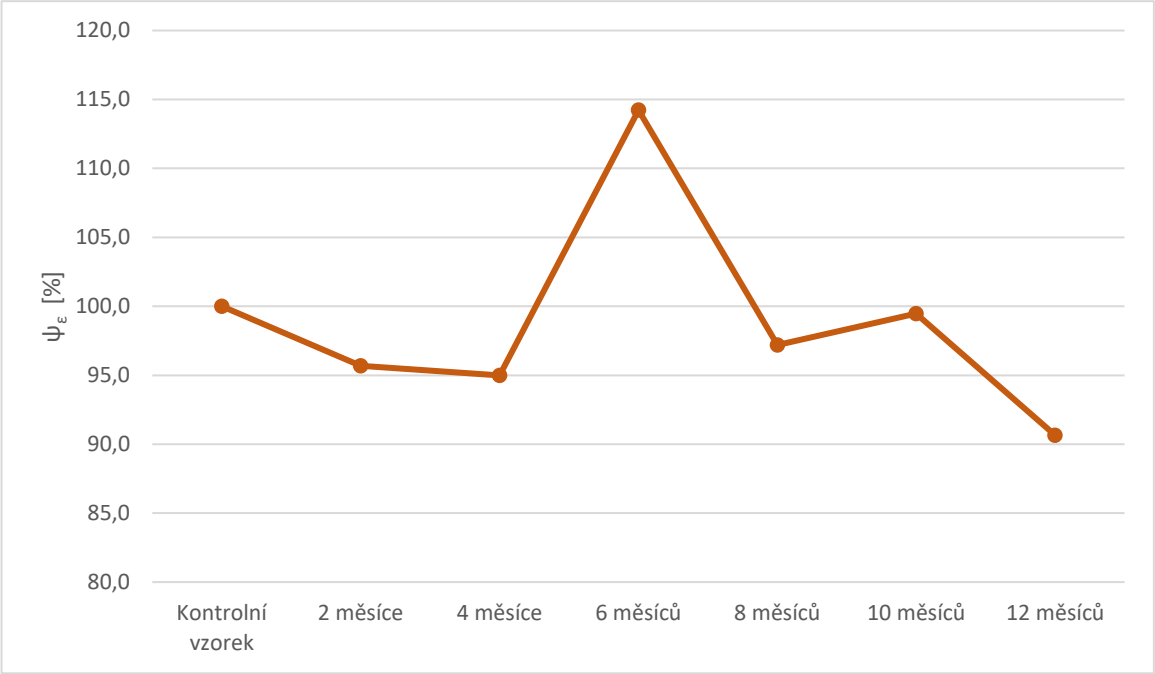
Obr. 29 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na mez pevnosti materiálu PETG.



Obr. 30 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změnu mezi pevnosti materiálu PETG.

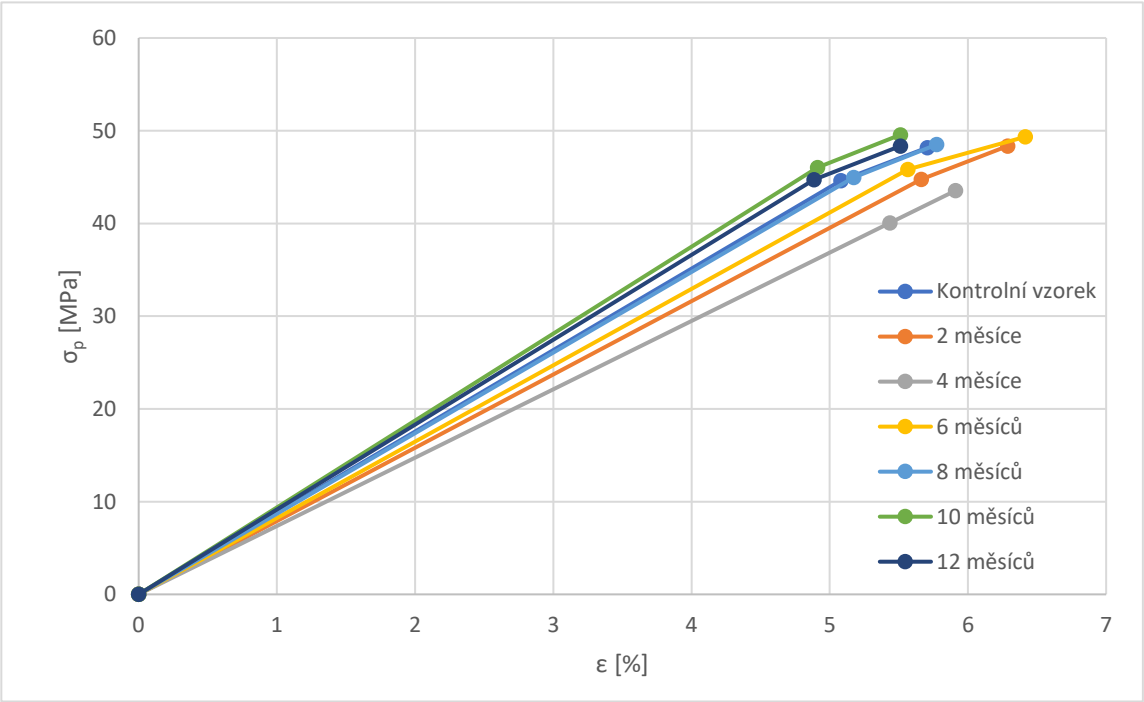


Obr. 31 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změny prodloužení materiálu PETG.

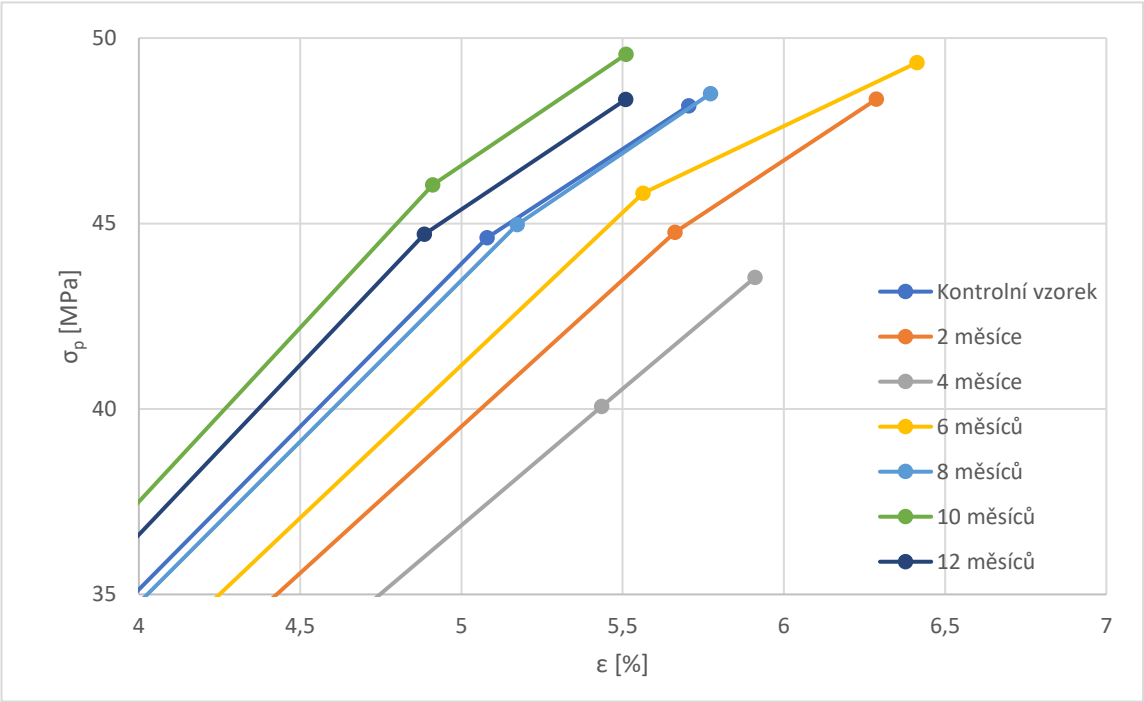


Obr. 32 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změnu prodloužení materiálu PETG.

Na Obr. 33 je zobrazena závislost napětí působící na vzorky v závislosti na prodloužení. Obr. 34 je zobrazena v detailu oblast plastické deformace. Jednotlivé průběhy zkoušek vzorků mají velmi podobný charakter s výjimkou je měření ve čtvrtém měsíci, kdy je plastická deformace téměř nepatrná. Znovu je třeba zdůraznit, že se jedná o orientační hodnoty, protože byly vybrány vzorky s mediánem hodnot napětí mezi pevnosti.



Obr. 33 – Grafické zobrazení závislosti napětí na procentuálním prodloužení PETG.



Obr. 34 – Grafické zobrazení detailu tvorby krčku závislosti napětí na procentuálním prodloužení PETG.

3.2 Rázová zkouška

Výsledky měření rázové zkoušky byly ve formě procent. Procenta vyjadřují zbylou energii kladiva po přeražení vzorku. 100 % znamená, že kladivo neztratilo žádnou energii, 0 % procent značí, že veškerá energie byla spotřebována. Zbylá energie byla zapsána a následně zpracována výpočtem. Zapsaná procenta jsou pomocí vzorce (4.10) přepočtena na energii potřebnou k přeražení vzorků. Následně je energie přepočtena pomocí vzorce (4.11) na poměrnou energii vztaženou na průřez vzorku. Tato rázová energie je poté statisticky zpracována a pomocí vzorce (4.12) je spočítán aritmetický průměr, podle vzorce (4.13) odhadnutá směrodatná odchylka a podle vzorce (4.14) procentuální změna oproti kontrolní skupině.

$$E_{Vi} = E_k \cdot \left(1 - \frac{\eta_i}{100\ \%}\right), \tag{4.10}$$

kde: E_{Vi} – energie potřebná na proražení daného vzorku $[J]$,
E_k – kinetická energie přerážecího kladiva $[J]$,
η – zbylá procentuální energie kladiva [%].

$$H_i = E_{Vi} \cdot a_h, \tag{4.11}$$

kde: H_i – energie vztažená na průřez daného vzorku $\left[\frac{J}{cm}\right]$,
E_{Vi} – energie potřebná na proražení daného vzorku $[J]$,
a_h – průřez vzorku $[cm]$.

$$\overline{H_J} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} H_i, \tag{4.12}$$

kde: $\overline{H_J}$ – průměrná rázová energie pro daný statistický soubor $\left[\frac{J}{cm}\right]$,
H_i – rázová energie pro i-tý vzorek statistického souboru $\left[\frac{J}{cm}\right]$,
n – počet vzorků ve statistickém souboru $[-]$.

$$s_{Hj} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(H_i - \overline{H_J}\right)^2}, \tag{4.13}$$

kde: s_{Hj} –směrodatná odchylka rázové energie odhadnutá aritmetickým průměrem $\left[\frac{J}{cm}\right]$,
$\overline{H_J}$ – průměrná rázová energie pro daný statistický soubor $\left[\frac{J}{cm}\right]$,
H_i – rázová energie pro i-tý vzorek statistického souboru $\left[\frac{J}{cm}\right]$,
n – počet vzorků ve statistickém souboru $[-]$.

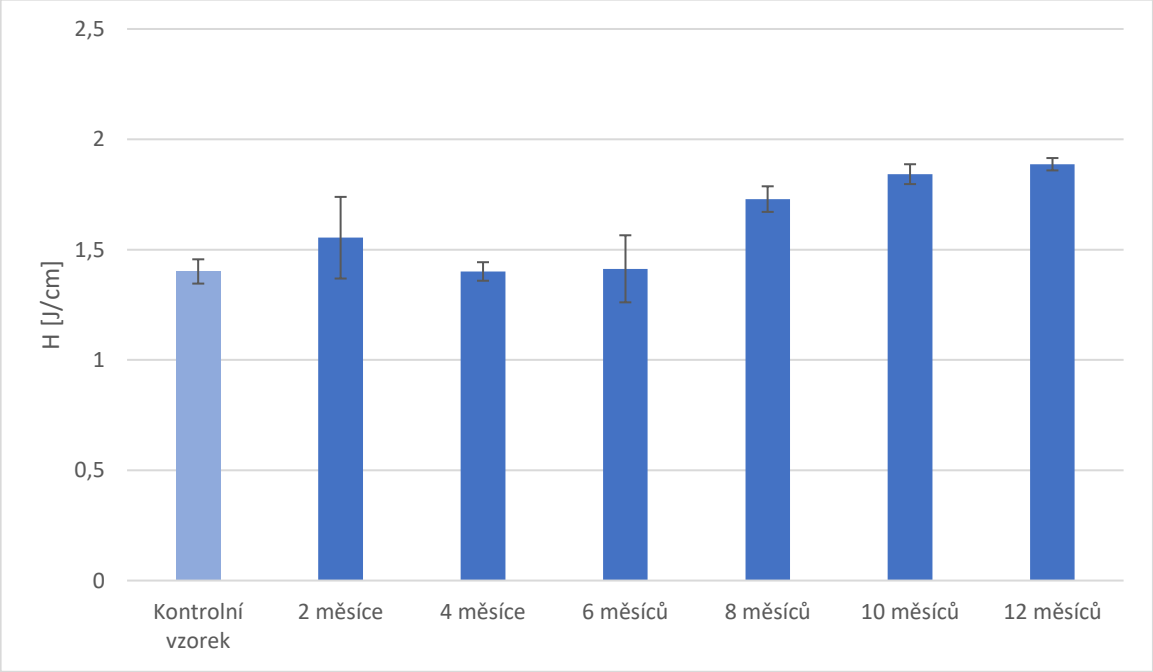
$$\psi_{HJ} = \frac{\overline{H_0}}{\overline{H_J}} \cdot 100\ \%, \tag{4.14}$$

kde: ψ_{HJ} – procentuální změna houževnatosti vlivem biodegradace daného statistického souboru oproti kontrolní skupině [%],
$\overline{H_0}$ – průměrná houževnatost kontrolní skupiny $\left[\frac{J}{cm}\right]$,
$\overline{H_J}$– průměrná houževnatost daného statistického souboru $\left[\frac{J}{cm}\right]$.

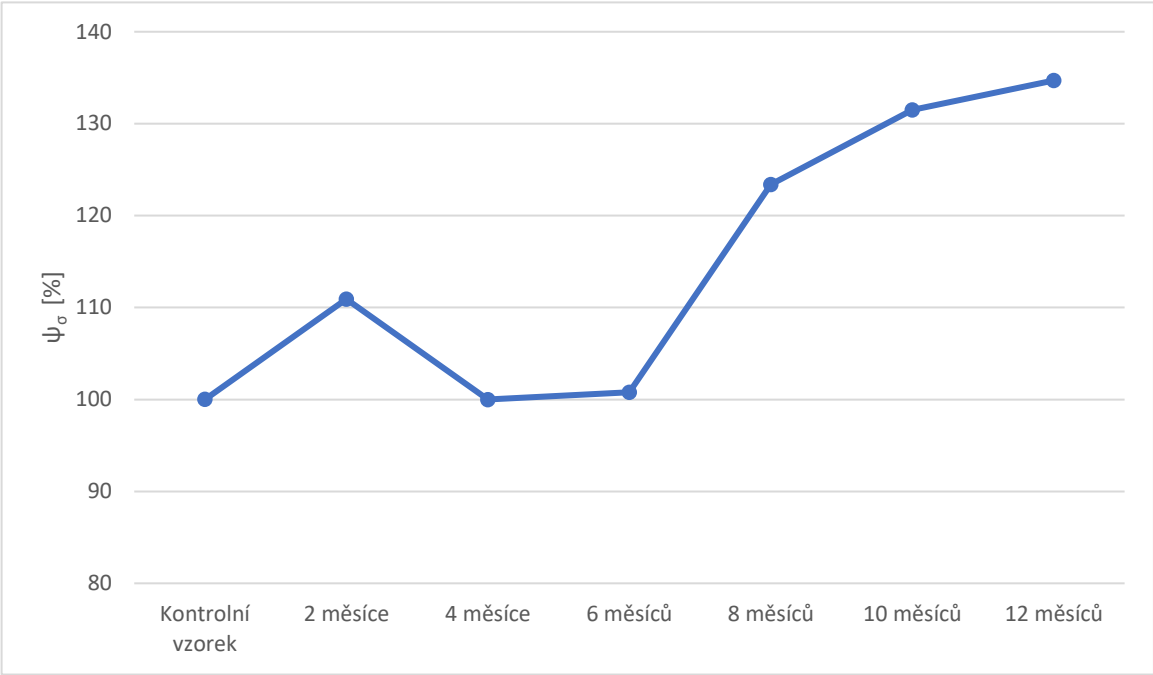
Tab. 3 - Vliv biodegradability na houževnatost materiálu PLA

Měsíce		0	2	4	6	8	10	12
Rázová energie	$\left[\frac{J}{cm}\right]$	1,401	1,554	1,401	1,413	1,729	1,842	1,887
Směrodatná odchylka rázové energie	$\left[\frac{J}{cm}\right]$	0,055	0,185	0,042	0,152	0,058	0,045	0,028
Procentuální změna oproti kontrolní skupině	[%]	100	110,9	100	100,8	123,4	131,5	134,7

Tab. 3 zobrazuje data získaná měřením houževnatosti materiálu PLA. Graficky jsou tyto výsledky zobrazeny na Obr. 35 a Obr. 36. Je možné pozorovat trend stoupající houževnatosti materiálu v závislosti na době působení biodegradace s výjimkou druhého měsíce. Odhadnuté směrodatné odchylky měření se pohybují do 0,1 J/cm s výjimkou 2. a 6. měsíce. Byla by zpochybněna validita měření v těchto měsících, stále je patrný rostoucí trend houževnatosti s dlouhodobě působícím vlivem bioaktivního prostředí. Je tedy možné vytvořit závěr, že u materiálu umístěného do bioaktivního prostředí dochází k nárůstu houževnatosti.



Obr. 35 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na houževnatost materiálu PLA.



Obr. 36 – Grafické zobrazení vlivu biodegradaci na procentuální změnu houževnatosti materiálu PLA.

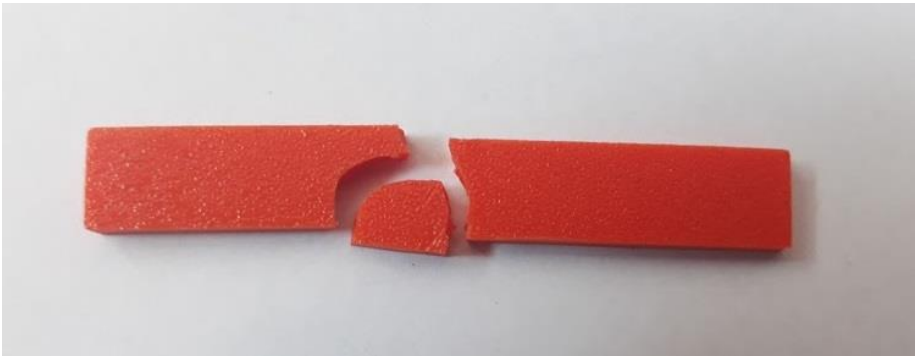
Tab. 4 - Vliv biodegradability na tahové vlastnosti materiálu PETG

Měsíce		0	2	4	6	8	10	12
Rázová energie	$\left[\frac{J}{cm}\right]$	3,771	4,208	4,377	4,637	3,771	3,987	3,496
Směrodatná odchlka rázové energie	$\left[\frac{J}{cm}\right]$	1,984	1,876	1,576	2,278	1,124	1,159	1,187
Procentuální změna oproti kontrolní skupině	[%]	100	111,6	116,1	123,0	100,0	105,7	92,7

Výsledky měření houževnatosti materiálu PETG byly vloženy do Tab. 4. Graficky byly výsledky zpracovány do Obr. 39 a Obr. 40. Před samotným zhodnocením je však třeba zhodnotit velikosti směrodatných odchylek.

Při zkoušce houževnatosti materiálů PETG jsou patrné obrovské směrodatné odchylky. Tato skutečnost je způsobena tím, že vzorky nebyly přeráženy konzistentně. U některých došlo k čistému přeražení s rovnou kolmou plochou porušení, u některých došlo k rozpadu na více kusů, u některých byla přeražená část křivá, klikatá nebo pod úhlem. Nejméně energie na přeražení vyžadovaly vzorky, které byly přeraženy v kolmé rovině. Vzorky bez této kolmé roviny střihu vyžadovaly velké množství energie na přeražení. Vzorek přeražený na 3 kusy je patrný na Obr. 37, vzorek s kolmou plochou přerušení a vzorek s nerovnou částí porušení jsou patrné na Obr. 38. Během testování nebyl vypozorován žádný indikátor, který by naznačoval, jakým mechanismem bude vzorek přeražen. Výsledky zkoušky houževnatosti se pohybovali v intervalu od 1,083 J/cm do 7,223 J/cm a obě tyto extrémní hodnoty pocházejí z měření po 6.

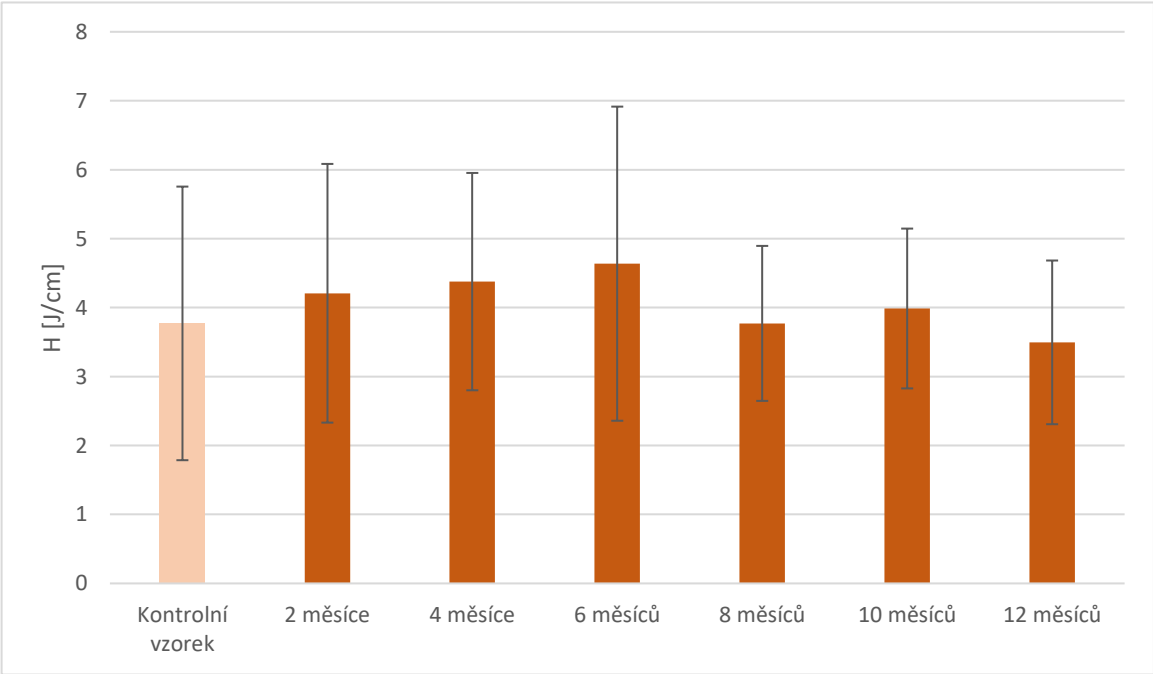
měsících. K závěrům, které jsou vyhodnoceny z naměřených výsledku je proto potřeba přistupovat velmi skepticky.



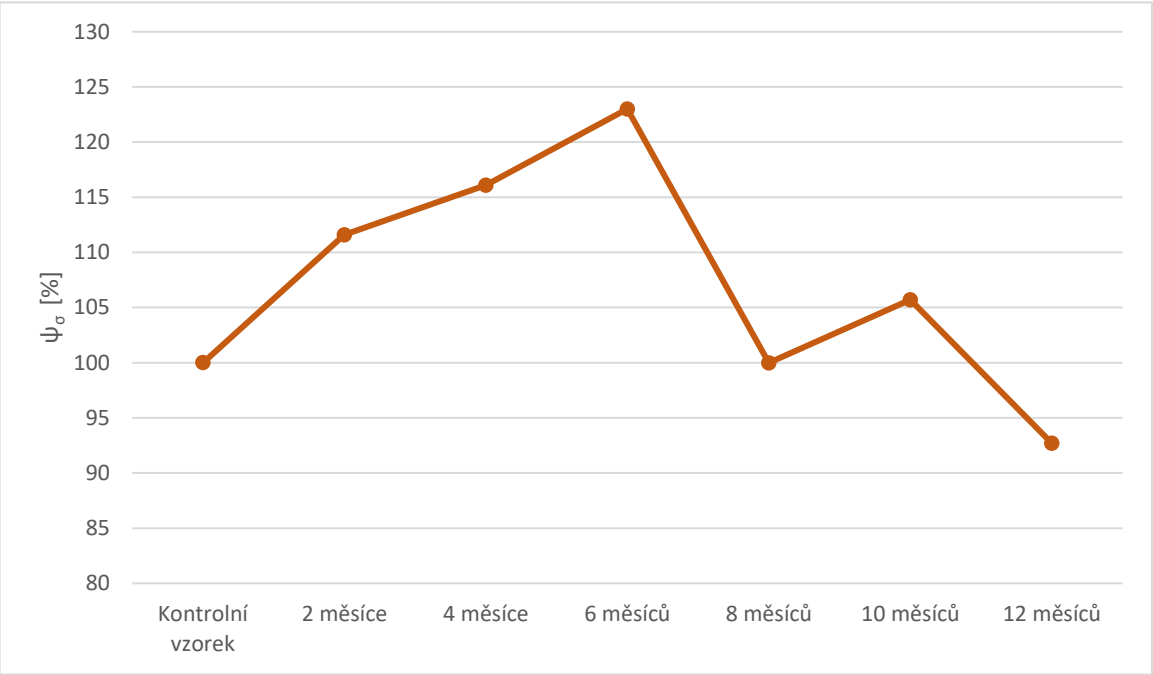
Obr. 37 – Vzorek přeražený na 3 kusy.

Obr. 38 – Vzorek přeražený kolmo (nahoře) a vzorek přeražený s nerovnou oblastí porušení (dole).

Výsledky zkoušky houževnatosti materiálu PETG ukazují, že během prvních 6 měsíců došlo k nárůstu houževnatosti. Od 6 měsíce do 12 je pak možné pozorovat pokles houževnatosti až pod hodnoty kontrolního vzorku. Jak již však bylo psáno, je nutné brát tyto výsledky skepticky kvůli velikým hodnotám odhadnutých směrodatných odchylek.



Obr. 39 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na houževnatost materiálu PETG.



Obr. 40 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změnu houževnatosti materiálu PETG.

4 VYHODNOCENÍ TESTŮ

- Předpokládané zjištění

V teoretické části je napsáno, že materiál PLA je biologicky odbouratelný. Tento proces však vyžaduje správné podmínky, a i tak je velmi zdlouhavý. Předpokládané zjištění je, že vlastnosti materiálu nebudou výrazně ovlivněny působením biodegradačního prostředí. Materiál PETG naopak biologicky odbouratelný není. Je tedy vhodné předpokládat, že mechanické vlastnosti v bioaktivním prostředí nebudou změněny.

Je však důležité zmínit, že není možné izolovat pouze vliv bioaktivního prostředí bez ostatních vlivů, které mají na materiál vliv. Jedná se zejména o vlhkost a teplotu. Při dlouhodobém překročení teploty skelného přechodu může docházet ke změně uspořádání amorfní struktury polymeru a materiál se stává semikrystalický, což změní jeho mechanické vlastnosti. Navázání vody na materiál také mění jeho mechanické vlastnosti. Vliv absorbování vody nylonem byl popsán v teoretické části.

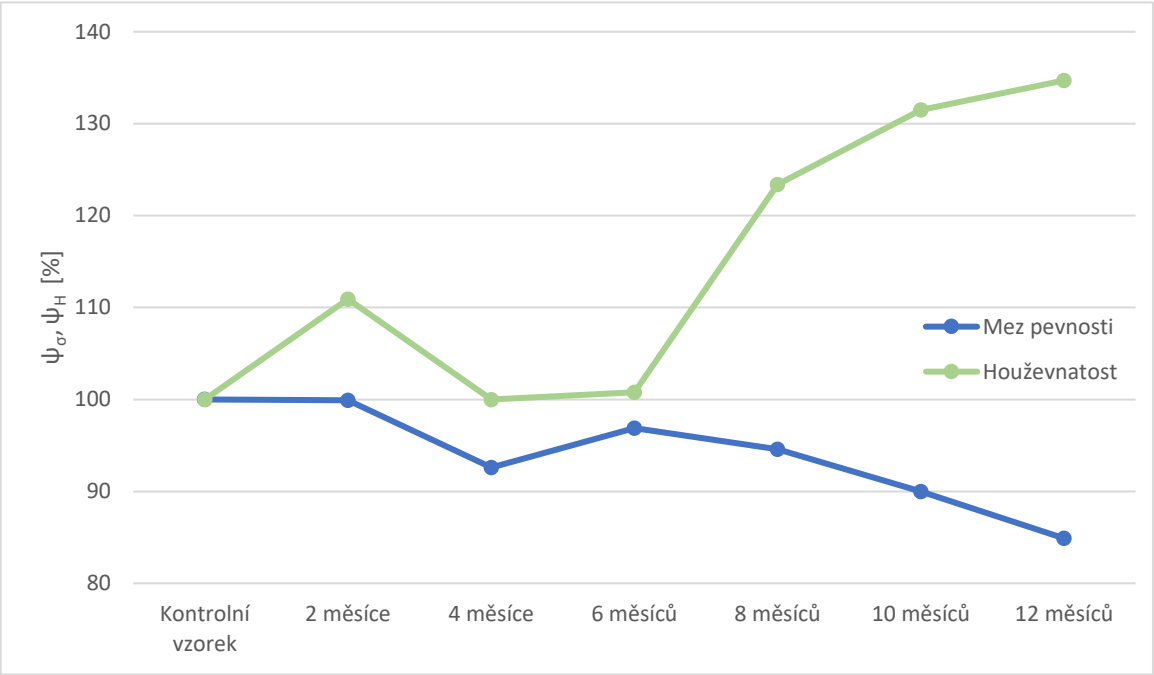
Bez dalších testů není možné určit, jestli se jedná o vliv přímo biodegradace nebo faktorů, které biodegradaci doprovázejí. Pro přesné určení by bylo nutné provést testy, které eliminují vliv biodegradačního prostředí a simulují pouze vliv vody a teploty. Tato metoda je vhodnější než eliminace doprovodných vlivů při působení biodegradace. Ačkoliv by bylo možné držet stejnou teplotu po celou dobu vystavení vzorků přírodnímu prostředí, není možné eliminovat vliv vody. Voda je nezbytná pro život organismů, které napomáhají biologickému odbourávání.

Nicméně účelem této práce je zjistit, jak se materiály chovají, jsou-li vystaveny bioaktivnímu prostředí. Proto není důležité zjistit, jestli se jedná přímo o proces rozkladu přírodními vlivy nebo o změnu mechanických vlastností vlivem doprovodných jevů. Pro zhodnocení, jak se mění mechanické vlastnosti při vystavení biodegradačnímu prostředí, jsou výsledky dostatečné.

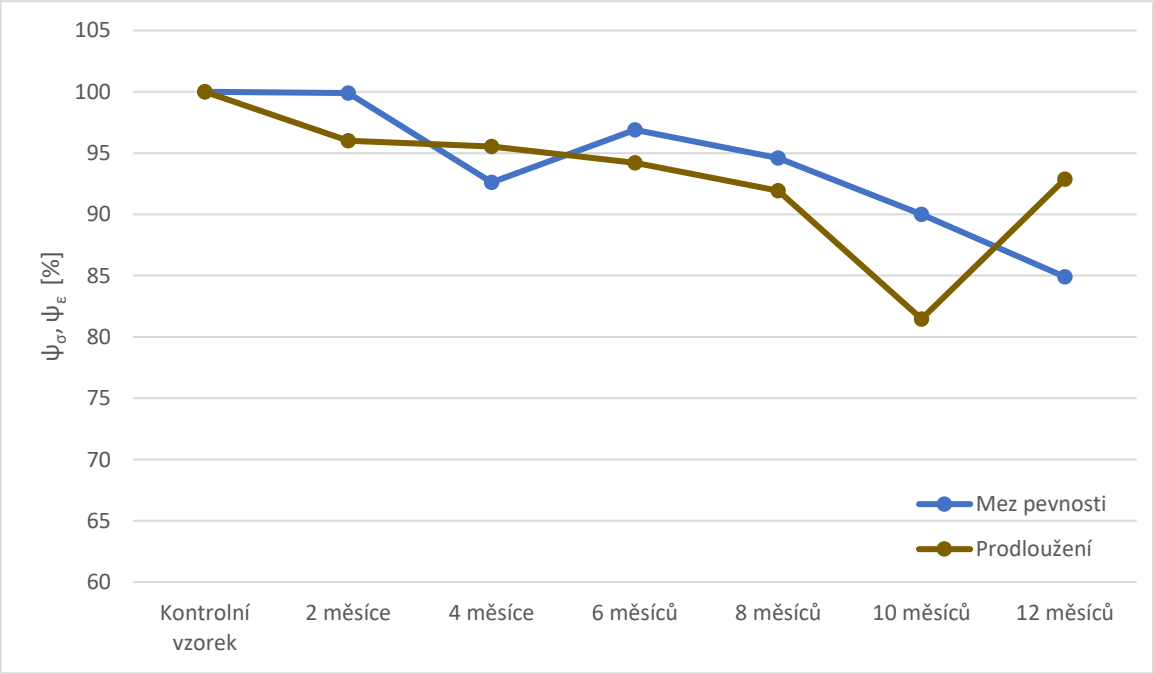
4.1 Vyhodnocení materiálu PLA

Na materiál PLA mělo biodegradační prostředí vliv. Obr. 41 zobrazuje procentuální vývoj houževnatosti a mezi pevnosti oproti kontrolnímu vzorku. Do 6. měsíce docházelo k mírné změně mechanických vlastností, došlo k nárůstu houževnatosti a poklesu mezi kluzu. Od 6. měsíce došlo k výraznému nárůstu houževnatosti doprovázeným poklesem hodnoty mezi pevnosti. Procentuální pokles mezi pevnosti oproti kontrolnímu vzorku byl více než o polovinu menší než procentuální nárůst houževnatosti. Jedná se o 15,1% pokles mezi pevnosti a o 34,7% nárůst houževnatosti oproti kontrolnímu vzorku. Houževnatost tedy narůstá rychleji než klesá mez pevnosti materiálu.

Prodloužení, které bylo měřeno při tahové zkoušce vykazuje podobný trend jako mezi pevnosti, což je možné pozorovat na Obr. 42. Jedinou výjimku tvoří měření ve dvanáctém měsíci. Dochází k nepředpokládanému nárůstu prodloužení, což se vymyká trendu, který je patrný u prodloužení i mezi pevnosti. V Tab. 1 je však možné pozorovat největší směrodatnou odchylku při měření tohoto materiálu. Ačkoliv je možné zpochybňovat validitu tohoto měření, mez pevnosti statistického souboru z dvanáctého měsíce odpovídá trendu. Pro aplikaci v bioaktivním prostředí není prodloužení při dosažení mezi pevnosti klíčová vlastnost. Při takovémto použití je důležité, jaké mechanické namáhání výtisk zvládne vydržet bez porušení.



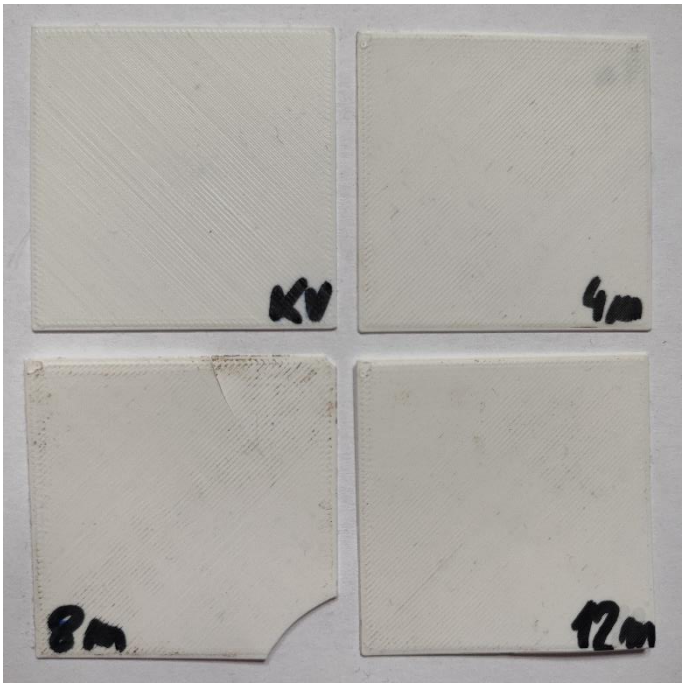
Obr. 41 – Porovnání vlivu biodegradace na procentuální změny mezi pevnosti a houževnatosti materiálu PLA.



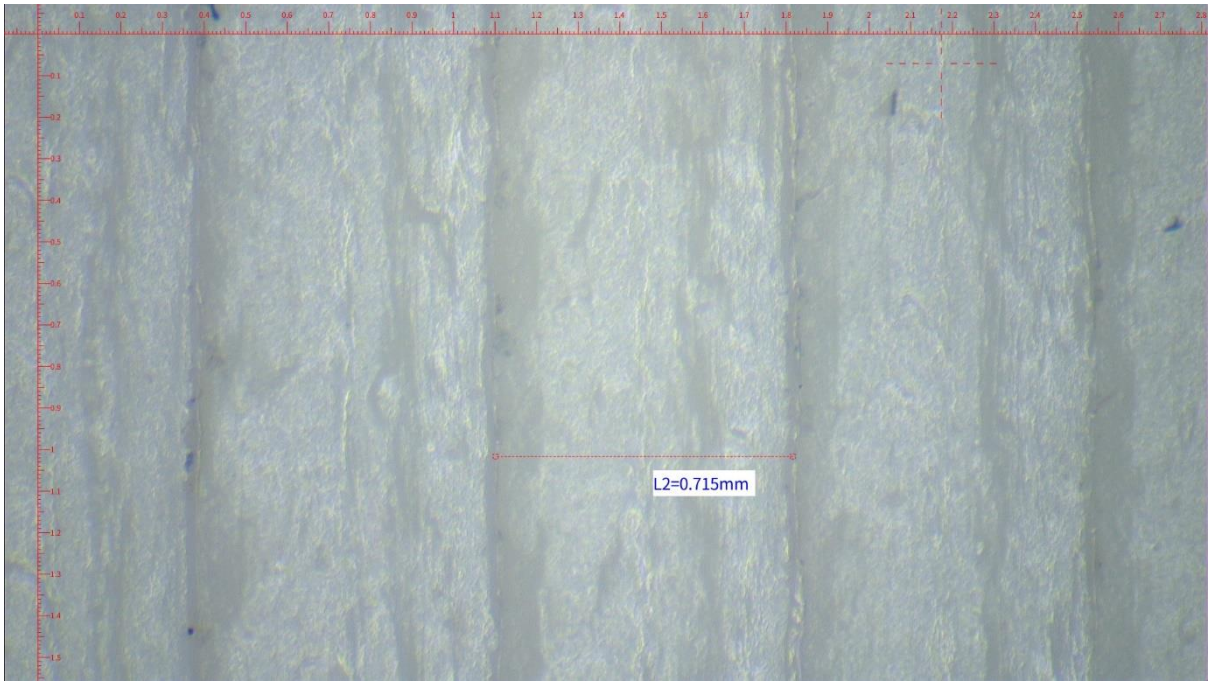
Obr. 42 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změny mezi pevnosti materiálu PLA.

Na Obr. 43 jsou zobrazeny vzorky materiálu PLA, které byly zkoumány pod mikroskopem. Ze dvou vytištěných byl vybrán ten, na kterém byly nejméně patrné známky deformace nebo porušení. U vzorků po osmi měsících v bioaktivním prostředí došlo k deformaci a porušení soudržnosti u obou vzorků. Na Obr. 44, Obr. 45, Obr. 46 a Obr. 47 jsou samotné vzorky pod mikroskopem. U kontrolního vzorku je možné pozorovat optickou nesourodost povrchu. Patrné je, že vždy dvě linie extruze splývají do sebe. Fakt, že se jedná opravdu o dvě linie extruze je možné pozorovat na Obr. 44 díky měřící úsečce. Vzorky byly tištěny tryskou s průměrem 0,4 mm, linie extruze je tedy široká přibližně 0,4 mm. U vzorků s působením biodegradačního prostředí dochází se jednotlivé dvojice linií extruze stávají

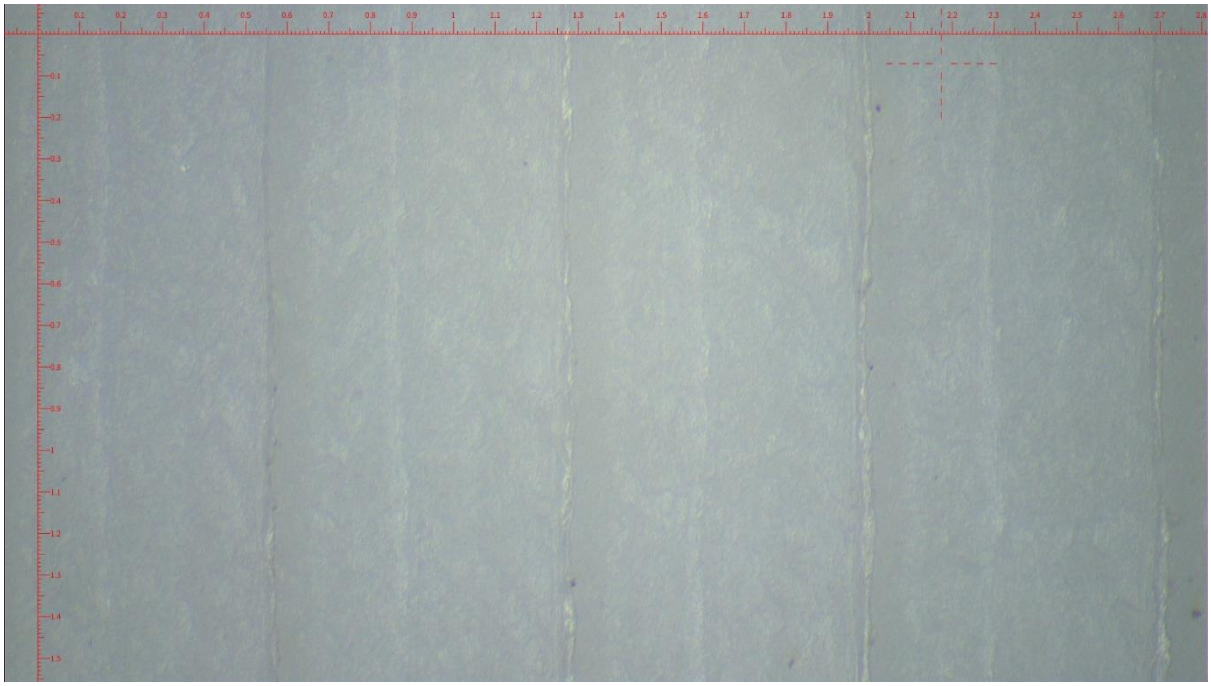
rozlišitelnými. Přestože jsou dvojice linií extruze rozlišitelnější, jednotlivé dělící linie se stávají hůře rozlišitelné a celý povrch se opticky homogenizuje.



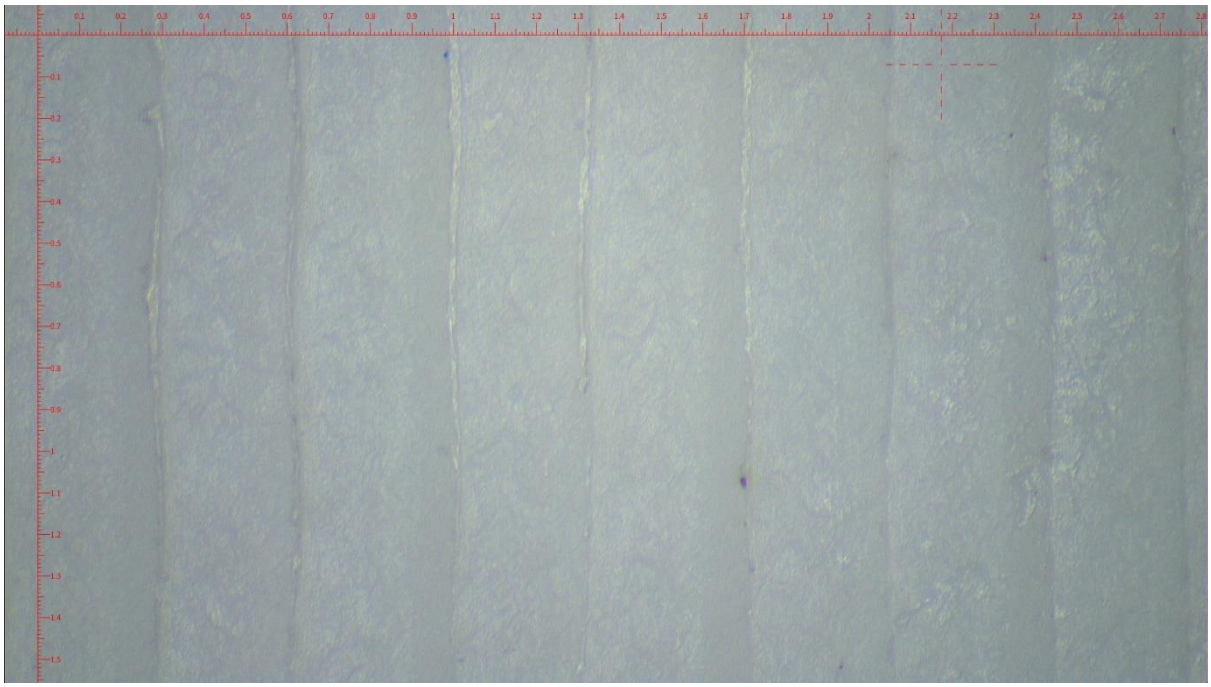
Obr. 43 – Mikroskopové vzorky (kontrolní vzorek, po čtyřech, osmi a dvanácti měsících v bioaktivním prostředí).



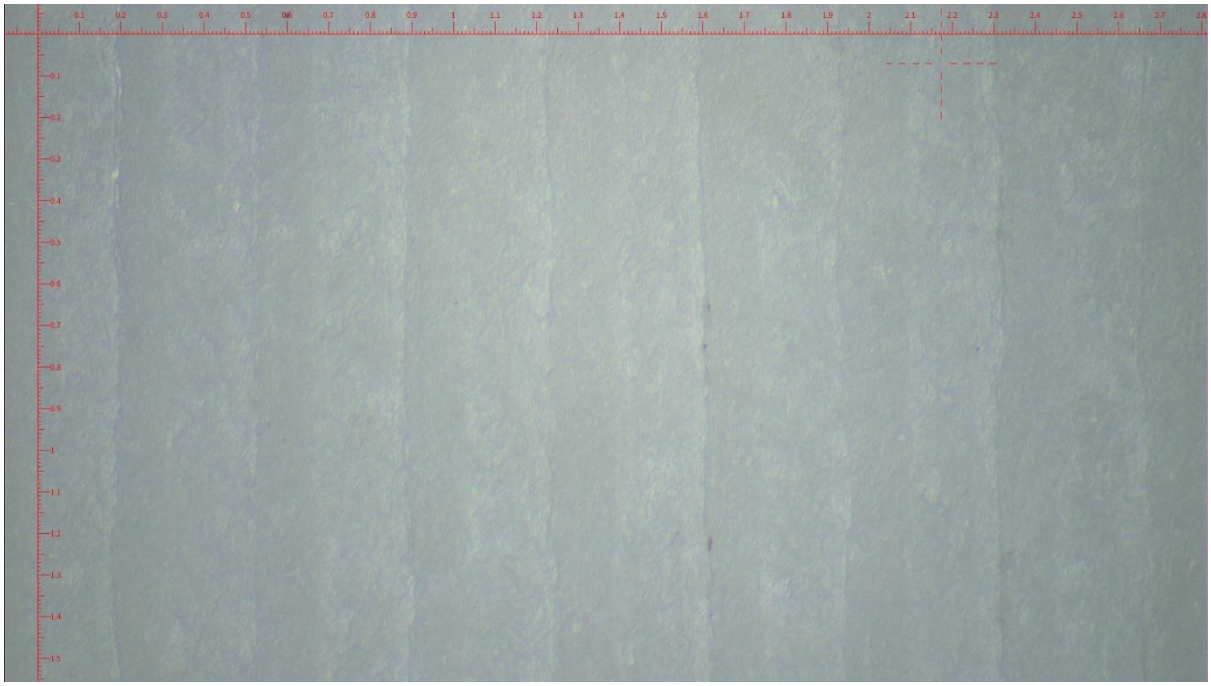
Obr. 44 – Snímek z mikroskopu – kontrolní vzorek materiálu PLA s měřící úsečkou.



Obr. 45 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PLA po čtyřech měsících v bioaktivním prostředí.

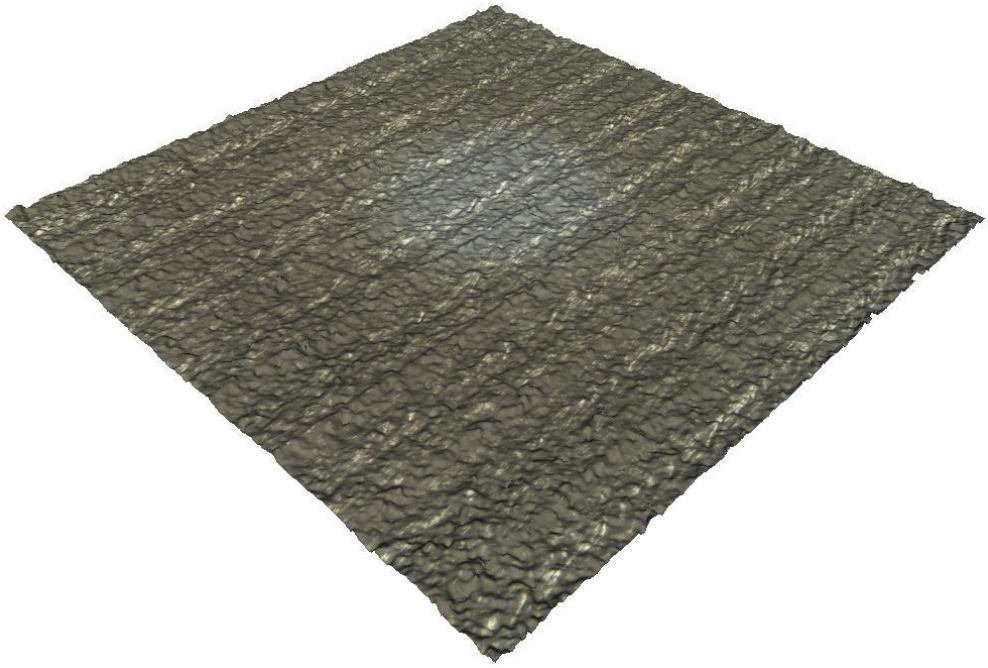


Obr. 46 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PLA po osmi měsících v bioaktivním prostředí.

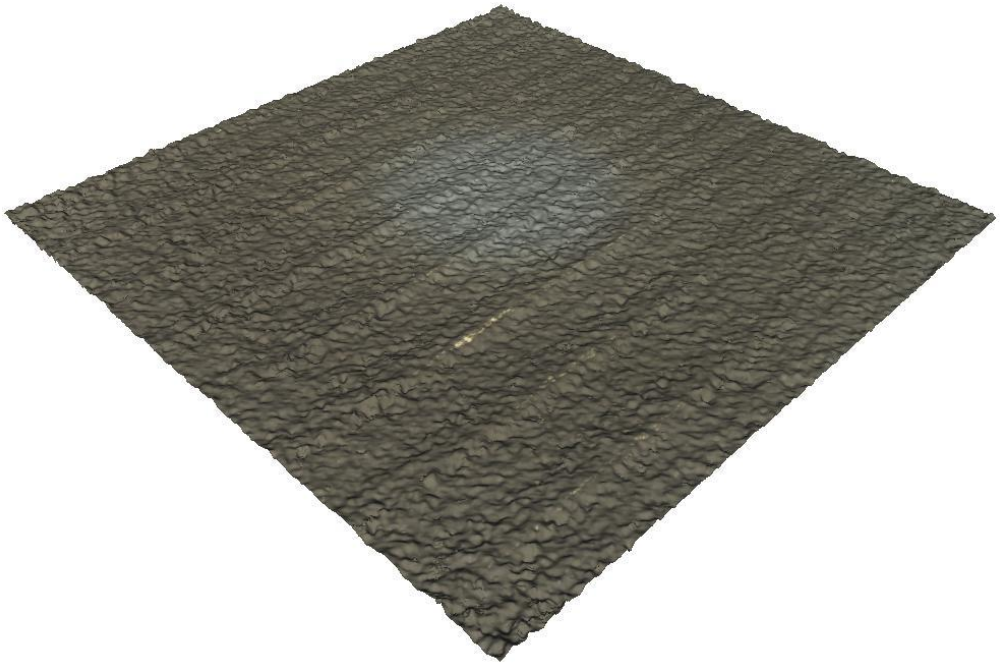


Obr. 47 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PLA po dvanácti měsících v bioaktivním prostředí.

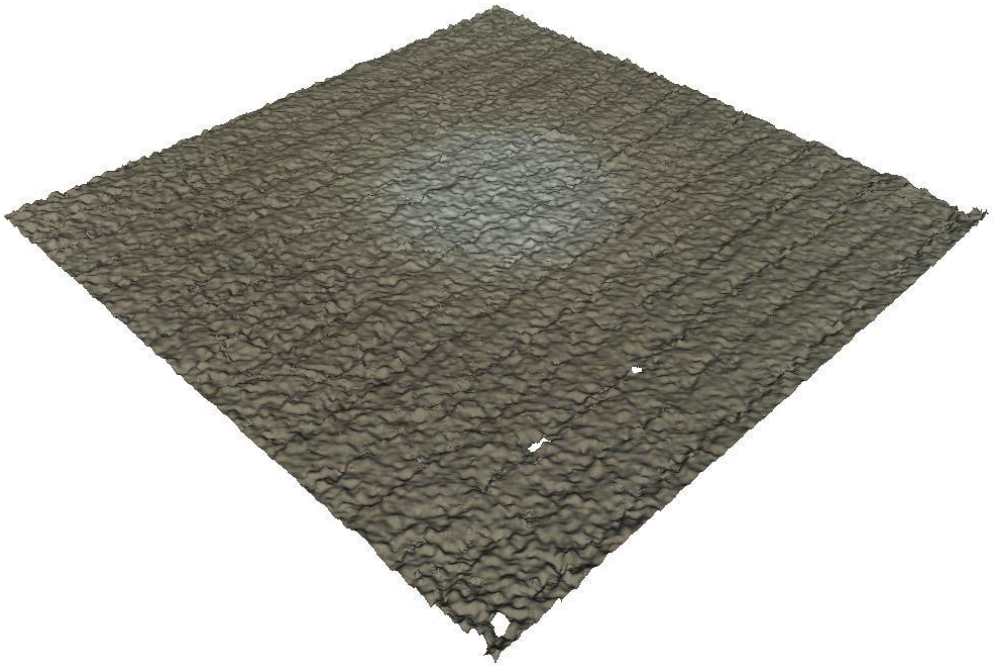
U samých vzorků jako na Obr. 43 byly pořízeny snímky na zařízení Alicona InfiniteFocus G5, které mapuje strukturu povrchu vzorku. Na snímcích ze zařízení Alicona je možné pozorovat samé skutečnosti jako na snímcích z optického mikroskopu. Na Obr. 48 splývají dvě po sobě následující extruze do sebe, avšak na Obr. 49 jsou stále špatně rozeznatelné. Na Obr. 50 je však možné je již rozeznat. Na posledním vzorku zobrazeném na Obr. 51 jsou také patrné, dochází ovšem k postupné homogenizaci a vyrovnání povrchu. Je možné tak říct, že v biodegradačním prostředí dochází k vyrovnání výstupků výškového profilu materiálu. Není však možné přesně určit, co by se s materiálem dělo, kdyby vzorek vykazoval známky podextruze, laicky řečeno, kdyby vzorek neměl výstupky, ale prolákliny. Je třeba pro přesné určení důsledků provést měření, které určí chování takového vzorku.



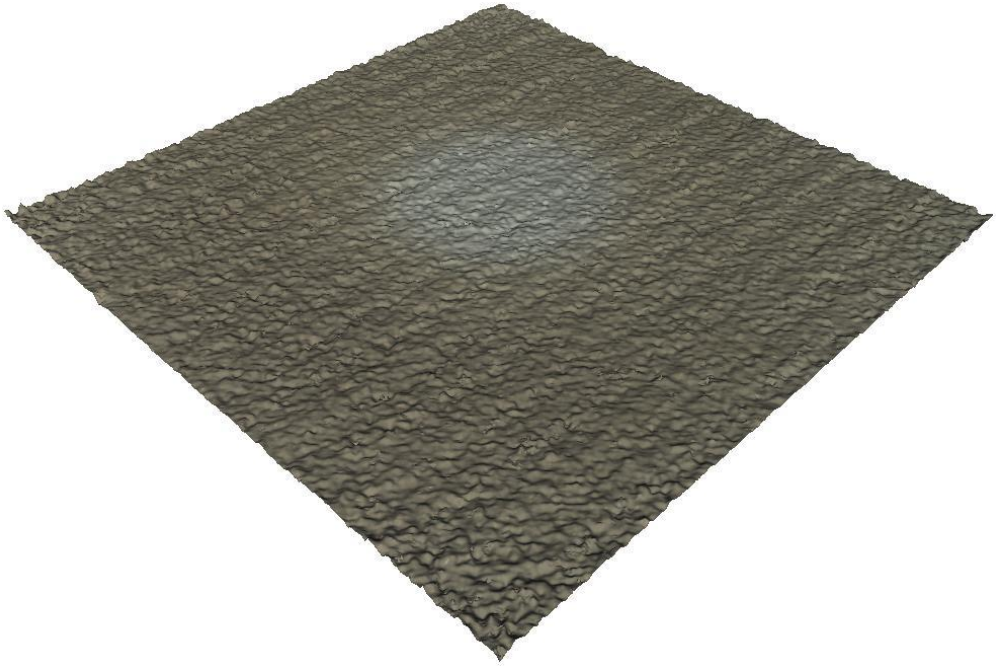
Obr. 48 – Snímek ze zařízení Alicona – kontrolní vzorek materiálu PLA.



Obr. 49 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PLA po čtyřech měsících v bioaktivním prostředí.



Obr. 50 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PLA po osmi měsících v bioaktivním prostředí.



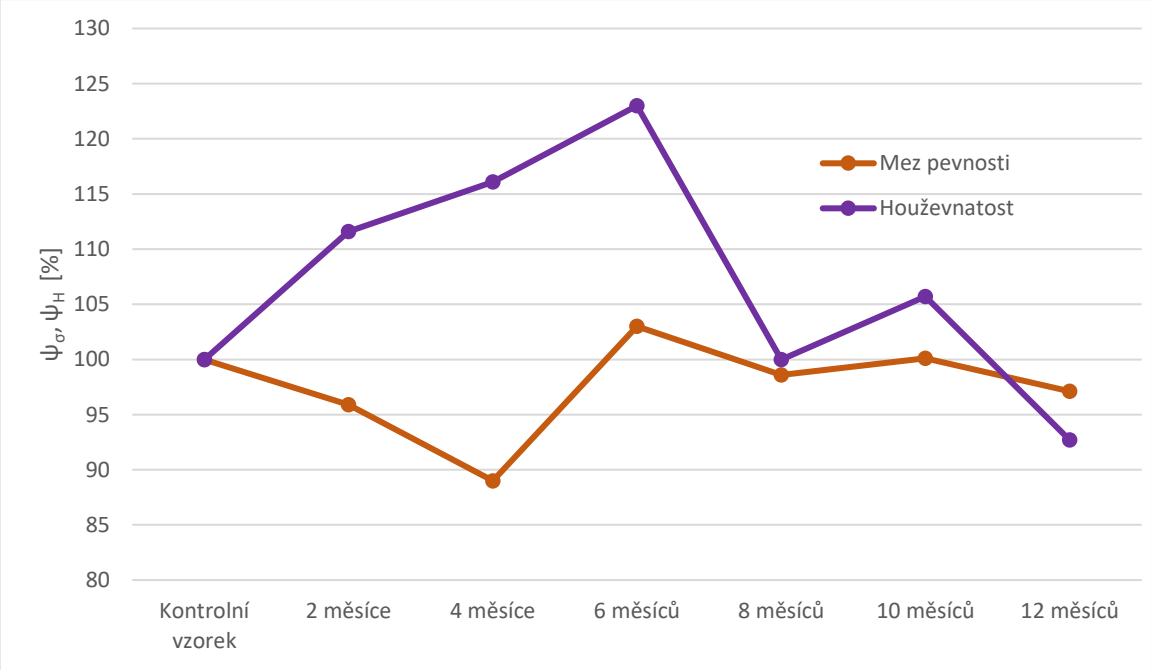
Obr. 51 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PLA po dvanácti měsících v bioaktivním prostředí.

4.2 Vyhodnocení materiálu PETG

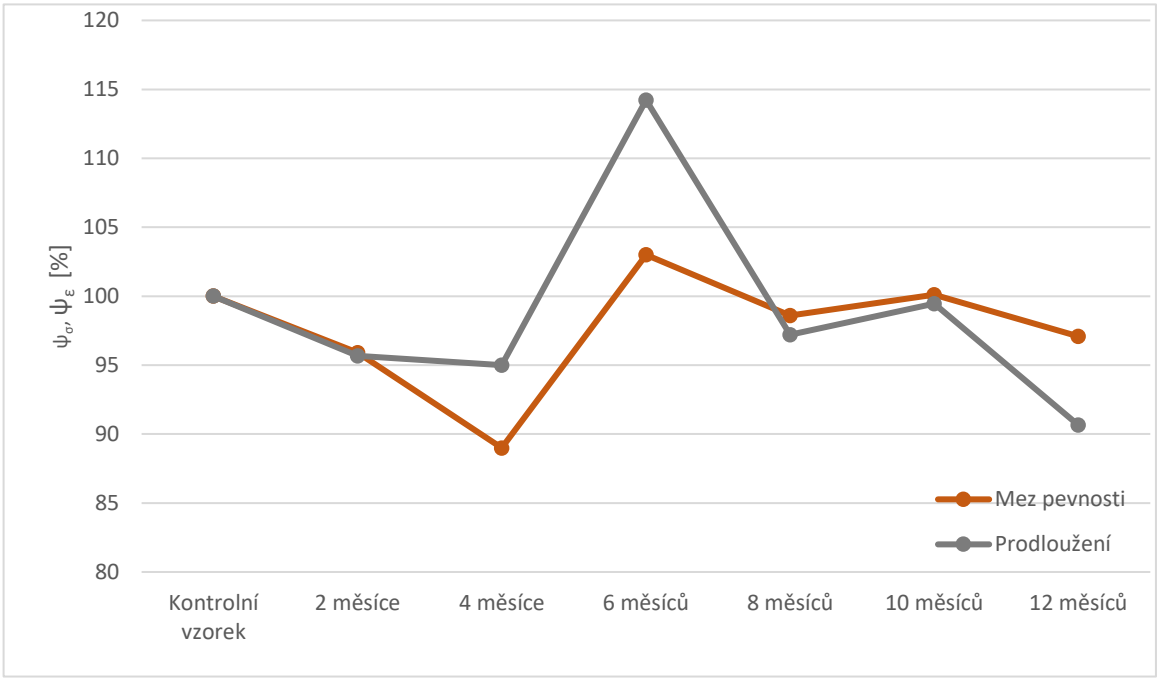
I na materiál PETG má bioaktivní prostředí vliv. Na Obr. 40 je srovnán vliv bioaktivního prostředí na mez kluzu a na houževnatost oproti kontrolním vzorku. Mez pevnosti během prvních čtyř měsíců vykazovala pokles, šestý měsíc je patrný nárůst, který je však následován dalším poklesem. U houževnatosti došlo během prvních šesti měsíců k nárůstu, poté následoval propad až pod hranici původní houževnatosti vzorků, na které bioaktivní prostředí nepůsobilo.

Na rozdíl od materiálu PLA, kde je možné pozorovat určité přímé provázání mezi kluzu a houževnatosti s postupem času, u materiálu PETG je provázání nepřímé. Obě mechanické vlastnosti je možné pomyslně rozdělit na dvě části. U mezi pevnosti jsou patrné dva klesající trendy rozdělené předělem nárůstu hodnot mezi čtvrtým a šestým měsícem. Houževnatost je naopak rozdělena na stoupající trend a klesající s bodem zlomu v šestém měsíci. U první části tedy dochází k opačnému chování těchto mechanických vlastností, dochází k nárůstu houževnatosti a poklesu mezi pevnosti. U druhého trendu dochází k poklesu obou mechanických vlastností.

Na Obr. 53 je zobrazeno porovnání mezi pevnosti a prodloužení materiálu PETG. Obě vlastnosti se řídí stejným trendem. Nejprve dochází k poklesu během prvních čtyř měsíců následované nárůstem v šestém měsíci a poté je opět patrný pokles v porovnání s kontrolním vzorkem.



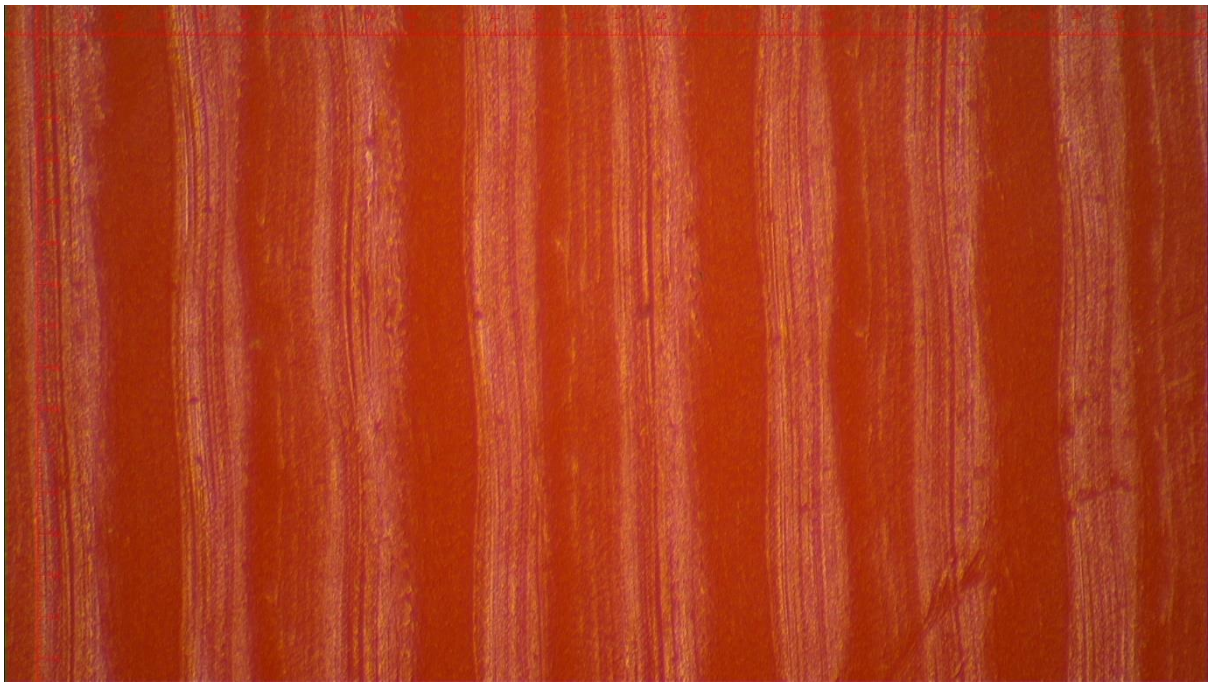
Obr. 52 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změnu houževnatosti materiálu PETG.



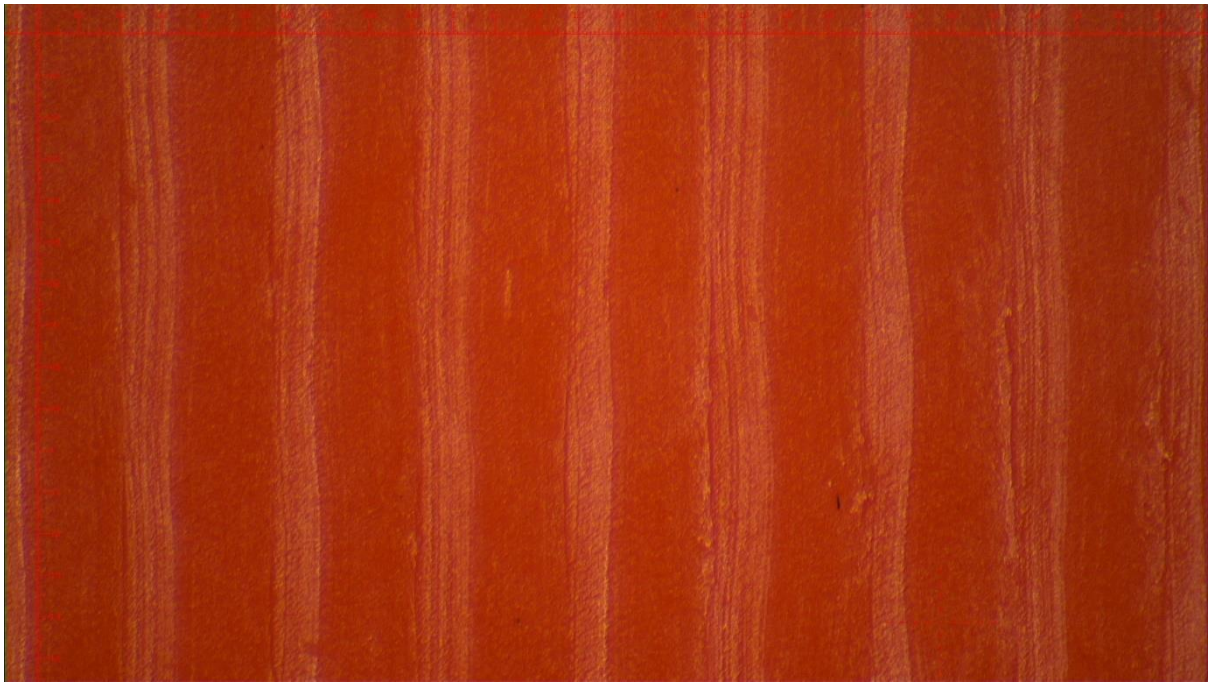
Obr. 53 – Grafické zobrazení vlivu biodegradace na procentuální změnu prodloužení materiálu PETG.

Na Obr. 54 jsou zobrazeny vzorky, které byly zkoumány pod mikroskopem. I u tohoto materiálu byly vytištěny dvě sady vzorků pro daný interval, na rozdíl od materiálu PLA však nedošlo k porušení soudržnosti vzorků. Pravděpodobně se tak stalo díky vyšším elastickým a houževnatým vlastnostem materiálu PETG. Na Obr. 55, Obr. 56, Obr. 57 a Obr. 58 jsou samotné vzorky pod mikroskopem. U kontrolního vzorku je možné výrazné a široké hranice linií extruze. Na vzorcích po čtyřech a po dvanácti měsících je možné pozorovat optickou změnu oproti kontrolnímu vzorku. Linie extruze jsou méně výrazné a užší. Povrch je opticky homogennější. Tento jev je výraznější u vzorku, na který působilo bioaktivní prostředí 12 měsíců. Na vzorku je také patrné mechanické poškození. Není možné přesně určit, z jaký faktor toto mechanické poškození způsobil, ale poškození se jeví, že bylo způsobeno tlakem.

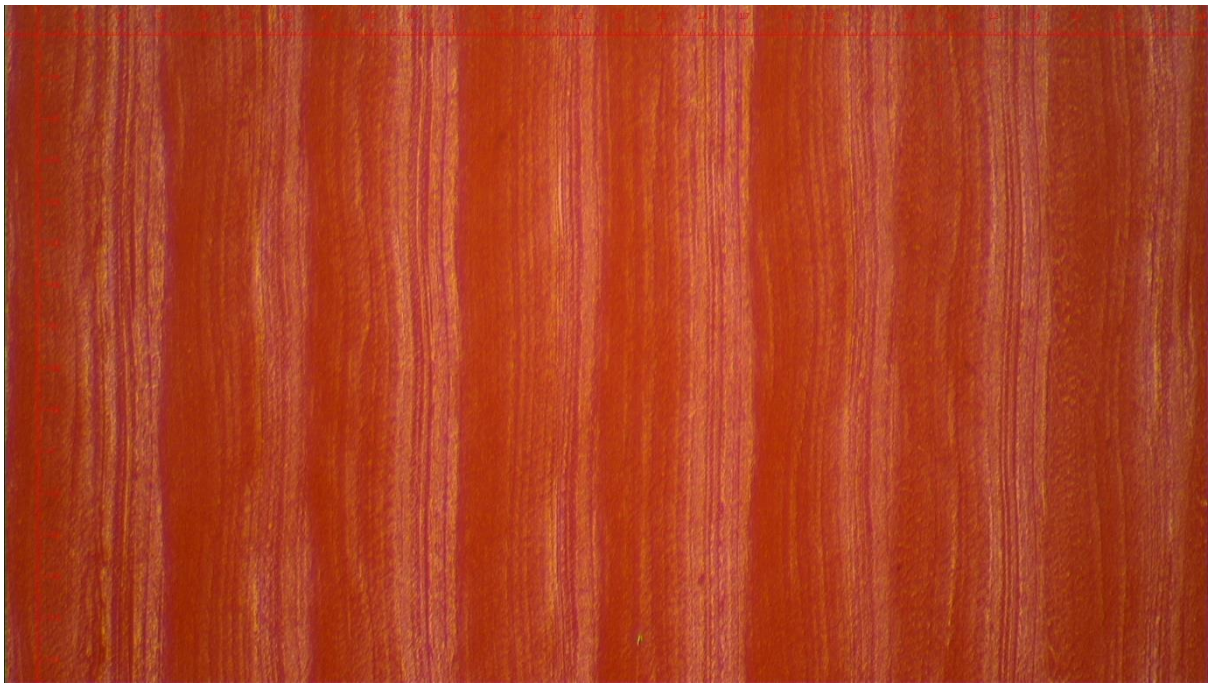
Obr. 54 – Mikroskopové vzorky (kontrolní vzorek, po čtyřech, osmi a dvanácti měsících v bioaktivním prostředí).



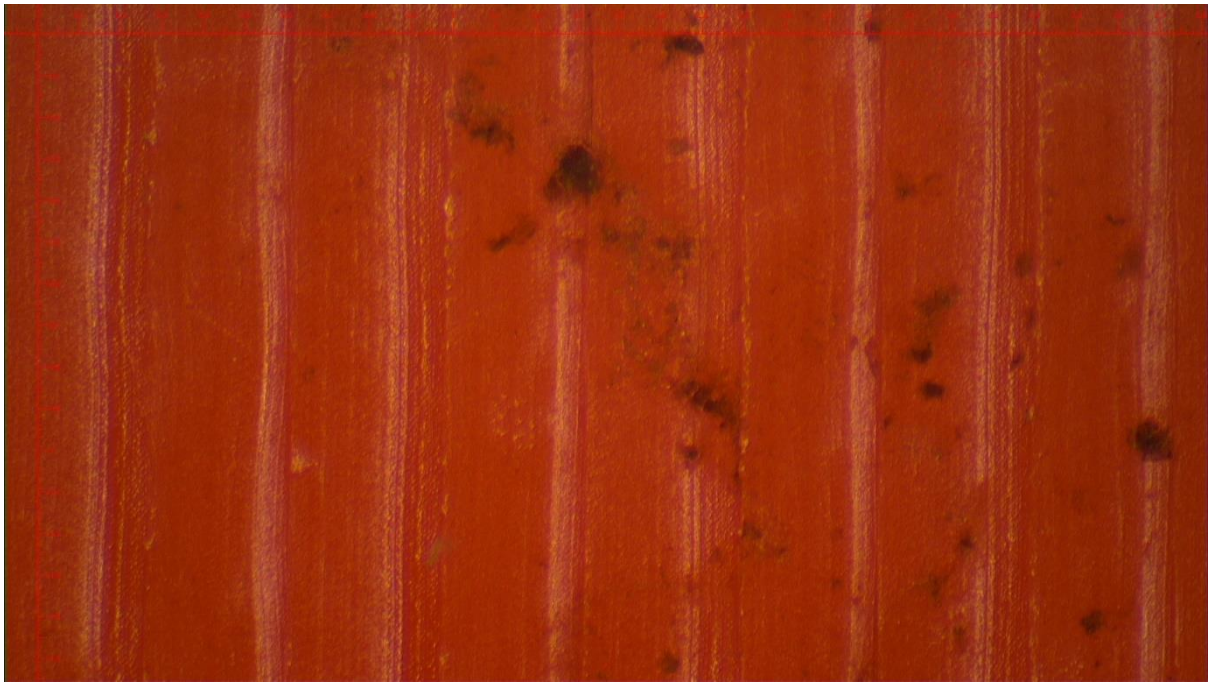
Obr. 55 – Snímek z mikroskopu – kontrolní vzorek materiálu PETG.



Obr. 56 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PETG po čtyřech měsících v bioaktivním prostředí.

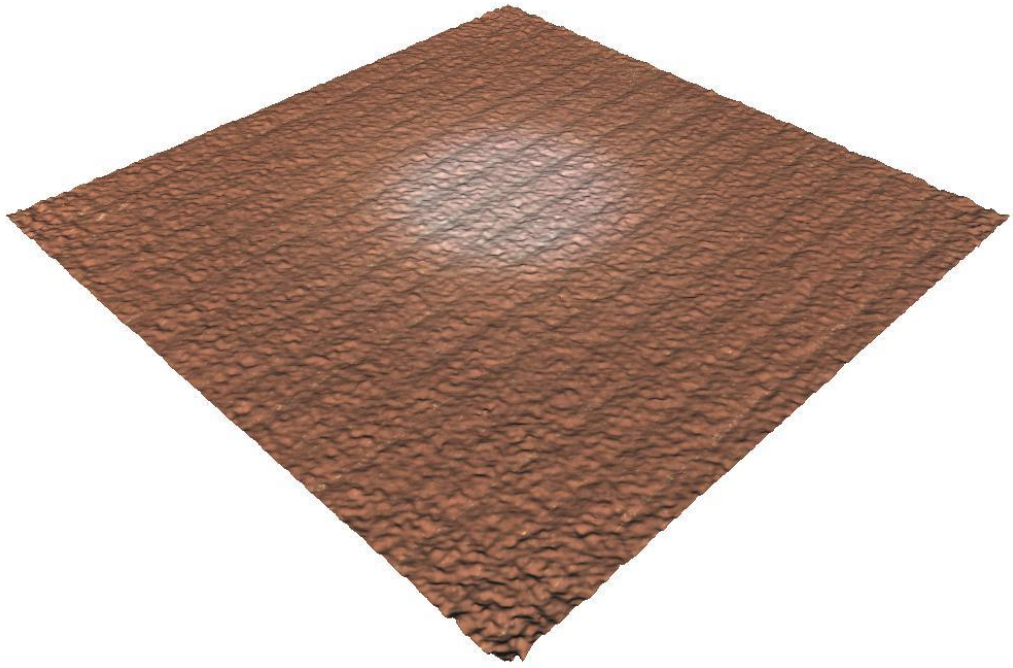


Obr. 57 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PETG po osmi měsících v bioaktivním prostředí.



Obr. 58 – Snímek z mikroskopu – vzorek materiálu PETG po dvanácti měsících v bioaktivním prostředí.

Vzorky materiálu PETG byly stejně jako vzorky PLA zobrazeny na zařízení Alicona. Opět byly použity stejné vzorky jako u optického mikroskopu, které jsou na Obr. 54. Na Obr. 59, Obr. 60, Obr. 61 a Obr. 62. Není možné s jistotou určit, zda se výrazně mění struktura a drsnost povrchu. Na první pohled vzorky vypadají velmi podobně kromě jiného grafického vzhledu kontrolního vzorku.



Obr. 59 – Snímek ze zařízení Alicona – kontrolní vzorek materiálu PETG.

Obr. 60 – Snímek ze zařízení Alicona – vzorek materiálu PETG po čtyřech měsících v bioaktivním prostředí.

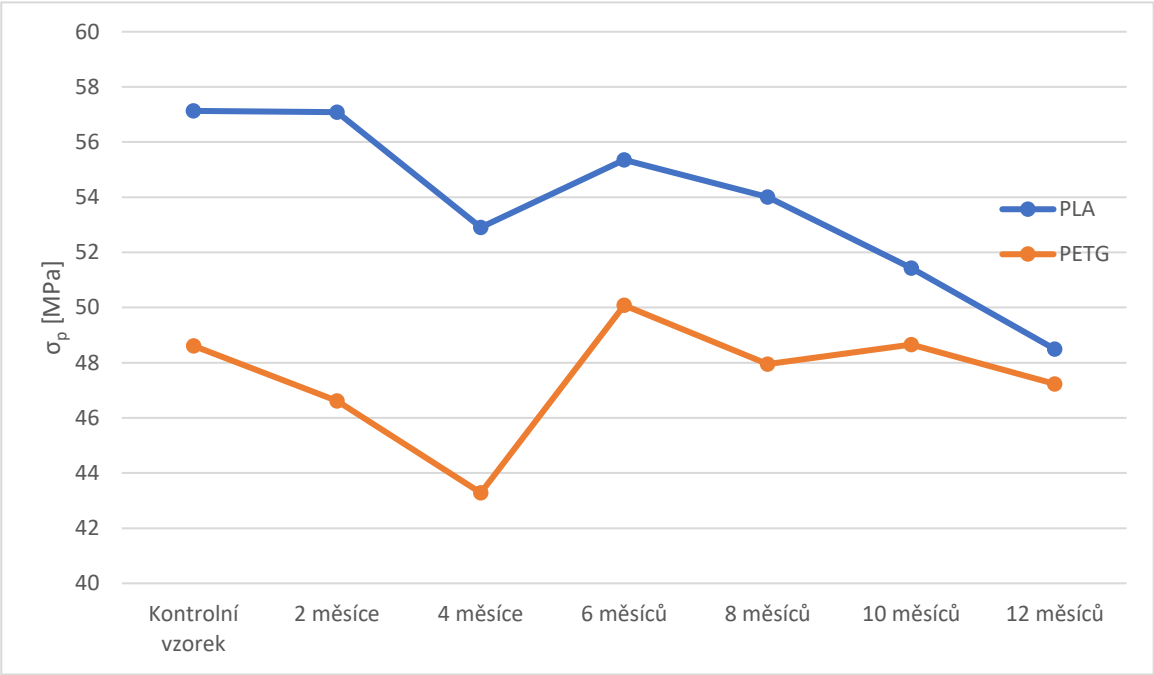
Obr. 61 – Snímek ze zařízení Alicona – vzorek materiálu PETG po osmi měsících v bioaktivním prostředí.

Obr. 62 – Snímek ze zařízení Alicona – vzorek materiálu PETG po dvanácti měsících v bioaktivním prostředí.

4.3 Srovnání obou materiálů

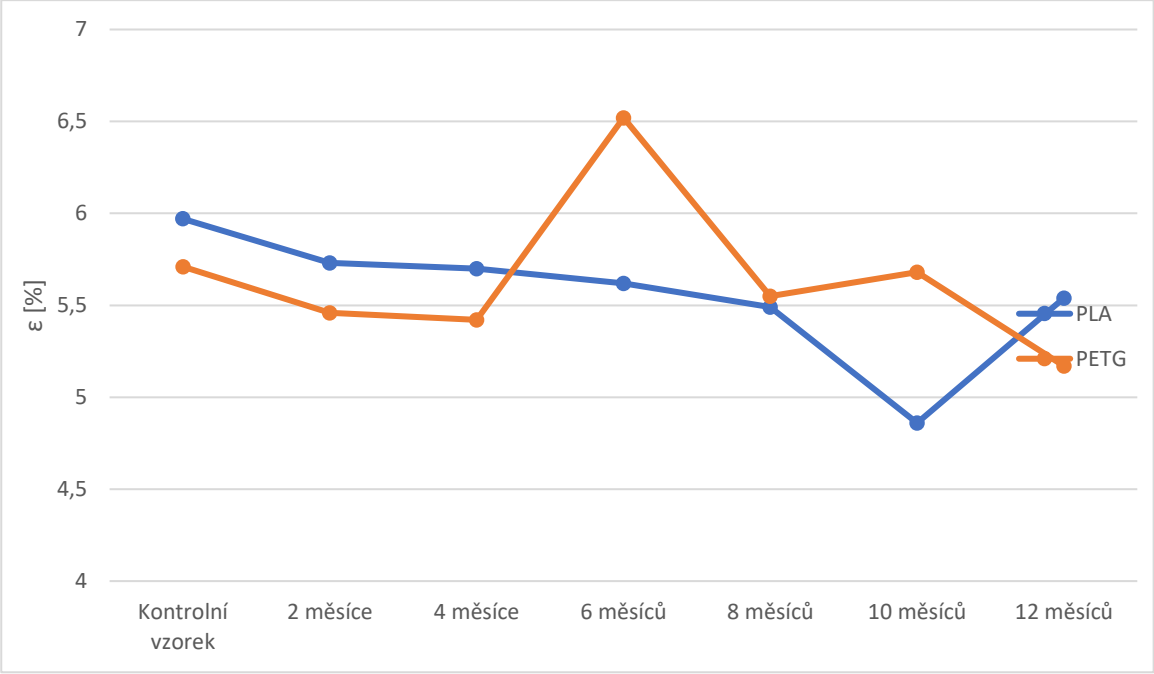
Pro samotné srovnání materiálů je bezpředmětné porovnávat jejich procentuální změny oproti kontrolnímu vzorku. Proto jsou porovnávány jejich konkrétní hodnoty naměřených veličiny.

Na Obr. 63 je vidět srovnání mezi pevnosti materiálů PLA a PETG. Je možné pozorovat, že oba materiály sledují velmi podobný trend. PETG má obecně menší hodnoty, v pozdějších měsících však má biodegradační prostředí na materiál daleko menší vliv. Je možné, že při překročení jednoho roku vlivu biodegradačního prostředí bude mít materiál PETG eventuelně menší hodnoty mezi pevnosti než materiál PLA, pro potvrzení této hypotézy je však třeba provést další testy.



Obr. 63 – Srovnání vlivu biodegradace na mez pevnosti materiálů PLA a PETG.

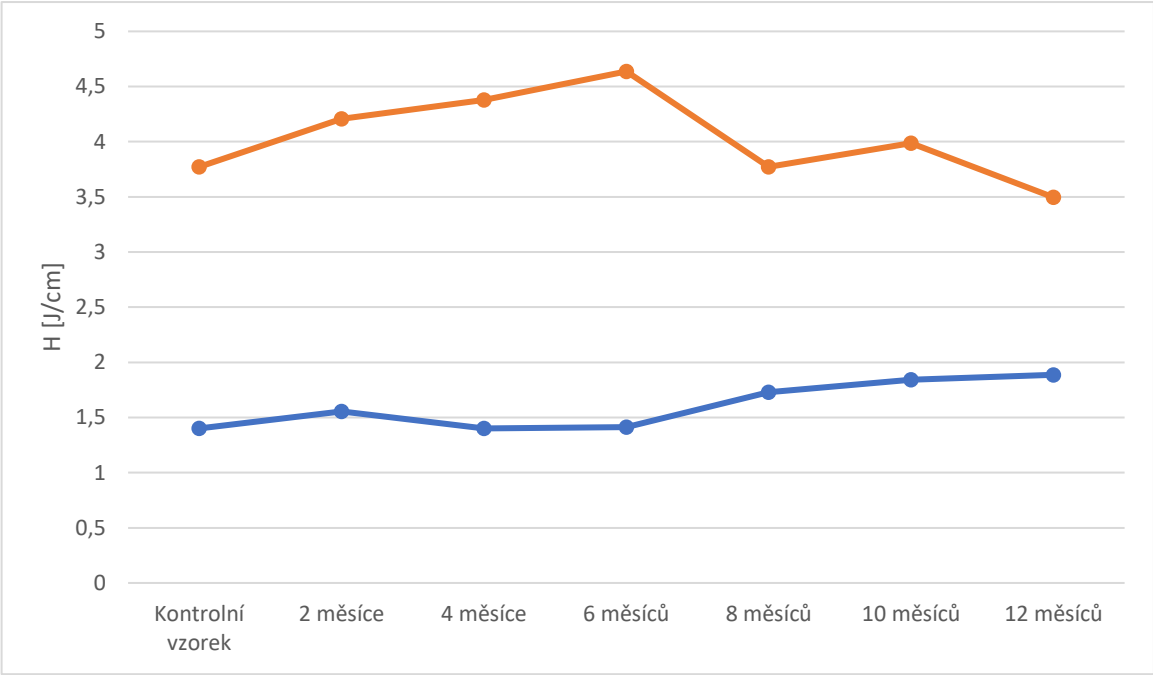
Na Obr. 64 je zobrazeno srovnání vlivu biodegradačního prostředí na prodloužení meteriálů PLA a PETG. V prvních měsících jsou hodnoty podobné, materiál PLA dosahuje vyššího prodloužení v okamžiku přetržení, od šestého měsíce dosahuje materiál PETG vyšších hodnot přetvoření než dojde k soudržnosti materiálu. Ve dvanáctém měsíci opět dosahuje materiál PLA vyšších přetvoření než materiál PETG.



Obr. 64 – Srovnání vlivu biodegradace na prodloužení materiálu PLA a PETG.

Na Obr. 65 je zobrazeno srovnání houževnatosti obou materiálů. Je patrné, že materiál PETG má daleko větší houževnatost než materiál PLA. U materiálu PLA je možné sledovat stoupající trend této vlastnosti. Ačkoliv dojde u materiálu PETG eventuelně k poklesu houževnatosti až

pod hodnotu kontrolního vzorku, tato hodnota je mnohem větší než nejvyšší dosažená houževnatost materiálu PLA.



Obr. 65 – Srovnání vlivu biodegradace na houževnatost materiálu PLA a PETG.

5 TECHNOLOGICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro technologicko-ekonomické zhodnocení je nejvhodnější konkrétní příklad. Oba porovnávané materiály jsou velmi podobně technologicky náročné. Materiál PLA se tiskne při nižších teplotách jak na trysce, tak na vyhřívané podložce. Oba materiály však vyžadují teploty, které zvládne většina tiskáren na trhu. Materiál PETG není možné tisknout přímo na skleněnou podložku, je možné však použít tyčinkové lepidlo jako separační vrstvu. Zároveň navlhlý materiál PETG má sklony stringovat.

Pro konkrétní příklad byl zvolen model Modern spiral planter ze webu Printables by JOSEF PRUSA [68]. Jedná se o květináč, který je typickým zástupcem výtisku, který je náchylný na ztrátu mechanických vlastností vlivem biodegradability. Oba vytištěné květináče je možné pozorovat na Obr. 66.

Obr. 66 – Modelové výtisky – vpravo PLA, vlevo PETG.

Pro porovnávání ekonomického zhodnocení obou materiálů byl použit program PrusaSlicer a výstupní data ze slicování modelů s nastavenými parametry od výrobce. Byla nastavena správná hustota materiálu, která je pro každý materiál jiná a přepočtená cena z eur na české koruny s aktuálním kurzem 23,793 Kč za 1 €. Uvedená cena jednotlivých materiálů na Obr. 67 a Obr. 68 je v českých korunách a byla zanesena do Tab. 5. [69; 70; 71; 72; 73]

Informace o slicování	
Použito Filamentu (g) (včetně cívky)	76,64 (306,64)
Použito Filamentu (m)	25,70
Použito Filamentu (mm^3)	61807,66
Náklady	42,03
Odhadovaný čas tisku:	
- normální režim	9h30m
- tichý režim	9h32m

Obr. 67 – Tisková data květináče z PLA.

Informace o slicování	
Použito Filamentu (g) (včetně cívky)	78,50 (279,50)
Použito Filamentu (m)	25,70
Použito Filamentu (mm^3)	61807,62
Náklady	55,38
Odhadovaný čas tisku:	
- normální režim	9h25m
- tichý režim	9h27m

Obr. 68 – Tisková data květináče z PETG.

Tab. 5 - Ekonomické zhodnocení materiálů

		PLA	PETG
Cena	$[Kč]$	42,03	55,38
Očekávaná minimální mez pevnosti	$[MPa]$	48,49	43,28
Očekávaná minimální houževnatost	$\left[\frac{J}{cm}\right]$	1,401	3,496

V Tab. 5 je vidět, že cena stejného modelu je rozdílná pro oba materiály. Materiál potřebný na výtisk modelu stojí zaokrouhleně 42 Kč pro materiál PLA, 55,50 Kč pro materiál PETG. Pro samotný verdikt o vhodnosti materiálu je důležité určit, jaké vlastnosti jsou pro takový tisk vhodný. U květináče je předpokládána dlouhodobá soudržnost, která je minimálně po dobu roku zaručena pro oba materiály. V případě, že je očekáváno hrubé zacházení, je výhodnější sáhnout po materiálu PETG kvůli jeho vysoké očekávané minimální houževnatosti. V případě, že se jedná o např. závěsné podpory plazivých rostlin, které budou namáhány na tah, je vhodné sáhnout po materiálu PLA. Je však vhodné poznamenat, že se materiál PETG jeví jako lepší varianta ve všech případech. Mez pevnosti materiálu PETG je menší oproti mezi pevnosti materiálu PLA o 5,21 MPa, což je zaokrouhleně 90 % mezi pevnosti materiálu PLA. Oproti tomu houževnatost materiálu PLA je v porovnání s materiálem PETG menší o 2,095 J/cm, což znamená, že materiál PLA disponuje asi zaokrouhleně 40% hodnotou houževnatosti materiálu PETG. Ekonomicky je proto výhodnější si připlatit více a tisknout z dražšího materiálu, který má sice o trochu menší mez pevnosti v tahu, ale zato mnohem větší houževnatost.

ZÁVĚR

V práci bylo prokázáno, že na oba vybrané materiály má bioaktivní prostředí vliv. Není však možné s určitostí říct, jestli se jednalo o biodegradaci. Materiál PLA je biodegradační, v přírodním prostředí by se měl rozkládat, tento proces však trvá několik let. Materiál PETG by se v přírodě neměl rozkládat vůbec. To však neznamená, že materiály nedegradují. U obou prokazatelně došlo ke změně mechanických vlastností, mohlo se však jednat o vliv např. vody nebo teploty. Oba materiály degradují pod UV světlem, ale o mechanismus rozkladu světlem se jednat nemohlo, protože byly zahrabány v kompostu bez přístupu světla.

U materiálu PLA dochází k poklesu mezi pevnosti v tahu a prodloužení v okamžiku ztráty soudržnosti materiálu, ale dochází k nárůstu houževnatosti. Největší pokles mezi pevnosti v tahu nastal po dvanácti měsících o 15,1 % oproti kontrolnímu vzorku, největší pokles prodloužení nastal v desátém měsíci o 18,5 % oproti kontrolnímu vzorku. U houževnatosti došlo k největšímu nárůstu ve dvanáctém měsíci o 34,7 %.

U materiálu PETG došlo k poklesu mezi pevnosti v tahu i k poklesu prodloužení při přetržení. K největšímu poklesu mezi pevnosti v tahu došlo ve čtvrtém měsíci o 11 % oproti kontrolnímu vzorku, největší pokles prodloužení nastal po dvanácti měsících o 9,3 % oproti kontrolnímu vzorku. Houževnatost materiálu PETG je náročné objektivně zhodnotit primárně kvůli velikým odhadnutým směrodatným odchylkám, jejichž velikosti intervalů byly ve všech případech vetší než naměřené hodnoty. Naměřené výsledky ukazovaly nárůst houževnatosti kromě statistického souboru po dvanácti měsících, u kterého došlo k poklesu hodnoty oproti kontrolnímu vzorku. Nejvyšší dosažený nárůst houževnatosti byl 23 %.

Obecně je pro výtisky vystavené biodegradačnímu prostředí výhodnější použít materiál PETG, který by neměl tímto rozkladovým mechanismem degradovat. Další jeho výhodou je vysoká houževnatost. Jeho nevýhodou oproti PLA je lehce vyšší cena.

Z teoretického hlediska je nejvýhodnější použít materiál ASA, kvůli jeho chemické odolnosti a odolnosti vůči UV záření. Není možné jej však doporučit, protože při jeho degradaci dochází k vypouštění toxických monomerů, které tento materiál tvoří.

Pro další zpřesňující informace pro vhodné použití materiálů v biodegradačním prostředí je možné doporučit provést měření vlivu UV záření na vzorky. Většina vzorků vystavených biodegradačnímu prostředí je zároveň vystavena UV záření.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. *Základy konstruování*. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.

[2] 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.

[3] 3D PRINTED JEWELRY BY BARBORA KOUTNA. In: *Fillamentum* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://fillamentum.com/blogs/3d-printed-jewelry-by-barbora-koutna/

[4] Cold spraying. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_spraying

[5] Stereolithography: SLA 3D Printing Simply Explained. In: *All3DP* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/

[6] Creality Water Washable Resin Plus 1kg bílá. In: *Alza.cz a.s.* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://www.alza.cz/creality-water-washable-resin-plus-1kg-bila-d7414927.htm?kampan=adwtts_tiskarny-spotrebak_pla_all_obecna-css_alternativni_c_1029091___CRP22_17_602862790929_~141164777881~&gclid=Cj0KCQjwu-KiBhCsARIsAPztUF0aOZJA1p_ieZVt7yzrYlHJGcxY9155OEtY1jn3x2ijuf8e9Rypn8oaAjUMEALw_wcB

[7] Selective laser sintering. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering

[8] Selective laser melting. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting

[9] CoreXY. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/CoreXY

[10] PRŮŠA, Josef. *Návod ke stavbě Original Prusa i3 MK3S*. 3.13. Praha: Prusa Research, 2019.

[11] First look at the Original Prusa XL: CoreXY with an always-perfect first layer and plenty of new features!. In: *Prusa Research a.s.* [online]. Praha [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/original-prusa-xl-first-look_58312/

[12] Best CoreXY 3D Printers 2020. In: *3D Distributed* [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://i0.wp.com/www.researchgate.net/profile/Shane_Hooper/publication/346036049/figure/fig1/AS:966073641865219@1607341313422/CoreXY-Mechanism_W640.jpg?resize=768%2C480&ssl=1

[13] Delta robot. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Delta_robot

[14] TRILAB AzteQ Industrial: The first in a new line of TRILAB delta printers. In: *TRILAB* [online]. [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://trilab3d.com/wp-content/uploads/2022/11/AzteQIndustrial-bg2022.jpg

[15] THE ROTBOT: 4-AXIS NON-PLANAR 3D PRINTING. In: *CNC Kitchen* [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.cnckitchen.com/blog/the-rotbot-4-axis-non-planar-3d-printing

[16] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. ISBN 978-90-827485-0-5.

[17] PRŮŠA, Josef. *3D Printing Handbook*. Verze 3.11. Praha, 2019.

[18] ULTIMAKER 2+ CONNECT 3D Tiskárna. In: *Farnel* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://cz.farnell.com/productimages/standard/en_GB/3605342-40.jpg

[19] *Inside the makerbot smart extruder plus image* [online]. [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: https://cz.pinterest.com/pin/593982638329724277/

[20] Direct extrusion and Bowden systems. In: *FILAMENT2PRINT* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://filament2print.com/gb/blog/94_bowden-direct-extrusion.html

[21] *3D Printer PEEK filament* [online]. In: . [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: https://sharplayers.s18.cdn-upgates.com/2/26218bea131a45-peek-datasheet.pdf

[22] *Nahrání firmware Marlin* [online]. 2018 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://3dfactory.cz/2018/05/02/nahrani-firmware-marlin/

[23] 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

[24] *Stavebnice 3D tiskárny Original Prusai3 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

[25] *PrusaSlicer* [online]. Praha: Prusa Research, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: https://www.prusa3d.cz/prusaslicer/

[26] G-cody speciálně pro tiskárny Prusa. In: *Prusa Research a.s.* [online]. Praha [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/g-cody-specialne-pro-tiskarny-prusa_112173

[27] Filament PM PLA 1,75 mm, 5kg, černá (1,75 PLA, filament black). In: *NC Computers s.r.o.* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://www.nc.cz/filament-pm-pla-1-75-mm-5kg-cerna-1-75-pla-filament-black-_i444696.jpg

[28] 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

[29] *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

[30] 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

[31] STŘÍTESKÝ, Ondřej. Prusament ASA je tady. Jak a co tisknout s nástupcem ABS?. In: *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.Cj0KCQjwyZmEBhCpARIsALIzmnJ9ioMcbvZFPGwadYrF55BGY6MpRu7kqpxiUDOcbVUqB6G4cdxhXCgaAqREEALw_wcB

[32] TPE – TERMOPLASTICKÝ ELASTOMER. In: *Resinex* [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.resinex.cz/polymerove-typy/tpe.html

[33] TPE 32 RubberJet Flex - Natur (1,75 mm; 0,5 kg). In: *Filament PM* [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.filament-pm.cz/tpe-32-rubberjet-flex-natur-1-75-mm-0-5-kg/p88

[34] Flexfill TPU 98A. In: *Fillamentum* [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://fillamentum.com/collections/flexfill-tpu-flexible-filament/flexfill-tpu-98a/?_ga=2.47181159.1532586890.1680101984-886337948.1632743805&_gl=1*ys63ev*_ga*ODg2MzM3OTQ4LjE2MzI3NDM4MDU.*_ga_L703XWXLV0*MTY4MDEwMTk4My4xOC4xLjE2ODAxMDIwNDEuMi4wLjA.

[35] Prusament PC Blend Jet Black 970g. In: *Prusa Research a.s.* [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-pc-blend-jet-black-970g/

[36] PAJet 160 nylon - Natur (1,75 mm; 0,5 kg). In: *Filament PM* [online]. [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.filament-pm.cz/pajet-160-nylon-natur-1-75-mm-0-5-kg/p101

[37] Effect of nylon on properties after absorbing water!. In: *Gud Mould* [online]. [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: https://gudmould.wordpress.com/2021/06/03/effect-of-nylon-on-properties-after-absorbing-water/

[38] Polyetherimidová vlákna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyetherimidov%C3%A1_vl%C3%A1kna

[39] PEIJet 1010 Ultem - Natur (1,75 mm; 0,5 kg). In: *Tiskové struny do 3D tiskáren |Filament PM* [online]. Chudobín [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.filament-pm.cz/peijet-1010-ultem-natur-1-75-mm-0-5-kg/p199

[40] HIPS. In: *Prusa Research a.s.* [online]. Praha [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/hips_167118

[41] Polyvinylalkohol. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyvinylalkohol

[42] Prusament PLA Lipstick Red 2kg. In: *Prusa Research a.s.* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-pla-lipstick-red-2kg/

[43] *ABS Extrafill "transparent" Datasheet* [online]. Hulín: Fillamentum [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical-Data-Sheet_ABS-Extrafill-transparent_03012019-1.pdf

[44] *ABS/PC Datasheet* [online]. Hulín: Fillamentum [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2020/10/Technical_Data_Sheet_PC-ABS.pdf

[45] Polymer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polymer

[46] Scientists Say: Polymer. In: *ScienceNewsExplores* [online]. 1719 N Street, N.W., Washington, D.C. 20036, 2020 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://www.snexplores.org/wp-content/uploads/2020/06/1030_SS_polymer-1028x579.jpg

[47] TOKIWA, Yutaka, Buenaventurada CALABIA, Charles UGWU a Seiichi AIBA. Biodegradability of Plastics. *International Journal of Molecular Sciences* [online]. 2009, **10**(9), 3722-3742 [cit. 2023-03-30]. ISSN 1422-0067. Dostupné z: doi:10.3390/ijms10093722

[48] O'CONNELL, Jackson a Amir BOHLOOLI. Is PLA Actually Biodegrable?. In: *All3DP* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://all3dp.com/2/is-pla-biodegradable-what-you-really-need-to-know/

[49] Crystallinity. In: *Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)* [online]. University of Cambridge, 2004-2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/polymerbasics/crystallinity.php

[50] Polymer degradation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer_degradation

[51] Biodegradation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Biodegradation

[52] LUCAS, Nathalie, Christophe BIENAIME, Christian BELLOY, Michèle QUENEUDEC, Françoise SILVESTRE a José-Edmundo NAVA-SAUCEDO. Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques – A review. *Chemosphere* [online]. 2008, **73**(4), 429-442 [cit. 2023-05-17]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2008.06.064

[53] Biodeteriorace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Biodeteriorace

[54] Recycling technologies. In: *Plastics Europe* [online]. Rue Belliard 40, Box 16 1040 Brussels - Belgium [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/recycling-technologies/

[55] Recyklační symboly plastů a jak jim rozumět. In: *Zemito* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://www.zemito.cz/blog/recyklacni-symboly-plastu-a-jak-jim-rozumet/

[56] Creality CR-Silk duhová. In: *Alza.cz a.s.* [online]. 1994-2023 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://www.alza.cz/creality-cr-silk-duhova-d7455467.htm

[57] Is PLA filament actually biodegradable?. In: *3D natives* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: https://www.3dnatives.com/en/pla-filament-230720194/

[58] What is PLA?. In: *BioPack* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: https://www.biopak.com/au/resources/what-is-pla

[59] 3D PRINTING GUIDE NonOilen®. In: *Fillamentum* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: http://www.fillamentumautomotive.com/wp-content/uploads/2021/01/FILL_Printing_Guide_NonOilen.pdf

[60] HIRAGA, Kazumi, Ikuo TANIGUCHI, Shousuke YOSHIDA, Yoshiharu KIMURA a Kohei ODA. Biodegradation of waste PET. *EMBO reports* [online]. 2019, **20**(11) [cit. 2023-04-01]. ISSN 1469-221X. Dostupné z: doi:10.15252/embr.201949365

[61] Is ABS Recyclable and also Biodegradable?. In: *3D Solved* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://3dsolved.com/is-abs-recyclable-and-also-biodegradable/

[62] Akrylonitril. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Akrylonitril

[63] Je pla skutočne biologicky rozložiteľný?. In: *JustCreate3D* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://eshop.justcreate.sk/je-pla-skutocne-biologicky-rozlozitelny/

[64] Modular Vermicomposter Improved Legs. In: *Printables by JOSEF PRUSA* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://www.printables.com/cs/model/295352-modular-vermicomposter-improved-legs

[65] Avocado seed floater. In: *Printables by JOSEF PRUSA* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://www.printables.com/cs/model/627-avocado-seed-floater

[66] Mega kompostér Keter 650L černý 231598. In: *Curver* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.curver-shop.cz/Media/download/image/30228?preset=detail

[67] Nízký vermikompostér Urbalive antracit. In: *Kitchenette* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.kitchenetteshop.cz/uploads/products/10972/big/nizky-vermikomposter-urbalive-antracit-1.jpg

[68] Modern spiral planter. In: *Printables by JOSEF PRUSA* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.printables.com/cs/model/225251-modern-spiral-planter/files

[69] Z Euro na Česká koruna. In: *Google Finance* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://www.google.com/finance/quote/EUR-CZK?sa=X&ved=2ahUKEwjJ943L9IP_AhUR_7sIHa8ZDB8QmY0JegQIBhAc

[70] Technical Datasheet PETG. In: *Fillamentum* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://fillamentum.com/wp-content/uploads/2023/02/TDS_PETG_EN_30012023.pdf

[71] PLA Extrafill "Traffic White". In: *Fillamentum* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://shop.fillamentum.com/collections/pla-extrafill-filament/products/pla-extrafill-traffic-white

[72] *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

[73] PETG "Calendula Orange". In: *Fillamentum* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://shop.fillamentum.com/collections/petg/products/petg-calendula-orange

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a_h	průřez vzorku	$[cm]$
E_k	kinetická energie přerážecího kladiva	$[J]$
E_{Vi}	energie potřebná na proražení daného vzorku	$[J]$
F_i	síla působící na i-tý vzorek	$[N]$
H_i	energie vztažená na průřez daného vzorku	$\left[\frac{J}{cm}\right]$
$\overline{H_i}$	průměrná rázová energie pro daný statistický soubor	$\left[\frac{J}{cm}\right]$
l_i	poloha svěráku daného vzorku v i-tém kroku	$[mm]$
l_v	původní délka daného vzorku	$[mm]$
l_0	nulová poloha svěráku daného vzorku	$[mm]$
n	počet vzorků ve statistickém souboru	$[-]$
S	průřez vzorku	$[mm^2]$
S_{Hi}	směrodatná odchylka rázové energie odhadnutá aritmetickým průměrem	$\left[\frac{J}{cm}\right]$
$S_{\varepsilon J}$	směrodatná odchylka procentuálního prodloužení odhadnutá aritmetickým průměrem	[%]
$S_{\sigma J}$	směrodatná odchylka mezi pevnosti odhadnutá aritmetickým průměrem	$[MPa]$
Δl_i	protažení vzorku v i-tém kroku	$[mm]$
ε_i	procentuální protažení vzorku v i-tém kroku	[%]
$\overline{\varepsilon_J}$	průměrné procentuální prodloužení pro daný statistický soubor	$[MPa]$
η	zbylá procentuální energie kladiva	[%]
σ_i	napětí působící na i-tý vzorek	$[MPa]$
σ_{pi}	mez pevnosti pro i-tý vzorek statistického souboru	$[MPa]$
$\overline{\sigma_{pJ}}$	průměrná mez pevnosti pro daný statistický soubor	$[MPa]$
$\psi_{\varepsilon J}$	procentuální vyjádření hodnoty procentuálního prodloužení daného statistického souboru oproti kontrolní skupině	[%]
$\psi_{\sigma J}$	procentuální vyjádření hodnoty mezi kluzu daného statistického souboru oproti kontrolní skupině	[%]
ψ_{HJ}	procentuální změna houževnatosti vlivem biodegradace daného statistického souboru oproti kontrolní skupině	[%]

Zkratky

Označení	Legenda
ABS	akrylonitrilbydadienstyren
ASA	akronytrilstyrenakrylát
CAM	computer aided manufactoring
CNC	computer numerical control
FDM	fused deposition modeling
HIPS	high impact polystyrene
PC	polykarbonát
PEEK	polyetheretherketon
PEI	polyetherimid
PETG	polyethylentereftalát s modifikovaným glykolem
PHB	polyhydrobutyrát
PID	proporcionální, integrační, derivační
PLA	kyselina polymléčný
PVA	polyvinylacetát

Označení	Legenda
SLA	stereolitografie
SLM	selective laser melting
SLS	selective laser sintering
TPE	termoplastický elastomer
TPU	termoplastický polyuretan