



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

EXPERIMENTÁLNÍ POROVNÁNÍ FILAMENTU VYROBENÉHO Z RECYKLOVENÉHO A BĚŽNÉHO PET

EXPERIMENTAL COMPARISON OF FILAMENT PRODUCED FROM RECYCLED AND REGULAR PET

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Renata Tomčová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Renata Tomčová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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

Experimentální porovnání filamentu vyrobeného z recyklovaného a běžného PET

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Se stálým nárůstem využívání plastových materiálů se řeší také otázka jejich recyklace. S nárůstem využití plastů pro účely 3D tisku vzrůstá tato otázka i zde. Jedním z materiálů, který se k recyklaci a znovu použití pro 3D tisk nabízí, je materiál PET. Jeho použitím by se dosáhlo snížení ceny 3D tisku a zvýšením ekologičnosti tohoto procesu.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je experimentálně ověřit možnosti výroby filamentu pro 3D tisk z recyklovaného PET materiálu a porovnat jeho vlastnosti s běžným PET filamentem a tím určit jeho vhodnost použití pro tuto aplikaci.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- zajistit vhodný běžný a recyklovaný PET materiál,
- stanovit parametry a realizovat výrobu filamentů z obou materiálů,
- stanovit způsob a parametry experimentálního porovnání obou filamentů,
- realizovat experimenty,
- vyhodnotit výsledky a stanovit závěry.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

DUBASHI, Jay, Brian GRAU a Alex MCKERNAN. AkaBot 2.0: pet 3D printing filament from waste plastic [online]. Santa Clara, California, 2015 [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: https://scholarcommons.scu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1043&context=mech_senior. Senior Design Project Report. SANTA CLARA UNIVERSITY.

MOHAMMED, Mazher Iqbal, Meera MOHAN, Anirudra DAS, Mitchell D. JOHNSON, Parminder SINGH BADWAL, Doug MCLEAN a Ian GIBSON. A low carbon footprint approach to the reconstitution of plastics into 3D-printer filament for enhanced waste reduction. In: KnE Engineering [online]. 2017, 2(2), s. 234-241 [cit. 2018-10-26]. DOI: 10.18502/keg.v2i2.621. ISSN 2518-6841. Dostupné z: <http://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/621/1919>

BAECHLER, Christian, Matthew DEVUONO a Joshua M. PEARCE. Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock. Rapid Prototyping Journal [online]. 2013, 19(2), 118-125 [cit. 2018-10-26]. DOI: 10.1108/13552541311302978. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552541311302978>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá experimentálním porovnáním filamentu vyrobeného z recyklovaného a běžného PET. Filament byl vyrobený z komerčních granulátů PET, PET-G a z recyklovaných PET lahví. Z těchto filamentů se pomocí technologie FDM vytiskly zkušební vzorky, které byly otestovány pomocí tahové zkoušky. Zkušební vzorky z recyklovaného PET filamentu dosáhly o třetinu nižší pevnosti v tahu než vzorky vytištěné z běžného PET a PET-G filamentu. Díky této bakalářské práci je možné rozhodnout, zda má smysl realizovat výrobu filamentu z recyklovaných PET lahví i za cenu snížení mechanických vlastností konečných výrobků.

KLÍČOVÁ SLOVA

extruze, filament, 3D tisk, recyklovaný PET, tahová zkouška

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the experimental comparison of filament made from recycled and common PET. Filament was made from commercial granulate of PET, PET-G and from recycled PET bottles. Sample pieces were printed using FDM technology from these filaments and then the sample pieces were tested using a tensile test. The sample pieces made from recycled PET filament had one third worse tensile strength than the sample pieces made from common PET and PET-G filaments. Thanks to this bachelor thesis it is possible to decide, if it is worthy producing filament from recycled PET bottles even at the cost of reducing the mechanical properties of final products.

KEYWORDS

extrusion, filament, 3D printing, recycled PET, tensile test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMČOVÁ, Renata. *Experimentální porovnání filamentu vyrobeného z recyklovaného a běžného PET*. Brno, 2019, 56 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Tomáši Kouteckému, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady, nápady a trpělivost po celou dobu vypracovávání této bakalářské práce. Dále chci poděkovat panu Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D. za jeho ochotu a pomoc při tahové zkoušce. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za obrovskou podporu po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, pod odborným vedením Ing. Tomáše Kouteckého, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpala, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Technologie 3D tisku	14
2.1.1	Stereolithography	14
2.1.2	Selective laser melting	15
2.1.3	Selective laser sintering	15
2.1.4	3D printing	16
2.1.5	Multi-jet modeling	17
2.1.6	Fused deposition modeling	17
2.2	Materiál PET	21
2.2.1	Využití a zpracování PET	22
2.2.2	Recyklace PET	23
2.2.3	PET vs. PET-G	23
2.3	Extruze	24
2.3.1	Extruze recyklovaného PET	25
2.4	Testování mechanických vlastností materiálů a vzorků	27
2.4.1	Obecné principy	27
2.4.2	Obecné principy tahové zkoušky ČSN EN ISO 527-1	28
2.4.3	Stanovení ohybových vlastností ČSN EN ISO 178	30
2.4.4	Stanovení rázové houževnatosti ČSN EN ISO 180	31
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	33
3.1	Analýza problému	33
3.2	Cíl práce	33
4	MATERIÁL A METODY	35
4.1	Příprava materiálů pro extruzi	35
4.2	Extruze filamentů	36
4.3	Příprava a výroba zkušebních těles	37
4.3.1	Příprava zkušebních těles	37
4.3.2	Výroba zkušebních těles	39
5	VÝSLEDKY	40

5.1	Výsledky extruzí	40
5.2	Výsledky tahových zkoušek	42
6	DISKUZE	44
7	ZÁVĚR	49
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	52
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	54
11	SEZNAM TABULEK	56

1 ÚVOD

3D tisk je technologie, která se každým dnem stává více a více rozšířenou, a to nejen v průmyslové praxi, ale i mezi lajky. Tato technologie se používá jak pro výrobu prototypů, tak i finálních produktů. Nejvíce rozšířenou metodou 3D tisku je metoda Fused deposition modeling (FDM). Mezi nejčastější materiály, které se při této metodě používají, patří ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), PLA (Kyselina polyléčná) a PET-G (Polyethylentereftalát-glykol).

Produkce výrobků z materiálu PET neustále roste. Z tohoto důvodu se řeší likvidace, popřípadě recyklace tohoto materiálu. Jedním z mnoha nápadů, jak využít recyklovaný PET, je výroba filamentu pro 3D tisk z PET lahví.

PET je velmi hydrofilní materiál, což znamená, že absorbuje vlhkost z okolního prostředí. Při dosažení teploty tání se absorbovaná vlhkost vypařuje, což způsobuje zpřetrhání polymerních řetězců a snížení molekulové hmotnosti. Proto vlivem recyklace, která je spojená s tepelným zpracováním materiálu, dochází u materiálu PET ke zhoršení jeho mechanických vlastností.

Z důvodu zhoršení mechanických vlastností vlivem recyklace je cílem této bakalářské práce realizovat výrobu filamentu z PET lahví a z komerčního PET granulátu a porovnat mechanické vlastnosti takto vyrobených vzorků pomocí tahové zkoušky. Z výsledků tahové zkoušky lze vyhodnotit, jestli je filament vyrobený z recyklovaného PET vhodný pro výrobu součástí pomocí 3D tisku, či nikoli.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

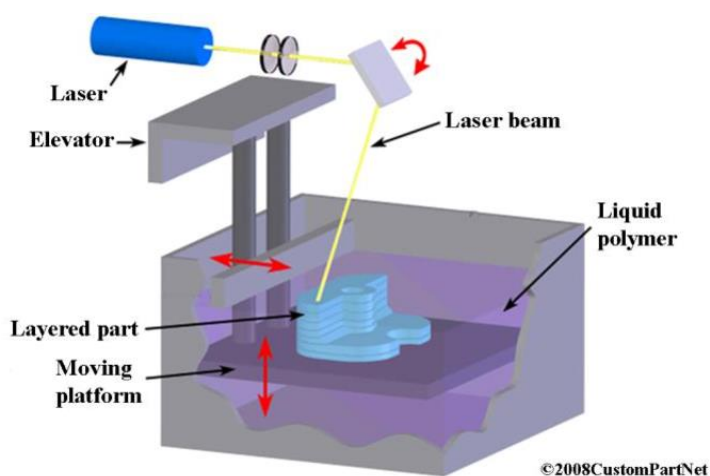
2.1 Technologie 3D tisku

Technologie Rapid prototyping (RP) umožňuje vytvářet součásti složitých tvarů, čímž se při výrobě šetří čas i náklady. RP zpracovává informace o digitálním objektu vytvořeném v CAD programu, které pak převede do fyzické podoby. Tento proces spočívá v tom, že materiál je na sebe nanášený vrstvu po vrstvě, a to za pomoci digitálních dat. Tato data se skládají ze souboru STL (Surface tessellation language), který udává algoritmus vytvoření součásti [1].

Jednotlivé technologie Rapid prototyping (RP) se řadí do dvou kategorií. První je založena na vysoké energii laserových paprsků. Do této kategorie spadají metody, jako je stereolithography (SLA), laminated object manufacturing (LOM) a selective laser sintering (SLS). Druhá kategorie je založena na nanášení kapiček nebo extruzi materiálu pomocí trysky, do které spadají metody, jako je fused deposition modeling (FDM), ink jet printing (IJP) a 3D printing (3DP) [1].

2.1.1 Stereolithography

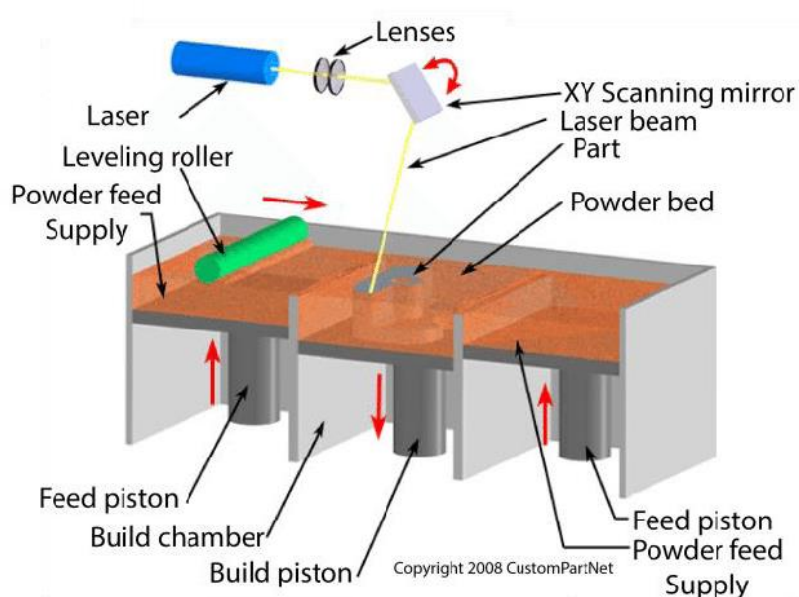
Stereolithography (SLA) je metoda založena na postupném vytvrzování jednotlivých 2-D vrstev. Po vytvrzení jedné vrstvy nosná deska sjede níž, stírací čepel zarovná nanesenou pryskyřici a proces se opakuje [2]. Tento typ zařízení obvykle obsahuje nádrž s fotosenzitivní pryskyřicí, mobilní pracovní stůl s porézni deskou, UV laser a skenovací systém. SLA má velmi vysokou přesnost, tudíž s ním lze vyrábět velmi jemné součásti. Při výrobě je ovšem zapotřebí použít podpory. Tato technologie je poměrně drahá, a to kvůli fotopolymerizovatelné pryskyřici a laserovému systému [1].



obr. 2-1 Princip metody SLA [3]

2.1.2 Selective laser melting

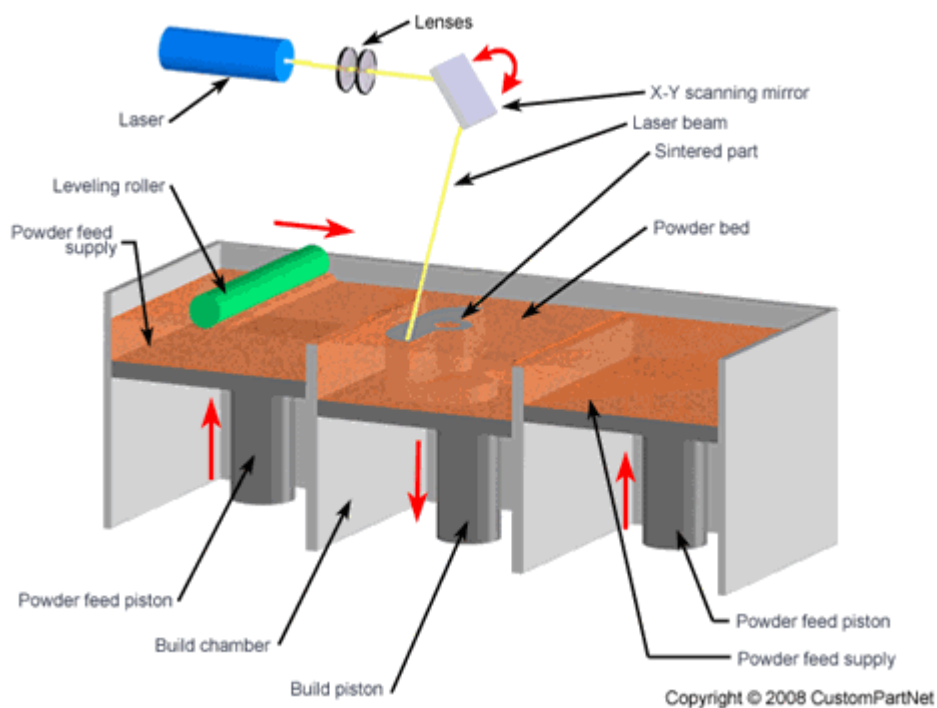
Princip metody Selective laser melting (SLM) spočívá ve využití energie paprsku laseru, který roztaví jemné částice prášku jedné vrstvy. Po ztuhnutí prášku se základová deska posune o tloušťku jedné vrstvy dolů a je nanášena další vrstva prášku. Tento proces se opakuje do doby, než vznikne celá součást, která následně musí být oddělena od základové desky. Metodou SLM je možné vyrobit kvalitní součásti s jemnými strukturami a kvalitním povrchem [4].



obr. 2-2 Princip metody SLM [3]

2.1.3 Selective laser sintering

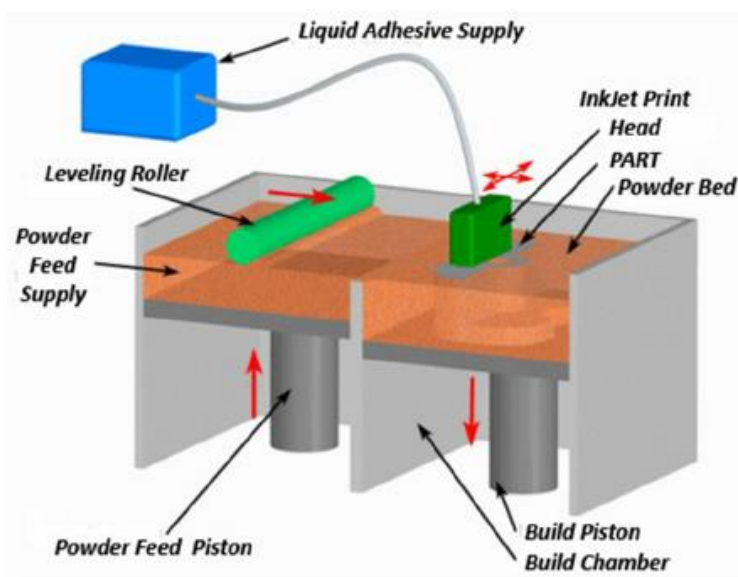
Selective laser sintering (SLS) je metoda, jejíž princip spočívá ve vrstvení práškového materiálu. Materiál, jako jsou plasty, kovy a keramika atd, jsou nanášeny ve formě prášku na podkladovou desku. Prášek je nataven CO_2 laserem a dochází k jeho spékání v požadovaných místech. Ostatní materiál slouží jako podpora. Jakmile se dokončí jedna vrstva, nosná deska se posune dolů o tloušťku jedné vrstvy a je nanášena další vrstva prášku a proces se opakuje. Po dokončení je nutné odstranit přebytečný okolní prášek. Tato metoda je vhodná pro výrobu forem a tvarově složitých součástí [2].



obr. 2-3 Princip metody SLS [3]

2.1.4 3D printing

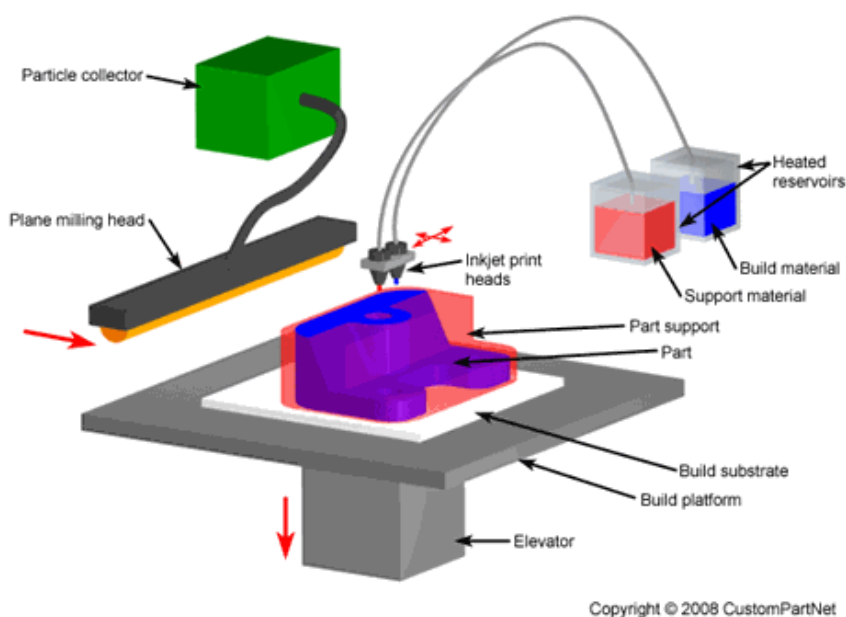
Metoda 3D printing (3DP) je založena na selektivním vrstveném tisku trojrozměrných předmětů z prášku, který je spojen speciálním pojivem. Toto pojivo je nanášeno pomocí Ink-Jet tiskové hlavy. Je nanášena jedna vrstva materiálového prášku, která je následně spojena podle požadovaného tvaru, tisková podložka poklesne o výšku jedné vrstvy a proces se opakuje [5].



obr. 2-4 Princip metody 3DP [3]

2.1.5 Multi-jet modeling

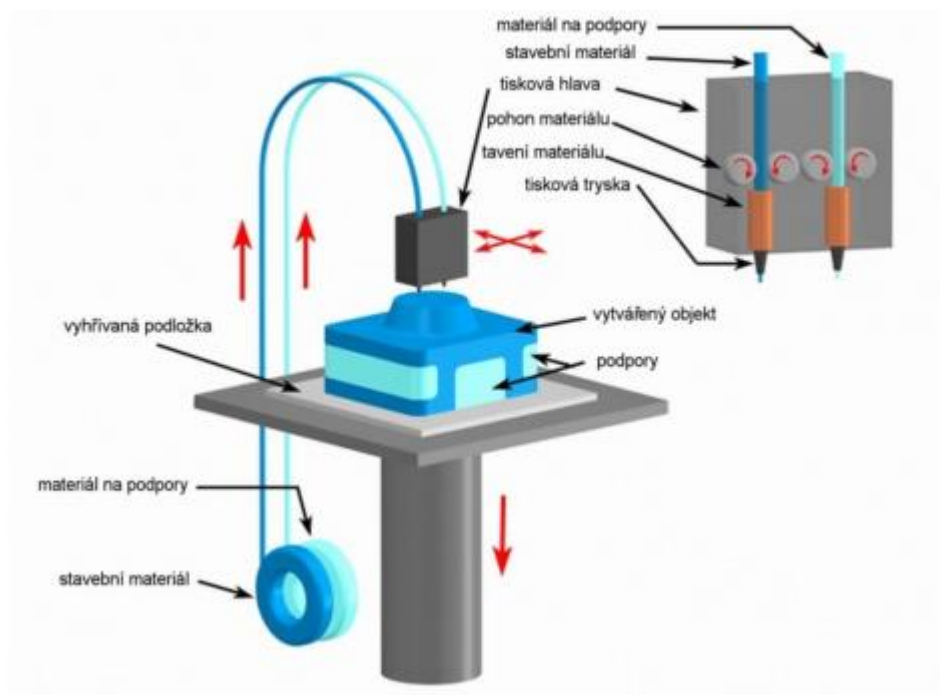
Metoda Multi-jet modeling (MJM) neboli InkJet printing (IJP) spočívá v nanášení jednotlivých vrstev termopolymeru pomocí speciální tiskové hlavy, která má několik desítek trysek generujících kapičky polymeru. Tisková hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy. Součást se vytváří na nosné desce podobně jako u metody SLA. Díky velkému počtu trysek na tiskové hlavě je zaručena velká rychlost a rovnoměrnost nanášení materiálu. Výhodou je, že nově nanesený termoplastický materiál ztuhne na již naneseném materiálu prakticky okamžitě. Podpůrný materiál je následně rozpuštěn [5].



obr. 2-5 Princip metody MJM/IJP [3]

2.1.6 Fused deposition modeling

Fused deposition modeling (FDM) je nejběžnější metoda aditivních technologií. Je využívána především pro výrobu funkčních prototypů, avšak díky své časové nenáročnosti se používá i pro výrobu finálních produktů [6]. V procesu FDM se termoplastické vlákno přivádí do ohřívací komory krokovým motorem, protlačuje se přes trysku při teplotě tání daného materiálu a nanáší se vrstvu po vrstvě na vyhřívanou podložku, která zajišťuje horizontální pohyb, kde následně ztuhne. Po nanesení jedné vrstvy se tryska posune o tloušťku této vrstvy nahoru a proces se opakuje [7]. V případě složitějších tvarů výrobků se používají podpory, což je vidět na obr. 2-6, které vyplní duté prostory. Tyto podpory jsou následně odstraněny.



obr. 2-6 Princip metody FDM [8]

Pro technologii FDM se používá široká škála termoplastů. Mezi nejčastěji používané materiály se řadí:

PLA – nejpoužívanější materiál pro 3D tisk; výtisky z něj jsou velmi tvrdé; dobrá volba pro tisk velkých objektů i detailních drobných modelů, a to díky nízké tepelné roztažnosti; teplota trysky pro tisk je 215 °C, teplota podložky 50-60 °C,

PET/PET-G – houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností; je vhodný pro tisk mechanických částí; má malou tepelnou roztažnost, díky čemuž se nekrouťí na podložce, proto se s ním dají tisknout velké modely, které se mohou použít jak v domácím, tak venkovním prostředí; teplota trysky pro tisk je 240 °C, teplota podložky 80-100 °C,

ABS – pevný a všestranný materiál s dobrou tepelnou odolností; vhodný pro vnitřní i venkovní použití; taví se při vysoké teplotě, což vede k dobré tepelné odolnosti; má vysokou teplotní roztažnost, tudíž při chladnutí má tendenci se smršťovat a krouťit na podložce; je rozpustný v acetonu, tudíž je možné výtisky vyhladit acetonovými výpary a získat lesklý povrch; teplota trysky pro tisk je 255 °C, teplota podložky 100-110 °C.

Další často používané materiály používané pro 3D tisk jsou: FLEX, HIPS, PP a NYLON [9].

U FDM tisku je velmi důležité nastavit různé parametry tak, aby vyrobená součást byla co nejpřesnější a její povrch byl co nejhladší. Parametry, které se individuálně nastavují vzhledem k použitému materiálu, tvaru a velikosti výrobku, jsou rychlost tisku, průměr trysky, tloušťka vrstvy, teplota trysky a podložky. Výrobci filamentů uvádí vhodné teplotní rozsahy tisku, které jsou ovšem v rozmezí až 30 °C, což může způsobovat velké problémy při tisku. Na malé a přesné výrobky je lepší použít nižší teplotu trysky a pomalejší rychlost, na velké součásti, u kterých není přesnost až tak důležitá, se volí vyšší teploty a vyšší rychlost tisku. Je tomu proto, aby se daný filament za kratší dobu stihl dostatečně natavit, aby se neucpala tryska a neznehodnotila tak celý tisk. Další velice důležitý bod, kde teplota a rychlost trysky hraje velkou roli, je tisk tzv. mostů. Pokud je teplota trysky příliš vysoká a rychlost tisku příliš nízká, dochází k prověšení vlákna. Takto nanesená vlákna se následně lehce od sebe oddělí a znehodnotí se tak celá součást. V případě, kdy je teplota trysky příliš nízká a rychlost tisku vysoká, se vlákno na začátku mostu nepřichytne, tudíž nevytvoří most a toto přebytečné vlákno se začne hromadit okolo trysky [10].

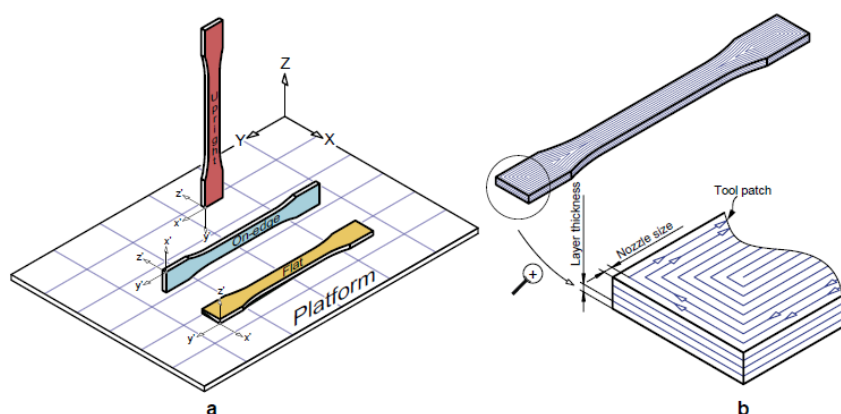


obr. 2-7 Tisk mostů [10]

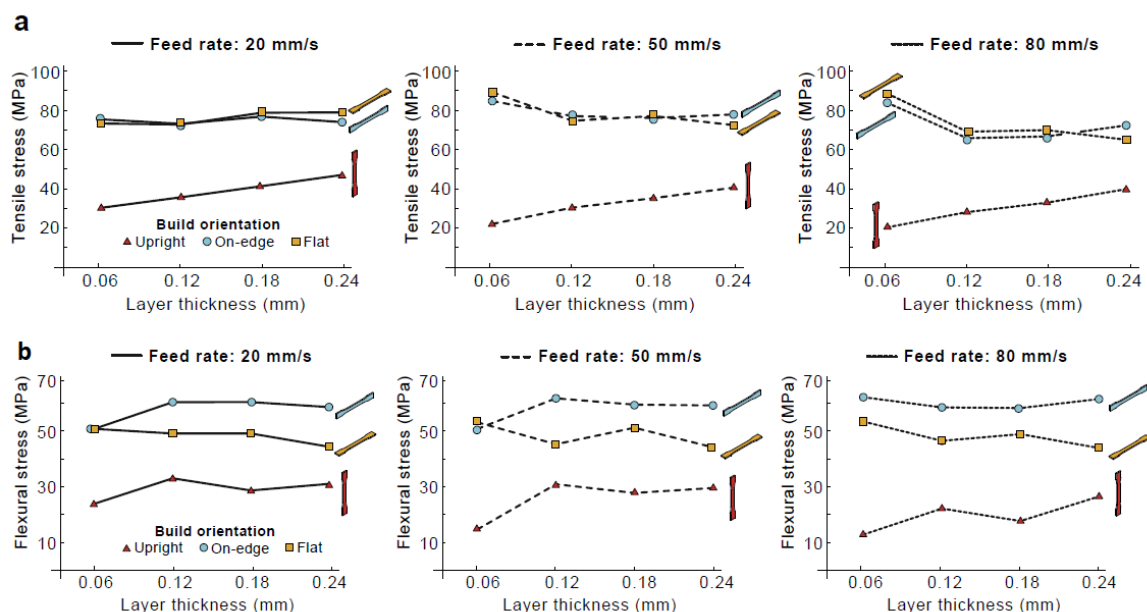
Mnoho studií se zabývalo metodou tisku FDM, optimálním nastavením parametrů pro tisk, aby se dosáhlo co nejlepších mechanických vlastností u výrobců.

Při tisku metodou FDM se vyskytuje jev, kterému se říká schodový efekt. To je způsobeno nanášením jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Vijeth Reddy et al. se ve své studii [6] zabývali kvalitou povrchu u vyrobené součásti a zmírněním tohoto schodového efektu. Zkušební vzorky byly tisknuty pod různým úhlem sklonu od 10° do 90°, s různou tloušťkou vrstvy, a to 0,09 mm, 0,19 mm a 0,29 mm a s různou výplní materiálu. Zjistili, že povrch je hladší, čím větší je úhel sklonu, tudíž při 90° je povrch nejhladší. Dále zjistili, že je povrch hladší, čím tenčí je nanášená vrstva (v jejich případě 0,09 mm). Naopak vnitřní výplň nemá na strukturu povrchu žádný vliv [6].

J.M. Chacón et al. se ve své studii zabývali zlepšením parametrů tisku, aby dosáhli co nejlepších mechanických vlastností u vytištěných součástí. Charakterizovali vliv orientace tisku, který je vyobrazený na obr. 2-8 a, tloušťku vrstvy a rychlost posuvu. Za vzor výplně zvolili obvodový rastr s úhlem 0° , který lze vidět na obr. 2-8 b. Mechanické vlastnosti testovali u zkoušky tahem a třibodovým ohybem. Zjistili, že orientace tisku vzpřímená vykazuje nejhorší vlastnosti, zatímco tisk na hraně a na ploše ukazují nejvyšší pevnost a tuhost. Dále zjistili, že mechanické vlastnosti u dílů tištěných na hraně a na ploše se zhoršují s nárůstem tloušťky vrstvy a s rostoucí rychlostí posuvu, naopak u dílů tištěných vzpřímeně se tažnost zlepšuje s nárůstem tloušťky vrstvy, ale s rostoucí rychlostí posuvu se zhoršuje. Výsledky závislosti mechanických vlastností na tloušťce vrstvy a rychlosti posuvu lze vidět na obr. 2-9 [11].



obr. 2-8 Procesní parametry; a – orientace tisku, b – tloušťka vrstvy a obvodový perimetr [11]



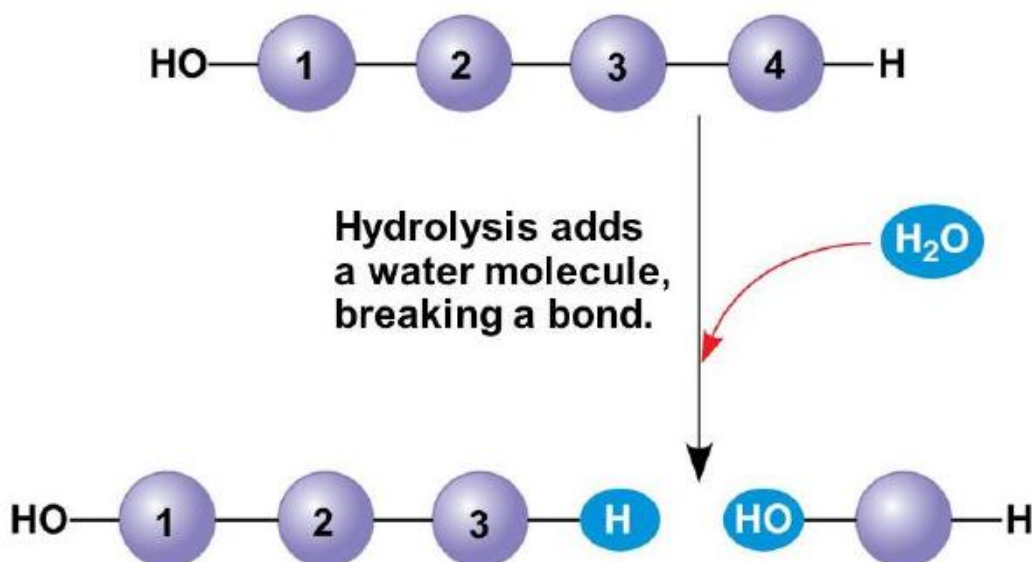
obr. 2-9 Grafické porovnání průměrné maximální pevnosti; a – v tahu, b – v ohybu [11]

2.2 Materiál PET

PET materiál se v dnešní době řadí mezi nejpoužívanější technické polymery. Má mnoho způsobů využití, používá se na výrobu lahví, jako obalový materiál atp. Mezi jeho přednosti patří jeho mechanické vlastnosti, a to například jeho tažnost, rázová pevnost, chemická odolnost a teplotní stabilita [12].

Materiál PET patří mezi tzv. semikrystalické materiály, což znamená, že má amorfni a krystalické oblasti. Čím méně má materiál krystalických oblastí, tím více je poddajný. Test diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) slouží k analýze materiálových vlastností. Vzorky jsou ohřívány a chlazeny, čímž se určují různé vlastnosti. Během testu je zaznamenáván tepelný tok při postupujících teplotách. Z tohoto testu se zjistí teplota T_g , což je teplota skelného přechodu, které PET dosahuje při teplotě 75 °C, T_c neboli teplota studené krystalizace, která u PET nastává při 101 °C a T_m , což je teplota tání, která je u PET rovna 247 °C. Teplota skelného přechodu označuje teplotu, kdy materiál přechází z elastického do křehkého stavu. Teplota studené krystalizace ukazuje, kdy se krystaly v materiálu vyrovnají. Teplota tání je teplota, při které se materiál zcela roztaví [13].

U materiálu PET je velice důležitá rychlost ochlazování. Čím pomaleji se materiál ochlazuje, tím déle se tvoří krystaly, což způsobuje, že je materiál křehčí [14]. PET je velmi hydrofilní materiál, což znamená, že absorbuje vlhkost z okolní atmosféry. Vlivem této absorpce vzniká hydrolyza, což je forma degradace polymeru. Malé množství vlhkosti hydrolyzuje PET ve fázi tání, což způsobuje snížení molekulové hmotnosti, a tudíž zhoršení mechanických vlastností. Při hydrolyze se přeruší kovalentní vazby v polymerních řetězcích, což je vyobrazeno na obr. 2-10 [15].



obr. 2-10 Hydrolyza, přerušení kovalentní vazby u polymeru [15]

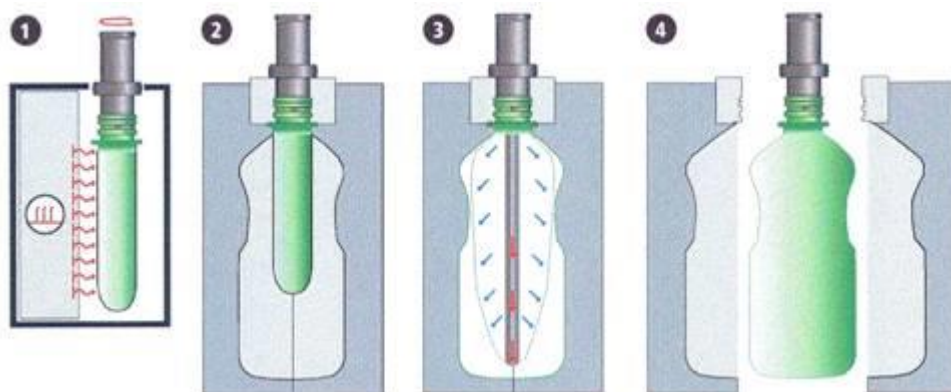
2.2.1 Využití a zpracování PET

PET materiál je používán na výrobu lahví, elektrických a elektronických přístrojů, automobilových výrobků, osvětlení, pomůcek pro domácnost a podobně. PET fólie se používají v potravinářství jako obalový materiál [12].

Vytlačování je proces, kdy se roztavený plast vytlačuje přes profilovací zařízení (vytlačovací hlavu) do prostoru. Kalibrační zařízení ochlazuje vytlačovaný profil tak, aby získal požadovaný stabilní tvar a rozměr. Tento proces se používá na výrobu trubek, profilů, desek, fólií apod [16].

Vstřikování je nejrozšířenější technologie na zpracování plastů. Takto zhotovené výrobky se vyznačují svou velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností. Vstřikování je proces, při kterém je materiál vstříknut do uzavřené dutiny kovové formy, kde ztuhne ve finální výrobek. Výhody vstřikování jsou v tom, že lze vyrábět tvarově složité součásti s dobrou kvalitou povrchu [16].

Vyfukování PET materiálu je ve velké míře využíváno k výrobě lahví. Tento proces začíná vstřikováním PET do studené formy, kde vznikne takzvaný předlisek. V jednostupňovém procesu je předlisek přenesen přímo do jednotky pro foukání vzduchu, následně je natažen a vyfouknut do formy na láhve. Ve dvoustupňovém procesu je předlisek znovu zahřát na teplotu okolo 10 °C nad teplotu skelného přechodu a poté vyfouknut do druhé vyfukovací jednotky [12].



obr. 2-11 Princip vstřikovacího vyfukování s přerušovaným procesem; 1 – ohřev tvarové části předlisku, 2 – přesun do vstřikovací formy, 3 – vyfukování, 4 – chlazení, vyhození [16]

2.2.2 Recyklace PET

Plasty se staly součástí našeho každodenního života, což vede k tomu, že jejich produkce rapidně roste. Na základě toho je likvidace a recyklace plastů největší výzvou dnešní doby, jelikož plastový odpad má veliký dopad na životní prostředí. Ačkoli je recyklace považována za nejlepší způsob opětovného použití odpadních termoplastů, vyžaduje relativně energeticky náročný proces, aby byl vytvořený konečný peletizovaný produkt použitelný v průmyslových procesech [17].

Dva hlavní procesy recyklace jsou recyklace chemické a mechanické. Mechanická recyklace spočívá v odstranění znečištění tříděním a praním, následuje sušení a tavení tzv. po-spotřebitelského PET (POSTC-PET). Velice zásadní je odstranění kontaminantů, které zhoršují fyzikální a chemické vlastnosti POSTC-PET. Těmito kontaminanty je např. voda, kyselina octová a chlorovodíková, fragmenty barevných lahví, voda aj. Třídění znamená separaci PET od ostatních plastů z kontejneru. Tento proces je velice důležitý, protože kontaminace PET jinými materiály způsobuje jeho poškození během recyklace. Po roztřídění se POSTC-PET rozele na vločky, které se následně promyjí v horkém 2% roztoku NaOH a detergentem, následuje propláchnutí studenou vodou. Po vyčištění se POSTC-PET suší. Jelikož PET je velmi hydrofilní materiál, je proces sušení velmi důležitý, jelikož snižuje hydrolytickou degradaci a vede k vyšší pevnosti taveniny recyklovaného PET (R-PET). Takto vyčištěné vločky putují do tzv. granulátoru, kde za zvýšené teploty a tlaku vznikají granule plastů, které jsou následně exportovány a využity pro výrobu nových věcí [12].

Při recyklaci se zhoršují vlastnosti PET, tudíž z recyklovaného materiálu nemohou být vyrobeny výrobky stejné kvality. Recyklovaný PET se jen zřídka používá v potravinářském průmyslu. Zbylý materiál se používá například k výrobě oblečení, nákupních tašek, batohů apod [18].

2.2.3 PET vs. PET-G

PET-G je čistý PET, který je modifikovaný glykolem. Tento modifikátor zabraňuje procesu krystalizace, dělá materiál tvárnějším a způsobuje, že PET začíná být tekutý při nižších teplotách. Teplota tání čistého PET je přibližně 260 °C, zatímco u PET-G je to okolo 230 °C. PET-G má dobrou chemickou odolnost. Má vysokou rázovou houževnatost. PET-G je na rozdíl od samotného PET více odolný vůči absorpci vlhkosti. PET-G je využíváno v mnoha průmyslových aplikacích, a to při 3D tisku, v lékařství, na balení potravin, jako ochranné kryty pro elektronická zařízení, na grafické displeje apod [19],[20].

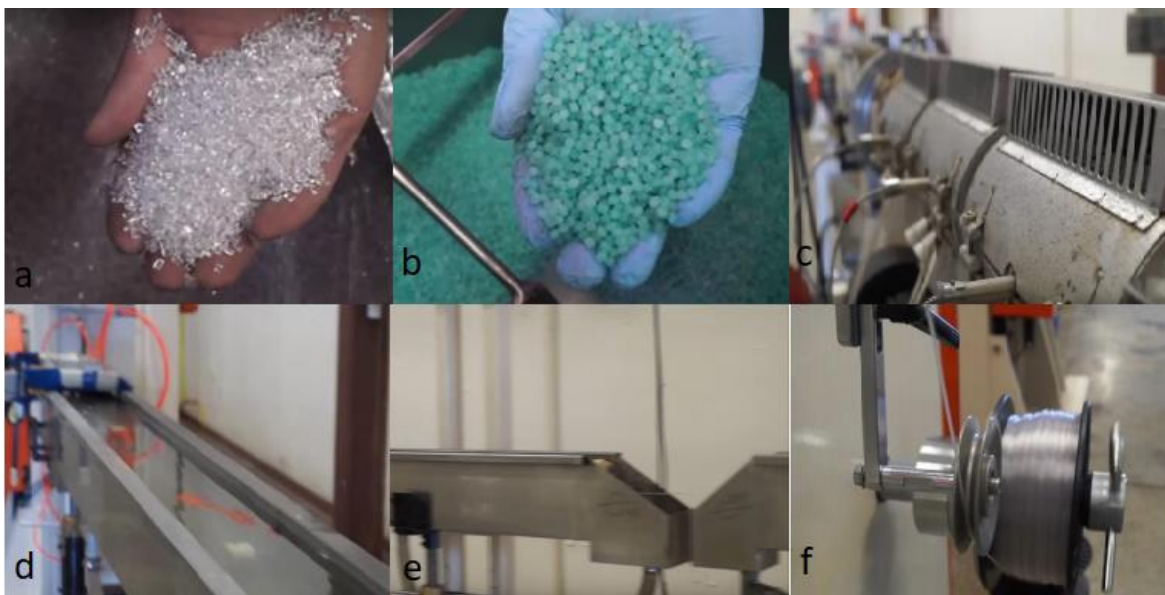
Ve 3D tisku se čistý PET běžně nepoužívá. Namísto toho je PET-G čím dál více populárním materiálem pro tisk. Velké výhody jsou především v již zmíněných vlastnostech, jako je nižší teplota tání, vysoká houževnatost aj. Velkou nevýhodou při 3D tisku je fakt, že PET-G absorbuje vlhkost. Při tavení materiálu se voda odpařuje a přetrhává polymerní řetězce, což způsobuje jeho křehnutí. Proto je potřeba jej buď udržovat ve vakuu, nebo jej před aplikací řádně vysušit v troubě při 60 °C po dobu 1-2 hodiny [20].

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota PET	Hodnota PETG
Hustota	g/cm ³	1,38	1,27
Absorpce vlhkosti na vzduchu při 23 °C/50 % RH	%	0,25	-
Absorpce vlhkosti ve vodě při 23 °C	%	0,5	0,2
Mez kluzu	MPa	85	53
Deformace při přetržení	%	15	40
Modul pružnosti v tahu	MPa	3000	2200

tab. 2-1 Tabulka se základními vlastnostmi materiálů PET a PET-G [21],[22]

2.3 Extruze

Extruze je proces výroby filamentu nebo plastového vlákna. Bezbarvé plastové granule (PLA, ABS, PET apod.) se smíchají s granulemi pigmentu požadované barvy, popřípadě s aditivou pro zlepšení vlastností filamentu. Po zbarvení granulí se suší po dobu dvou hodin. Pro samotnou extruzi se používá extruder s jedním šnekem. Šnek je rozdělený na několik teplotních zón, které mohou být regulovány nezávisle na sobě. Každá oblast musí mít přesnou teplotu, které musí mít správnou posloupnost. Granule jsou ve šneku roztaveny a následně vytlačeny z extruderu do horké vodní lázně, která zajistí perfektní kulatost filamentu. V případě, že je špatně nastavená teplota horké lázně, filament nemá ideálně kruhový průřez. Následuje studená lázeň, která je dlouhá 6-9 metrů. Po studené lázni se filament navíjí na cívku. Rozdílný průřez filamentu je zajištěn různou rychlostí navíjení. Čím rychleji se filament navíjí, tím tenčí je jeho průměr. Pro konstantní průměr musí být rychlost šneku a rychlost navíjení dokonale sesynchronizována. Rozměry filamentu se kontrolují pomocí laseru, tudíž pokud se na něm projeví velký výkyv průměrů, je celý proces zastaven a upravují se veškeré parametry [23].



obr. 2-12 Extruze filamentu; a – čistý granulát, b – přidání barviva, c – vytlačovací lis, d – lázeň s horkou vodou, e – lázeň se studenou vodou, f – navíjení na cívku [23]

2.3.1 Extruze recyklovaného PET

Jednou z myšlenek, jak využít recyklovatelné plasty, je výroba filamentů pro 3D tisk. Existuje několik firem, které takto vyrobený filament již distribuují, a to např. Refil® a B-PET®, které prodávají filament vyrobený z recyklovaného PET [24].

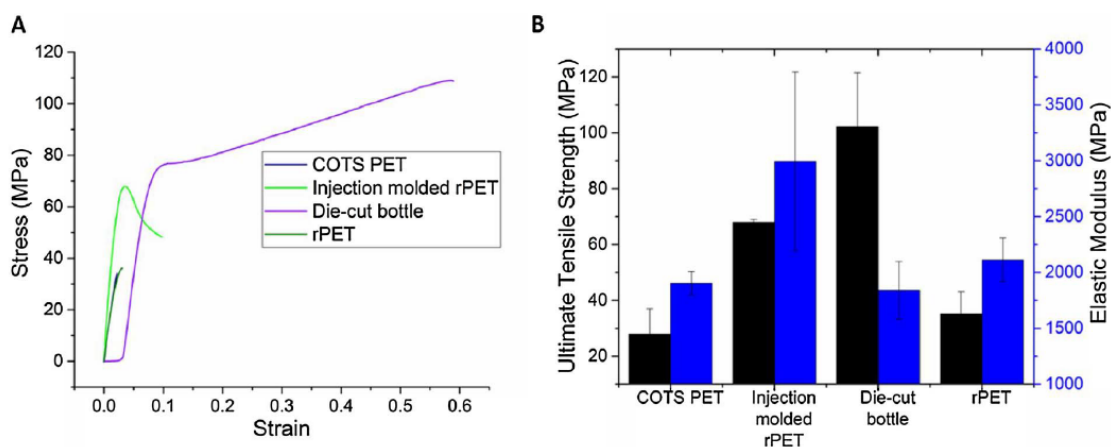
Článek [15] od firmy 3devo, výrobce a prodejce extruderů, pojednává o extruzi filamentu, určeného pro 3D tisk, z PET lahví. Před samotnou extruzí musí být nejprve PET lahve očištěny od etiket a víček, jelikož nejsou vyrobeny z PET materiálu. Následně se lahve očistí horkou vodou s chemickým čisticím a nařežou na malé kousky. Jelikož je materiál PET velice hydrofilní, je potřeba jej vysušit. Optimální teplota je 160 °C a doba vysoušení 4-5 hodin. Nyní je materiál připravený k samotné extruzi.

Autoři testovali nastavení parametrů na extruderu, aby výsledný filament měl co nejlepší vlastnosti. Provedli několik testů, které byly neuspokojivé. Filament byl zkroucený, což bylo způsobeno příliš velkou teplotou u tzv. heateru 1. Dále měl filament drsný povrch a neměl konstantní průměr. Po několika úpravách nastavili parametry, viz obr. 2-13, díky kterým dosáhli dobrého výsledku. Materiál měl konstantní průřez a hladký povrch [15].

Final settings (1.75 mm)	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
Set temperature heaters [°C]	245	240	245	240
Extruder rpm	5			
Filament fan speed	80%			

obr. 2-13 Výsledné parametry extruze PET [15]

Nicole E. Zander et al. se ve své práci zabývají výrobou filamentu pro 3D tisk z 100% recyklovaného PET, který nebyl nijak chemicky modifikován. Porovnávali komerční PET pelety (COTS PET) s vlastními recyklovanými PET peletami, které vyrobili z PET lahví tak, že z nich odstranili etikety a víčka, umyli je, nařezali a spolu s komerčním recyklátem vysušili. Extruzi prováděli na dvoušnekovém extruderu, který se při extruzi PET doporučuje. Extruder měl rychlost 100 ot/min a měl 4 teplotní zóny, na vstupu měla 200 °C, sousední zóna 240 °C, další 260 °C a zóna u šneka měla 240 °C. Následně vyextrudované vlákno mělo průměr 2,5-3 mm, což je rozsah naprosto nepřijatelný při 3D tisku. Takto velký rozsah byl způsoben špatnou distribucí vloček ve šneku. Proto tento filament napeletizovali a vyextrudovali znovu. Z tohoto vlákna tiskli zkušební vzorky pro tahovou zkoušku. Parametry tisku byly: teplota podložky 30 °C, teplota trysky 270 °C, výška vrstvy 0,2 mm a výplň 100 %. Při tahové zkoušce porovnávali zkušební tělesa vyrobená 3D tiskem z COTS PET, z vlastního vyrobeného recyklovaného PET (rPET), zkušební tělesa vyrobená vstřikováním rPET a vyříznutý kousek PET lahve. Výsledky tahové zkoušky jsou na obr. 2-14 [24].



obr. 2-14 Výsledky tahové zkoušky recyklovaného a komerčního PET materiálu; A – graf závislosti napětí/deformace, B – konečná pevnost v tahu a modul pružnosti (rPET), (COTS PET) a kousek PET lahve [24]

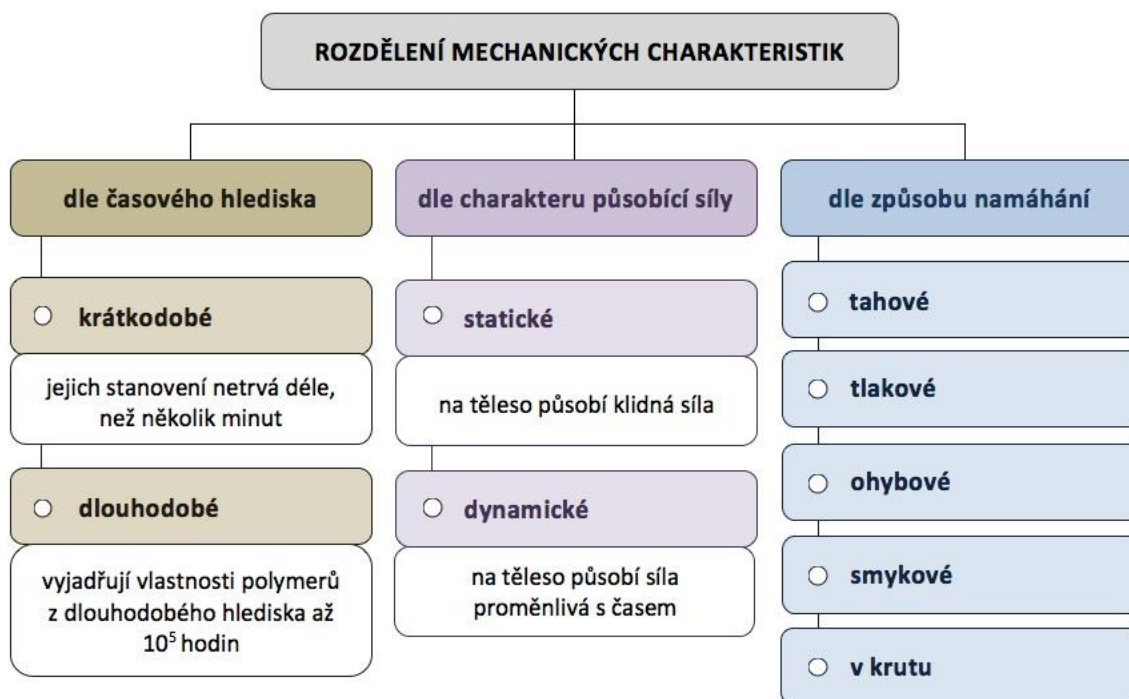
Autoři zjistili, že pokud je recyklovaný PET řádně vyčištěn a vysušen, pak je vhodným materiálem pro 3D tisk. Správné vysušení granulátu je velmi důležité k udržení konstantního průměru a dobré viskozity materiálu. Špatné vysušení vede k vytváření bublin uvnitř filamentu, což vede ke ztrátě mechanických vlastností. Tištěné vzorky sice dosáhly asi jen poloviny pevnosti v tahu oproti vzorkům vyrobeným vstřikováním, recyklovaný PET však dosáhl ekvivalentních hodnot pevnosti v tahu jako COTS PET. Dále zjistili, že se snižují mechanické vlastnosti materiálu po recyklaci. To je způsobeno dalším tepelným zpracováním, snížením molekulové hmotnosti v průběhu tání a přetržením kovalentních vazeb vlivem absorpce vlhkosti. Kousek uříznuté PET lahve měl výrazně vyšší pevnost v tahu ve srovnání se vstřikovaným recyklovaným PET [24].

2.4 Testování mechanických vlastností materiálů a vzorků

2.4.1 Obecné principy

Mechanické vlastnosti materiálů (polymerů) jsou čtyři – pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost, kdežto mechanických charakteristik, které poskytují důležité informace pro použití těchto materiálů, je daleko víc, viz. obr. 2-15. Tyto charakteristiky jsou určeny experimentálně na normalizovaných zkušebních tělesech zhotovených z polymerů vstříkáním, lisováním, odléváním, popř. na tělesech obrobených z polotovarů [25]. Nejčastěji prováděné zkoušky u polymerů na mechanické vlastnosti jsou:

- Stanovení tahových vlastností podle normy ČSN EN ISO 527
- Stanovení ohybových vlastností podle normy ČSN EN ISO 178
- Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod podle normy ČSN EN ISO 180.



obr. 2-15 Rozdělení mechanických charakteristik [25]

Při namáhání těles působením vnější síly dochází k jejich deformaci. Pokud se těleso po odtížení vrátí zpět do původního tvaru, jde o deformaci pružnou neboli elastickou. V případě, že se těleso do původního stavu již nevrátí, pak jde o deformaci plastickou. U polymerů se při vnějším namáhání objevuje deformace pružná i plastická, a navíc ještě deformace viskoelastická (zpožděně elastická). U zkoušek houževnatých polymerů za standardní teploty lze pozorovat rostoucí deformaci, zatímco rychlost deformace s časem klesá. Této vlastnosti se odborně říká kríp. Na základě této zkoušky lze konstatovat, že celková deformace polymerů je časově závislá, což znamená, že při krátkodobém zatížení se polymer chová jako pevný materiál, zatímco při dlouhodobém zatížení je materiál tvárný a plastický [25].

2.4.2 Obecné principy tahové zkoušky ČSN EN ISO 527-1

Podstata zkoušení spočívá v tom, že zkušební těleso je konstantní rychlostí taženo ve směru své podélné osy do okamžiku, kdy dojde k jeho porušení nebo do chvíle, kdy napětí nebo deformace dosáhnou předem zvolených hodnot.

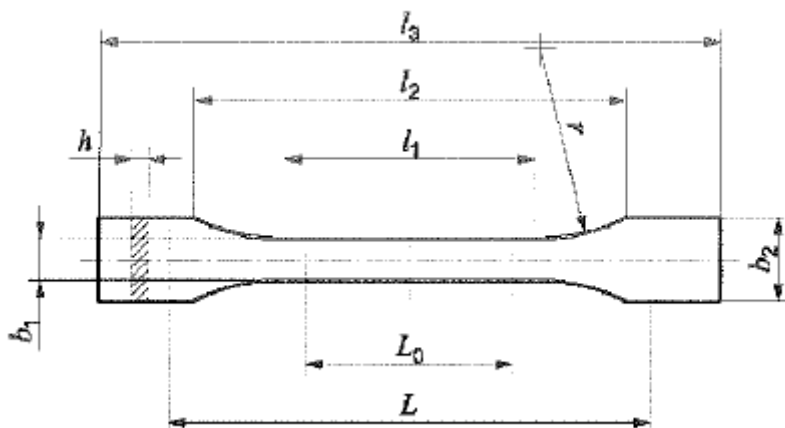
Upínací čelisti zkušebního stroje musí být připevněny tak, aby podélná osa zkušební tělesa náležela směru protahování a zároveň procházela osou sestavy čelisti. Zkušební těleso musí být upnuto v čelistech tak, aby nenastalo jeho vyklouznutí. Avšak toto upevnění nesmí zapříčinit předčasnou deformaci zkušební tělesa v místě upnutí čelistmi. Pro stanovení modulu pružnosti je nutné, aby zkušební rychlost byla po celou dobu konstantní.

Kontaktní průtahoměr se používá jako indikátor poměrného prodloužení. Musí být schopen určit změnu délky oproti měřené počáteční délce zkušební tělesa, a to v jakémkoli okamžiku zkoušení. Aby bylo možné přesně stanovit modul pružnosti tahu E_t , musí být přístroj schopný měřit změnu délky s přesností na 1 %.

Optický průtahoměr zaznamenává poměrné prodloužení na jednom povrchu zkušební tělesa, což zajistí, aby poměrné prodloužení nebylo zkresleno ohybem, který může nastat vlivem malého vychýlení zkušební tělesa z osy.

Frekvence sběru dat musí být dostatečně vysoká, aby odpovídala požadované přesnosti. Zkušební rychlost musí být zvolena podle normy pro daný materiál. Pro stanovení modulu pružnosti a vlastností za mezí kluzu je vhodné použít různé rychlosti. Z tahové zkoušky se získají hodnoty napětí, poměrné prodloužení, modul pružnosti, který je určený jako sečna křivky napětí/poměrné prodloužení a Poissonův poměr.

Za normálních podmínek se používají zkušební tělesa typu 1A a 1B. Typ 1A se používá pro vstříkovaná víceúčelová a lisovaná zkušební tělesa. Typ 1B se používá pro mechanicky obráběná zkušební tělesa. Pro změření modulu pružnosti musí být zkušební rychlost 1 mm/min. Pokud není možné použít zkušební tělesa 1A nebo 1B, mohou se použít zkušební tělesa typu 1BA, 1BB, 5A nebo 5B. Z důvodu úspory materiálu budou tahové zkoušky realizovány se zkušebními tělesy 1BA [26].



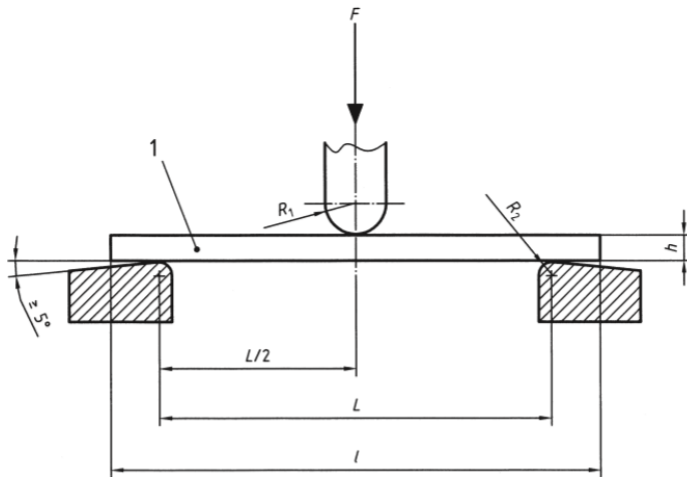
obr. 2-16 Zkušební těleso typu 1BA [26]

	Typ zkušebního tělesa	1BA
l_3	Celková délka	≥ 75
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \pm 0,5$
r	Poloměr	≥ 30
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2
b_2	Šířka konců	$10,0 \pm 0,5$
b_1	Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$
h	Tloušťka	≥ 2
L_0	Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_2 - 2 \cdot b_2$

obr. 2-17 Rozměry zkušebního tělesa 1BA [26]

2.4.3 Stanovení ohybových vlastností ČSN EN ISO 178

Podstata zkoušky spočívá v tom, že zkušební těleso obdélníkového průřezu na dvou podpěrách je konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se zkušební těleso nezlomí na svém vnějším povrchu nebo dokud deformace nedosáhne maximální hodnoty 5 %. V průběhu tohoto postupu je měřena síla působící na zkušební těleso a výsledný průhyb zkušebního tělesa uprostřed mezi podpěrami. Poloměr trnu $R_1 = 5,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ a poloměr podpěr $R_2 = 5,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ pro tloušťky zkušebního tělesa $> 3 \text{ mm}$ [27].



obr. 2-18 Poloha zkušebního tělesa na začátku zkoušky; 1 – zkušební těleso, F – použitá síla, R_1 – poloměr zatěžovacího trnu, R_2 – poloměr podpěr, h – tloušťka zkušebního tělesa, l – délka zkušebního tělesa, L – rozpětí mezi podpěrami [27]

Rozměry přednostního zkušebního tělesa, v milimetrech, jsou:

délka, l : 80 ± 2

šířka, b : $10,0 \pm 0,2$

tloušťka, h : $4,0 \pm 0,2$.

Počet zkušebních těles při zkoušce je minimálně 5. Zkušební těleso se umístí symetricky na obě podpěry kolmo k zatěžovacímu trnu a podpěrám a aplikuje se počáteční zatížení, které je 1 mm/min. Po dosažení počátečního zatížení se systém pro měření průhybu vynuluje. Zkouška se započne 1 minutu po dosažení počátečního zatížení. Během zkoušky se zaznamenává velikost síly a odpovídajícího průhybu zkušebního tělesa za použité stejné rychlosti, jaká byla použita pro měření modulu pružnosti. Ze zkoušky se získají hodnoty napětí v ohybu a modulu pružnosti v ohybu [27].

2.4.4 Stanovení rázové houževnatosti ČSN EN ISO 180

Podstata zkoušky spočívá v upnutí zkušebního tělesa a jeho přeražení úderem rázového kyvadla, přičemž příčka rázu prochází v dané vzdálenosti od místa upevnění zkušebního tělesa a v případě tělesa opatřeného vrubem v dané vzdálenosti od osy vrubu.

Zkušební tělesa se připravují podle patřičných norem. Jsou buď lisována nebo vstříkována, popřípadě zhotovena mechanickým obráběním z desek vyrobených lisováním nebo vstříkáváním. Pokud je možné, musí být použita zkušební tělesa opatřená vrubem A. Obrobená plocha zkušebních těles bez vrubu nesmí být během zkoušky namáhána tahovým napětím.

Doporučovaná tloušťka h zkušebního tělesa je 4 mm. Pokud je těleso odebráno z hotového dílu, může se jeho tloušťka ponechat, a to až do rozměru 10,2 mm. Za normálních podmínek se testuje 10 vzorků.

Zkouška se provádí ve standardním prostředí. Změří se tloušťka h a šířka b , případně i šířka pod vrubem b_N u všech zkušebních těles. Rázové kyvadlo se zvedne do požadované výšky a zajistí se proti pohybu. Těleso je upnuto tak, aby kyvadlo při dopadu narazilo na stěnu, na které se nachází vrub. Po spuštění kyvadla se zaznamená rázová energie absorbovaná zkušebním tělesem a odečtou se ztráty vlivem tření. Ze zkoušky se získají hodnoty rázové houževnatosti.

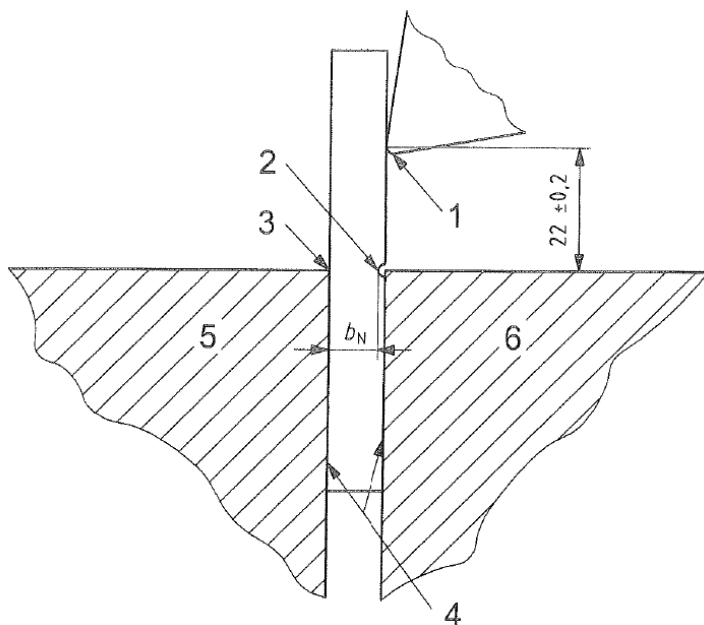
Mohou nastat 4 typy přeražení:

C – úplné přeražení, kdy je těleso rozděleno na dva a více kusů,

H – kloubové přeražení, neúplné přeražení, kdy obě části zkušebního tělesa drží pohromadě tenkou obvodovou vrstvou,

P – částečné přeražení, neúplné přeražení, které nesplňuje podmínky kloubového přeražení

N – nepřeraženo, případ, kdy nedojde k přeražení, nýbrž pouze k ohnutí zkušebního tělesa a k jeho protlačení mezi podpěrami [28].



obr. 2-19 Upínací přípravky, zkušební těleso s vrubem a břít kyvadla při úderu; 1 – břít kyvadla, 2 – vrub, 3 – hrana upínacího přípravku, kolem které se těleso ohýbá, 4 – pevná část upínacího přípravku, 5 – pohyblivá část upínacího přípravku, b_N – šířka pod vrubem [28]

Označení metody ^{a,b}	Zkušební tělesa	Typ vrubu ^a	Pořadí kořene vrubu, r_N	Šířka pod vrubem, b_N
ISO 180/U	Délka $l = 80 \pm 2$	Bez vrubu	-	-
ISO 180/A	Šířka $b = 10,0 \pm 0,2$	A	$0,25 \pm 0,05$	$8,0 \pm 0,2$
ISO 180/B	Tloušťka $h = 4,0 \pm 0,2$	B	$1,00 \pm 0,05$	

obr. 2-20 Označení metod, typy zkušebních těles, typy a rozměry vrubů [28]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Na pracovišti Ústavu konstruování se nachází extruder od firmy 3devo. Tento extruder by mohl sloužit jako nástroj pro výrobu filamentů z různých plastových granulátů. Tím se otevírá cesta pro výrobu filamentů z recyklovaných plastů, jako jsou například recyklované PET lahve.

U výroby filamentu z recyklovaných PET lahví pomocí extruderu 3devo NEXT se pravděpodobně vyskytnou podobné problémy, jaké jsou popsány v článku [15] od firmy 3devo. Autoři článku vyráběli filament z recyklovaných PET lahví. Při jejich extruzi docházelo ke kroucení filamentu, což bylo způsobeno příliš vysokou teplotou materiálu. Naopak při nízké teplotě materiál tuhl v trysce.

Nicole E. Zander et al. se ve své studii [24] zabývali výrobou filamentu ze 100% recyklovaného PET materiálu a následně testovali mechanické vlastnosti. Zjistili, že pro výrobu filamentu s konstantním průměrem je důležité materiál řádně vysušit. Vzhledem ke špatné distribuci vloček ve šneku extruderu nebyl průměr filamentu konstantní, proto bylo potřeba jej napeletizovat a vyextrudovat znovu, což ale zhoršilo mechanické vlastnosti, jelikož materiál prošel další tepelnou úpravou. Z tahové zkoušky vyšlo, že kousek PET lahve má daleko větší pevnost v tahu než filament z recyklátu.

Z výše uvedených článků vyplývá, že vločky nadrcených PET lahví oproti peletám hůře procházejí extruderem, což způsobuje nekonzantní průměr. Ovšem z důvodu, že dvojitá extruze by znamenala další zhoršení mechanických vlastností, bude realizována pouze extruze z vloček recyklovaných PET lahví. Pro výrobu filamentu z recyklovaných PET lahví bude možné jako výchozí parametry použít ty, které udává autor článku [15]. Je možné, že bude potřeba tyto parametry pozměnit, jelikož se mohou lišit vlastnosti použitých materiálů.

Autoři v článku [15] uvádějí pouze výrobu filamentu z recyklovaných PET lahví, ovšem neuvádějí žádné mechanické vlastnosti tohoto filamentu. Z toho důvodu se tato práce bude zabývat stanovením mechanických vlastností filamentu vyrobeného z recyklovaných PET lahví a následným porovnáním s filamentem vyrobeným z běžně dostupných PET a PET-G granulátů. Aby bylo porovnání mechanických vlastností recyklovaného a nereklovaného filamentu relevantní, budou všechny porovnávané filameny vyrobené pomocí extruderu 3devo NEXT.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem této práce je experimentálně ověřit možnosti výroby filamentu pro 3D tisk z recyklovaného PET materiálu a porovnat jeho vlastnosti s běžným PET filamentem a tím určit jeho vhodnost použití pro tuto aplikaci.

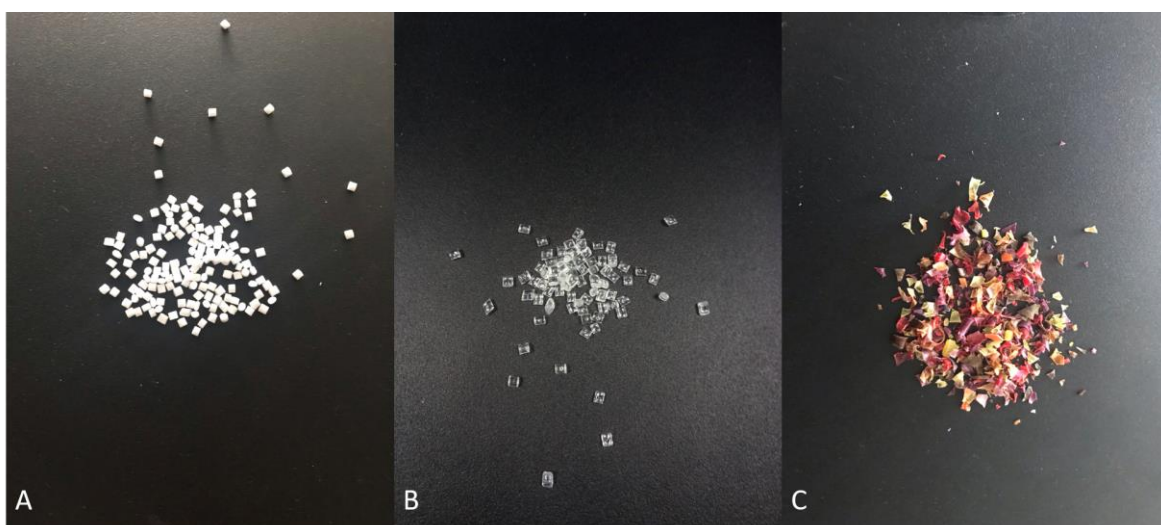
Dílčí cíle této práce jsou:

- zajistit vhodný běžný a recyklovaný PET materiál
- stanovit parametry a realizovat výrobu filamentů z obou materiálů
- stanovit způsob a parametry experimentálního porovnání obou filamentů
- realizovat experimenty
- vyhodnotit výsledky a stanovit závěry

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Příprava materiálů pro extruzi

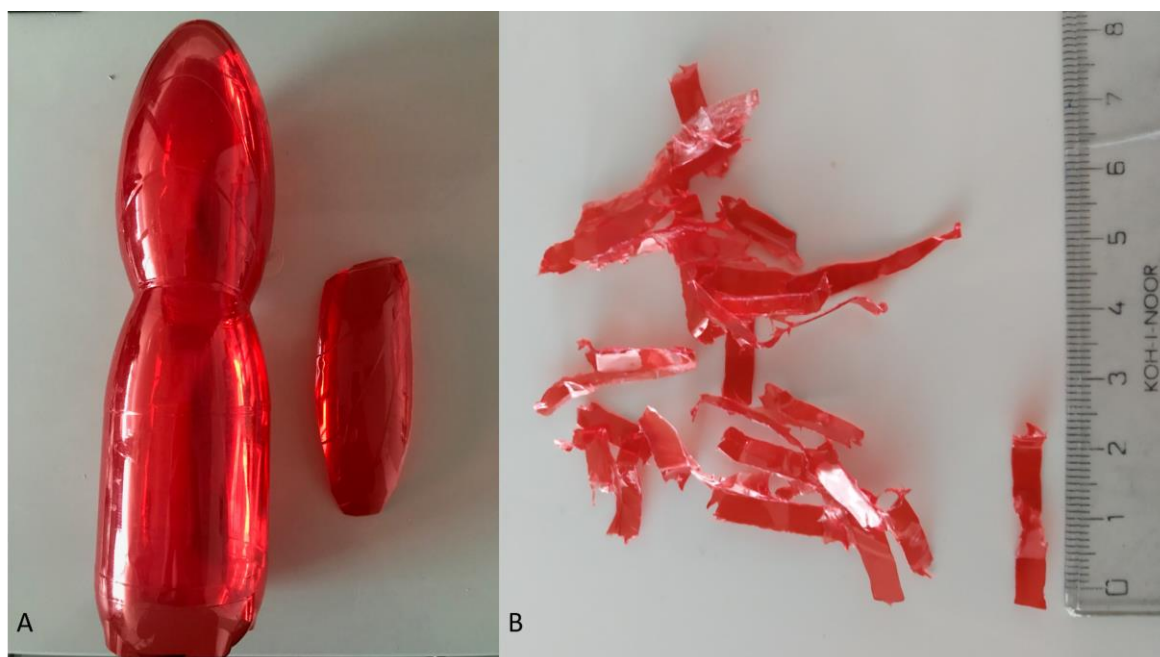
Pro výrobu filamentů z komerčního a recyklovaného PET bylo potřeba zajistit od každého z nich dostatečné množství granulátu. Granuláty materiálů PET a PET-G byly poskytnuty firmou Plasty Mladeč. Dále byly zajištěny nadrcené PET lahve ve formě vloček (PET odpad). Tyto vločky ovšem neobsahovaly pouze čistý PET materiál, ale také HDPE, ze kterého jsou vyrobena víčka a PVC, ze kterého jsou vyrobeny etikety. Pro alespoň nějaké odstranění nadrcených etiket se tyto vločky ponořily do vody. Většina etiket zůstala plavat na hladině, proto mohly být odstraněny.



obr. 4-1 Granuláty připravené k extruzi; A – granulát PET, B – granulát PET-G, C – vločky PET odpadu

Později bylo zjištěno, že tyto vločky s příměsí dalších materiálů byly nevyhovující, a proto se musely zajistit čisté PET lahve. Nadrcené PET lahve bez příměsí nejsou běžně k dostání, proto musely být nashromážděny postupně nekomerční cestou. Pro zajištění naprosté čistoty byly z PET lahví odřezány etikety, dále jejich vrchní a spodní části. Poté byly řádně vmyty pomocí teplé vody a saponátu. Čisté PET lahve byly nařezány na menší pruhy, které se následně nastříhaly na malé pásky pomocí skartovacího stroje. Tyto pásky ovšem byly příliš velké, jejich délka se pohybovala někde okolo 20 mm. Proto bylo potřeba tyto pásky ještě více nadrtit. Tento pokus proběhl na stroji Retsch SM 2000. Toto drcení však bylo nezdárné, jelikož tyto ohebné pásky se pod tlakem nožů ohnuly a propadávaly děrovaným plechem ve stejné velikosti. Vzhledem k tomu, že nebylo možné zajistit jiný způsob nadrcení, proběhla následná extruze s takto velkými kousky materiálu.

Jak již bylo zmíněno, PET je velmi hydrofilní materiál, proto se všechny zmíněné granuláty musely před extruzemi důkladně vysušit. Doba sušení byla 5 hodin při teplotě 160 °C, stejně jako v článku [15]. Z původní váhy nevysušených čistých PET lahví 696 g zbylo 654,6 g, z čehož je patrné, že rozdíl těchto dvou hmotností je hmotnost odpařené vody.



obr. 4-2 Úprava PET lahví; A – očištěná a uříznutá PET lahev, B – nastříhané pásky

4.2 Extruze filamentů

Po důkladném vysušení všech granulátů mohla započít samotná extruze. Všechny extruze byly prováděny na extruderu 3devo NEXT. Informace o průběhu všech extruzí byly zaznamenávány pomocí sériového monitoru Arduino do počítače. Extruze na tomto přístroji se od průmyslové extruze liší tím, že chlazení zde neprobíhá pomocí vodní lázně, ale pomocí dvou ventilátorů, jejichž intenzita je nastavitelná. Jak již bylo řečeno, u PET je velmi důležitá rychlost ochlazování. Čím rychleji se zchladí, tím více je tvárný. Průměr filamentu je, stejně jako v průmyslové extruzi, i zde korigován tahacími kolečky, jejichž rychlost se v těchto experimentech řídila automaticky. Požadovaný průměr výsledného filamentu byl 1,75 mm. Inspirací pro nastavení parametrů byl článek [15]. Z důvodu rozdílných materiálů byly jednotlivé parametry podle potřeby lehce pozměněny.

Parametry extruze	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
Nastavení teplotních zón	248 °C	240 °C	245 °C	240 °C
Počet otáček šneku/min	5			
Rychlost ventilátorů	80 %			

tab. 4-1 Parametry extruze PET odpadu

Parametry extruze	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
Nastavení teplotních zón	250 °C	240 °C	245 °C	240 °C
Počet otáček šneku/min	4,7			
Rychlost ventilátorů	80 %			

tab. 4-2 Parametry extruze čistého PET

Parametry extruze	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
Nastavení teplotních zón	247 °C	240 °C	243 °C	240 °C
Počet otáček šneku/min	4,3			
Rychlost ventilátorů	80 %			

tab. 4-3 Parametry extruze komerčního granulátu PET

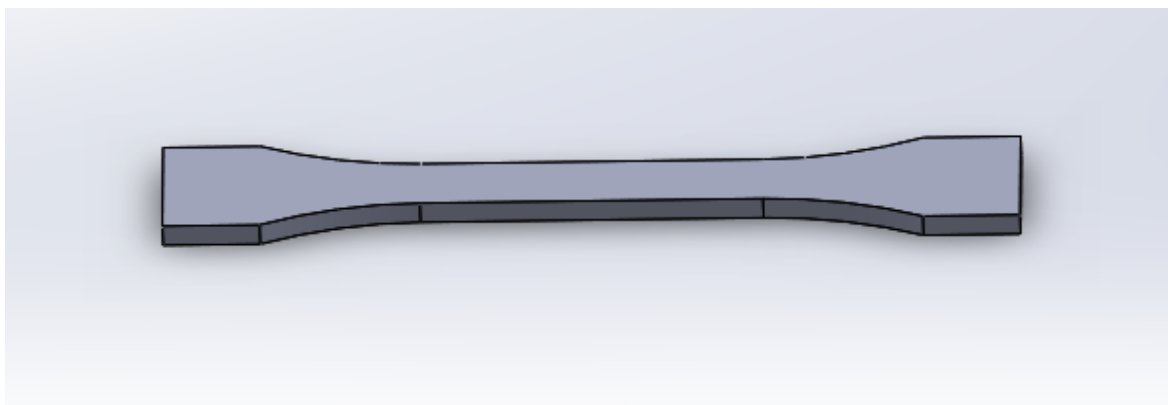
Parametry extruze	Heater 1	Heater 2	Heater 3	Heater 4
Nastavení teplotních zón	235 °C	230 °C	235 °C	230 °C
Počet otáček šneku/min	5			
Rychlost ventilátorů	80 %			

tab. 4-4 Parametry extruze komerčního granulátu PET-G

4.3 Příprava a výroba zkušebních těles

4.3.1 Příprava zkušebních těles

Nejprůkaznější ze zkoušek mechanických charakteristik je tahová zkouška. Z důvodů špatné extruze a tisku nebyly další dvě zkoušky (rázová houževnatost a ohyb) realizovány. Zkušební tělesa byla vymodelována podle parametrů zkušebního tělesa 1BA, a to z důvodu úspory materiálu, z normy ČSN EN ISO 527. Samotné modelování bylo provedeno v programu Solidworks 2018. Model byl převeden do souboru STL a následně připraven G-kód v programu Slic3r Prusa Edition. Nastavení tisku bylo zvoleno z přednastavených hodnot od výrobce. Nastavení nese název 0.20mm NORMAL. Parametry filamentu byly zvoleny také od výrobce, konkrétně Prusament PETG. Tím byly nastaveny všechny parametry potřebné pro tisk. Manuálně přenastavené parametry pro všechny druhy filamentů jsou vyobrazeny v tab. 4-5. Pro každý použitý filament byly pozměněny pouze teploty trysky a podložky, viz tab. 4-6.



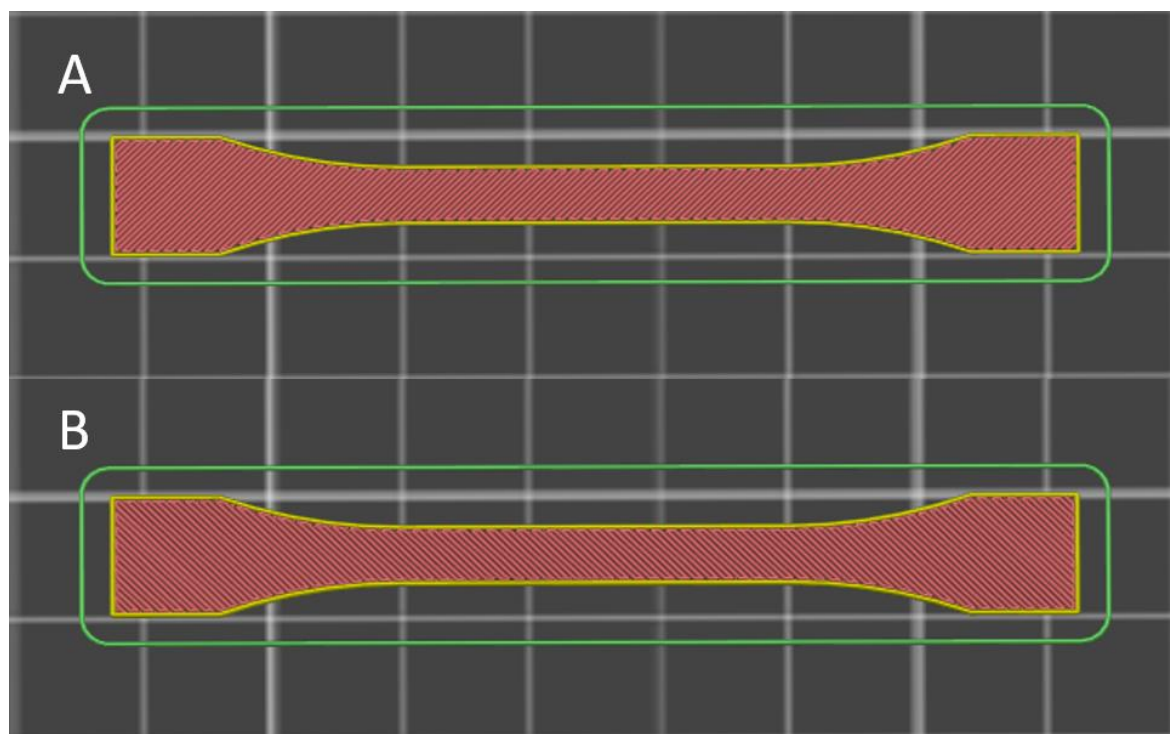
obr. 4-3 Model zkušebního tělesa

Výška vrstvy	Perimetry	Hustota výplně	Vzor výplně	Úhel výplně
0,2 mm	1	100 %	Rectilinear	45°

tab. 4-5 Parametry tisku pro všechny filamenty

	PET lahve	Granulát PET	Granulát PET-G
Teplota trysky	255 °C	255 °C	245 °C
Teplota podložky	80 °C	80 °C	90 °C

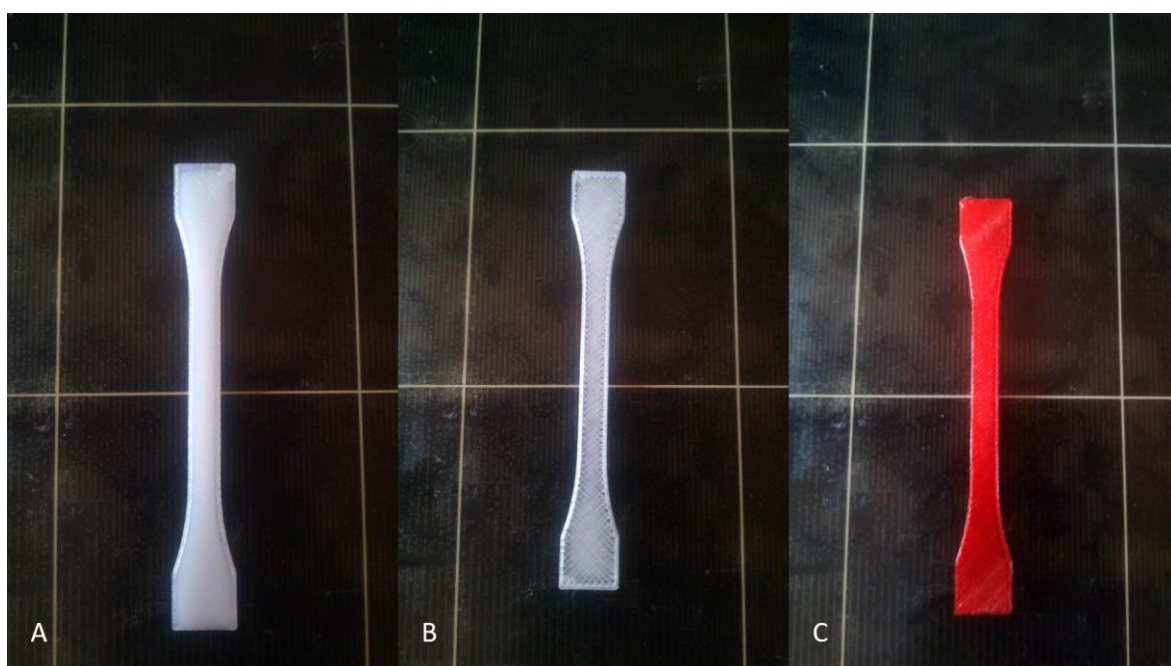
tab. 4-6 Parametry tisku pro jednotlivé filamenty



obr. 4-4 Postup tisku zkušebního tělesa; A – každá lichá vrstva, B – každá sudá vrstva; zelená – obrys, žlutá – vnější perimetr, růžová – plná výplň

4.3.2 Výroba zkušebních těles

Po vyhotovení modelu v programu Slic3r Prusa Edition byl vyexportován G-kód na SD kartu, která byla vložena do tiskárny. Před započítím samotného tisku byly všechny filamenty vysoušeny po dobu 90 minut při teplotě 60 °C, aby se eliminovala vlhkost filamentu a předešlo se tak případným problémům vypařování této vlhkosti během tisku. Tisk zkušebních těles proběhl na tiskárně Original Prusa i3 MK2S. Vytisknutí jednoho zkušebního tělesa trvalo 8 minut. Spotřeba filamentu na jedno těleso byla 0,52 m. Tisk proběhl ze tří vyextrudovaných filamentů, konkrétně z filamentu vyextrudovaného z komerčně dodaného PET granulátu od firmy Plasty Mladeč, z filamentu vyextrudovaného z komerčně poskytnutého PET-G granulátu od firmy Plasty Mladeč a z filamentu vyrobeného z recyklovaných PET lahví.



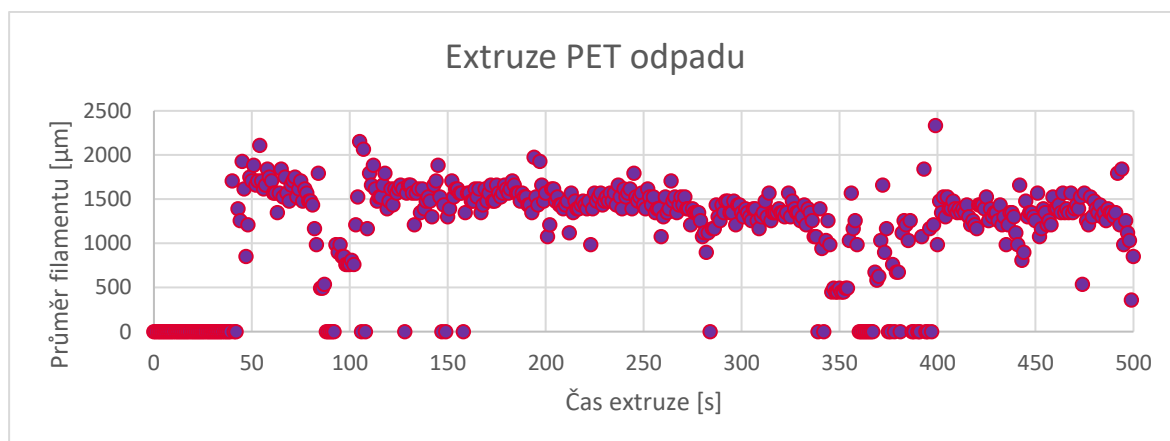
obr. 4-5 Vytisknuté zkušební vzorky; A – z granulátu PET, B – z granulátu PET-G, C – z čistých PET pásků

5 VÝSLEDKY

5.1 Výsledky extruzí

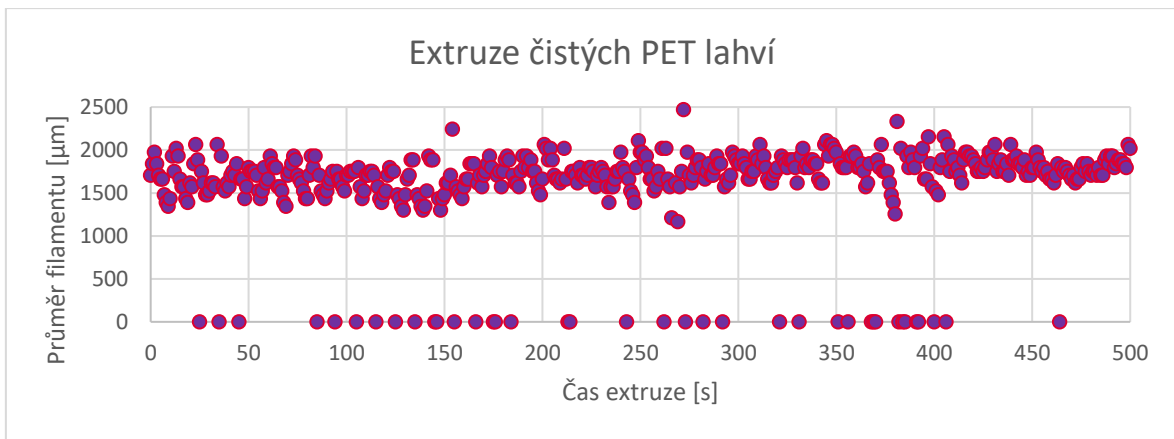
Extruze filamentů proběhla z nadrcených PET lahví spolu s víčky a etiketami, dále z čistých pásků PET lahví bez příměsí a z komerčně poskytnutých granulátů PET a PET-G. Požadovaný průměr filamentu byl 1,75 mm. Všechny extruze byly zaznamenávány pomocí sériového monitoru Arduino a následně převedeny do excelové tabulky. Z této tabulky byly ze všech extruzí vygenerovány grafy, které představují závislost průměru filamentu na čase.

Extruze PET odpadu nebyla úspěšná. Po většinu času extruze se žádný filament netvořil, nýbrž se roztavený materiál shromažďoval ve formě bublin přímo u trysky. Tyto situace představují nulové hodnoty průměru v grafu. Pokud nenastal problém s vytvářením bublin, extrudoval se filament s velmi špatnou kvalitou, jelikož byl plný neroztavených tvrdých kousků. Průměr filamentu byl nestálý a nepohyboval se okolo požadované hodnoty. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka průměru filamentu je $1383,03 \mu\text{m} \pm 297,44 \mu\text{m}$.



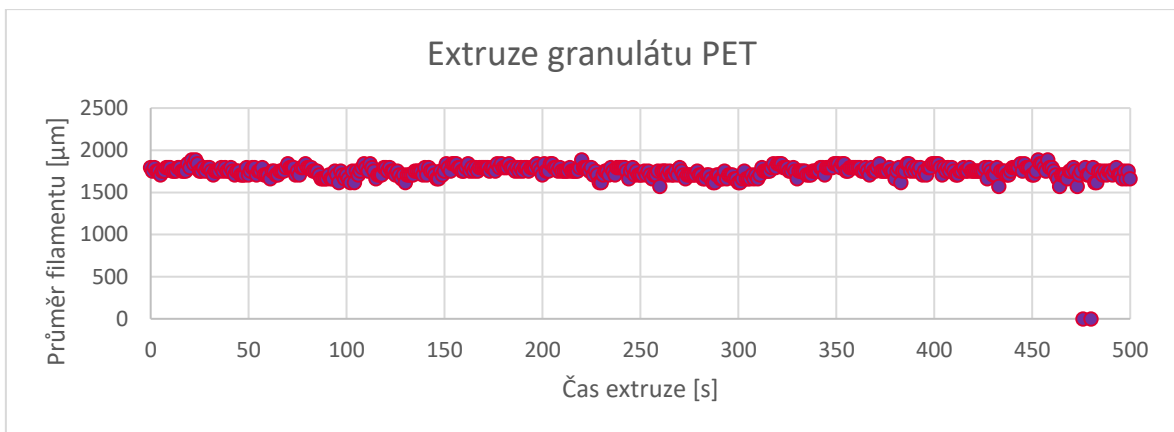
obr. 5-1 Graf závislosti průměru na čase u extruze PET odpadu

Extruze čistých PET lahví byla o něco úspěšnější. Filament se sice po většinu času tvořil, ale v mnoha případech velmi nekvalitní. Obsahoval předčasně ztvrdlý materiál a bubliny nashromážděného roztaveného materiálu, který uvízl pod tryskou. Průměr filamentu byl s velkými odchylkami, které se pohybovaly okolo $\pm 0,3 \text{ mm}$. Nulové hodnoty v grafu představují výpadky senzoru měřícího průměr filamentu, nikoli problémovou extruzí. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka průměru filamentu je $1736,52 \mu\text{m} \pm 184,56 \mu\text{m}$.

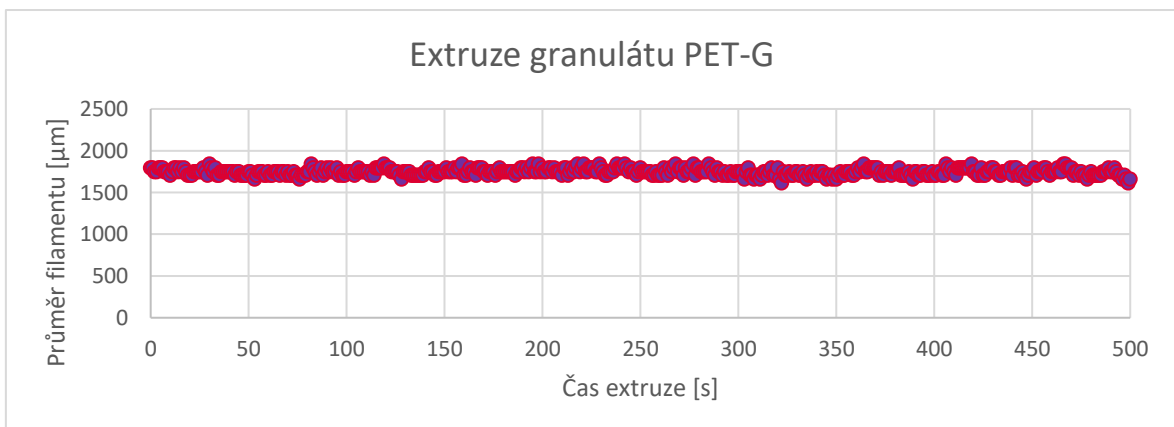


obr. 5-2 Graf závislosti průměru na čase u extruze čistých PET lahví

Extruze komerčně poskytnutých PET a PET-G granulátů byly úspěšné. Filamenty jen zřídka obsahovaly menší boule, průměr byl po většinu času konstantní a pohyboval se jen s malými odchylkami vůči požadované hodnotě. Dvě nulové hodnoty na konci extruze granulátu PET představují výpadek senzoru. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro průměr filamentu z granulátu PET je $1751,45 \mu\text{m} \pm 54,72 \mu\text{m}$. Průměrná hodnota a směrodatná odchylka pro průměr filamentu z granulátu PET-G je $1748,81 \mu\text{m} \pm 39,76 \mu\text{m}$.



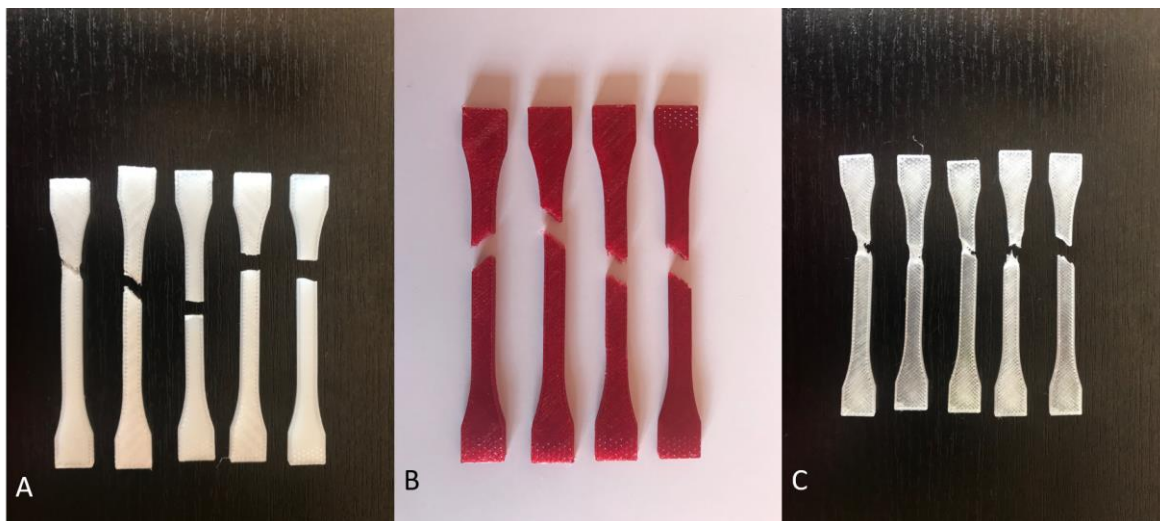
obr. 5-3 Graf závislosti průměru na čase u extruze komerčního granulátu PET



obr. 5-4 Graf závislosti průměru na čase u extruze komerčního granulátu PET-G

5.2 Výsledky tahových zkoušek

Tahová zkouška zkušebních těles proběhla podle normy ČSN EN ISO 527. Testy byly provedeny na stroji ZWICK Z020. Testována byla zkušební tělesa vytisknuta ze všech tří filamentů. Od filamentů z granulovaného PET a PET-G bylo vytištěno a otestováno 5 vzorků. Od filamentu z čistých PET lahví byly vytištěny a otestovány 4 vzorky z důvodu nedostatečného množství použitelného filamentu. Dále proběhlo testování samotných filamentů. Od každého ze tří filamentů bylo otestováno 5 vzorků o délce jednoho vzorku 0,65 m.



obr. 5-5 Zkušební vzorky po tahové zkoušce; A – vzorky z granulátu PET, B – vzorky z čistých PET lahví, C – vzorky z granulátu PET-G

E modul v tab. 5-1 a tab. 5-2 představuje Youngův modul pružnosti v tahu a maximální síla je síla, které je dosaženo ve chvíli, kdy se objeví první plastické deformace.

Z průměrů výsledných maximálních sil z tab. 5-1 lze vidět, že filament z granulátu PET dosáhl nejvyšší pevnosti v tahu. O něco nižší pevnosti v tahu dosáhly filament z PET lahví a z PET-G, jejichž průměrné výsledky byly ekvivalentní. Směrodatná odchylka filamentu z PET lahví je téměř desetinásobná oproti směrodatným odchylkám filamentů z granulátů PET a PET-G. Z tab. 5-2 lze vidět, že nejlepší pevnost v tahu měly vzorky vytištěné z granulátu PET, nejhorší pak vzorky vytištěné z PET lahví.

Vzorek	Síla maximální [N]
PET lahve	58,99
PET lahve	95,78
PET lahve	122,41
PET lahve	96,06
PET lahve	110,99
Průměrný výsledek ± směrodatná odchylka	96,85 ± 21,39
PET-G	97,24
PET-G	96,35
PET-G	93,07
PET-G	92,75
PET-G	99,32
Průměrný výsledek ± směrodatná odchylka	95,75 ± 2,51
PET	125,28
PET	128,33
PET	129,47
PET	127,64
PET	128,14
Průměrný výsledek ± směrodatná odchylka	127,77 ± 1,38

tab. 5-1 Výsledky tahových zkoušek filamentů

Vzorek	E modul [N/mm²]	Síla maximální [N]
PET lahve	1465,57	290,86
PET lahve	1740,05	310,59
PET lahve	2404,68	493,54
PET lahve	2507,18	457,67
Průměrný výsledek ± směrodatná odchylka	2029,37 ± 438,96	388,17 ± 88,63
PET-G	2522,66	598,06
PET-G	2457,09	594,53
PET-G	2492,44	594,12
PET-G	2467,14	557,47
PET-G	2518,34	582,47
Průměrný výsledek ± směrodatná odchylka	2491,53 ± 26,34	585,33 ± 14,89
PET	2138,26	443,48
PET	2844,46	646,74
PET	3073,58	683,87
PET	3372,29	773,18
PET	2622,54	487,34
Průměrný výsledek ± směrodatná odchylka	2810,23 ± 417,90	606,92 ± 123,42

tab. 5-2 Výsledky tahových zkoušek zkušebních vzorků

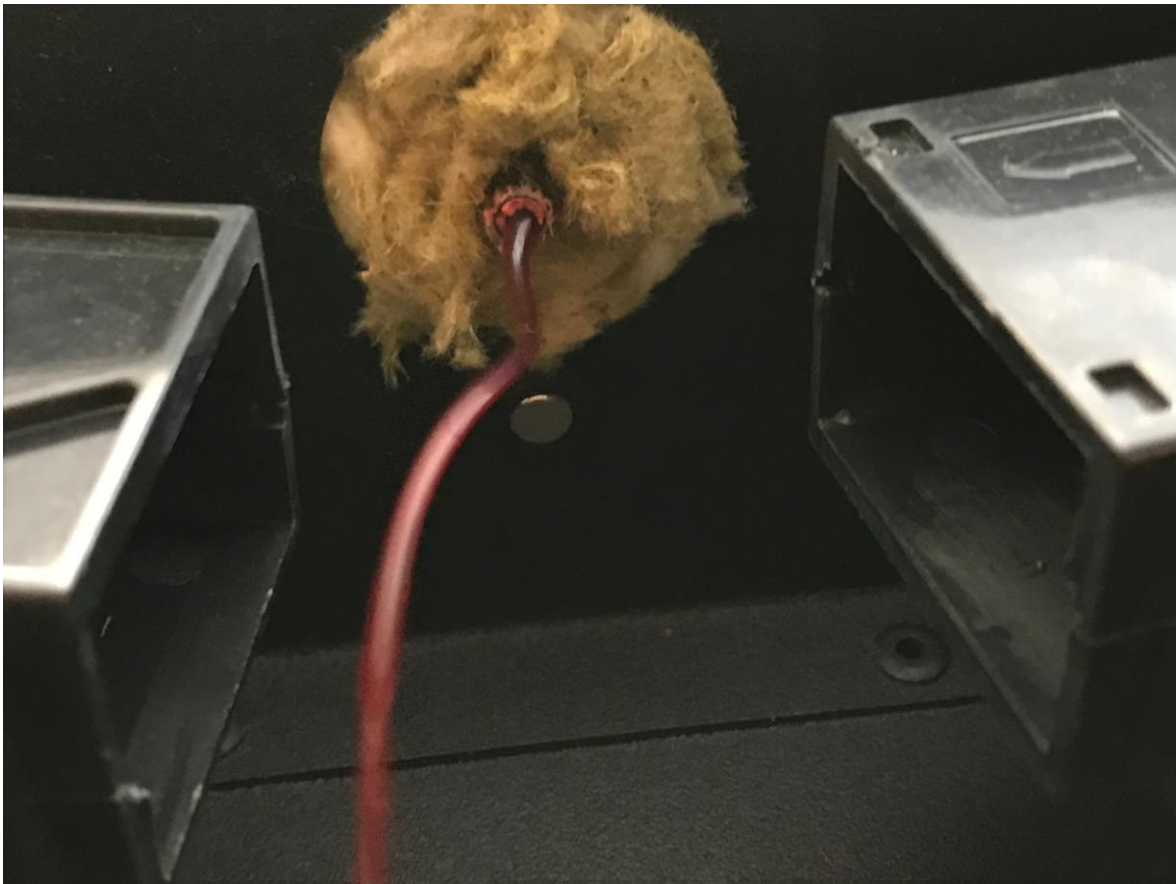
6 DISKUZE

Extruze PET odpadu byla neúspěšná z důvodu příměsových materiálů z víček a etiket. Kousky nadrcených víček se ve šneku neroztavily a procházely skrz trysku obalené roztaveným PET materiálem a tvořily tak tvrdé hrudky uvnitř filamentu. Etikety se ve šneku pravděpodobně přepalovaly a uvolňovaly se do roztaveného materiálu ve formě černých kousků. Proto byl výsledný filament pro 3D tisk naprosto nepoužitelný, jelikož tyto ztvrdlé kusy a nečistoty by ucpaly trysku. Z důvodu špatného vytlačování filamentu z trysky kvůli neroztaveným příměsím vznikaly přímo pod tryskou velké bubliny, které se zvětšovaly s nabývajícím vytlačeným materiálem.



obr. 6-1 Znehodnocení filamentu kvůli příměsím

U extruze čistých PET lahví se projevila problém nevyhřívání trysky. Samotná tryska totiž není zahřívána a je odkázána pouze na přenos tepla roztaveným materiálem a blízkou teplotní zónou. Kvůli nedostatečné teplotě materiál tuhne již v trysce, a to po jejím obvodu, tudíž ji postupně ucpával, až se tryska ucpala celá a extruze se přerušila, jelikož trvalo několik sekund, než roztavený materiál tento ztvrdlý špalík protlačil a extruze mohla pokračovat. Proto se pro lepší izolaci tepla tryska dodatečně obalila skelnou vatou. Problém sice zcela nevyřadil, ale částečně se jej podařilo eliminovat.



obr. 6-2 Ucpávání trysky po jejím obvodu



obr. 6-3 Zatvrdlý filament v trysce

Veliký rozptyl průměrů filamentu byl zapříčiněn tím, že nastříhané pásky byly příliš velké a jejich velikosti nebyla konstantní, tudíž jejich distribuce ve šneku byla velice omezená. Materiál se musel kvůli své velikosti do šneku tlačit silou, aby se zdeformoval a šnekem prošel. Z důvodu špatné distribuce těchto pásků ve šneku byl materiál nerovnoměrně dopravován k trysce, tudíž výsledný filament nemohl mít konstantní průměr. Maximální doporučená velikost vloček je od výrobce 4 mm. Ovšem, jak je vidět na obr. 4-2, pásky dosahovaly 20 mm i více. Problém u těchto velkých kusů materiálu byl také v tom, že se kvůli své velikosti nestihl dostatečně roztavit, a tudíž spolu s roztaveným filamentem byly vytlačovány i kousky tvrdého PET materiálu, které byly zatavené uvnitř filamentu. Filament s těmito tvrdými kusy byl pro 3D tisk nepoužitelný, jelikož ucpával trysku. Takto znehodnocené úseky se musely před tiskem odstranit, aby se zabránilo přerušení tisku.



obr. 6-4 Neroztavený kousek materiálu uprostřed filamentu

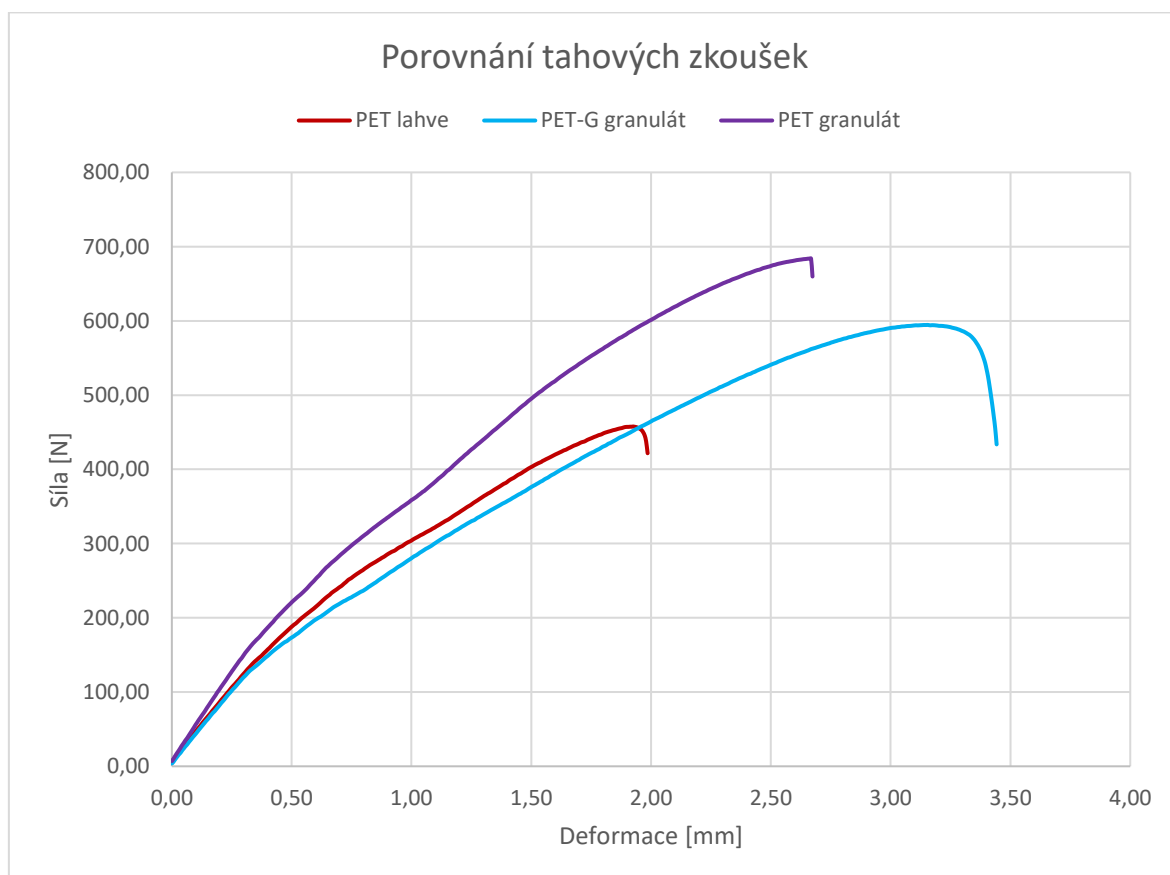
Materiál byl před extruzí velmi křehký. Tato vlastnost mu zůstávala i po extruzi. Proto byl recyklát z PET lahví vložen do trouby o teplotě 90 °C, aby se před vsypáním do násypky zahřál. Tento pokus byl úspěšný, jelikož filament po extruzi již nebyl křehký a nelámал se.

Filamenty vyráběné průmyslově mají garantovanou toleranci průměru $\pm 0,05$ mm. V případě filamentu o průměru 1,75 mm tedy může průměr dosahovat hodnot v rozmezí 1,7mm až 1,8 mm. U filamentu z čistých PET lahví tohoto rozsahu průměrů dosáhlo pouhých 30 % filamentu. U filamentu z granulátu PET-G tohoto rozsahu dosáhlo 92 % filamentu. U filamentu z granulátu PET tohoto rozsahu dosáhlo 80 % filamentu.

Výsledky tahové zkoušky filamentu z recyklovaných PET lahví nejsou příliš směrodatné, jelikož průměr zkoušeného filamentu nebyl konstantní. Průměr tohoto filamentu se většinou pohyboval kolem hodnoty 1,95 mm, zatímco u dalších dvou filamentů byl průměr okolo 1,75 mm. Proto je velmi pravděpodobné, že v případě, že by měl filament z recyklovaných PET lahví požadovaných 1,75 mm, výsledky pevnosti v tahu by byly nižší. Nejlepší pevnost v tahu měl filament z komerčního PET granulátu. Oproti němu měly filament z komerčního PET-G granulátu a filament z recyklovaných PET lahví pevnost v tahu o 25 % nižší. Hodnota modulu pružnosti nebyla zaznamenána, jelikož při zkoušce docházelo k prokluzu filamentu na válciích u čelistí, proto byly výsledné hodnoty zkreslené.

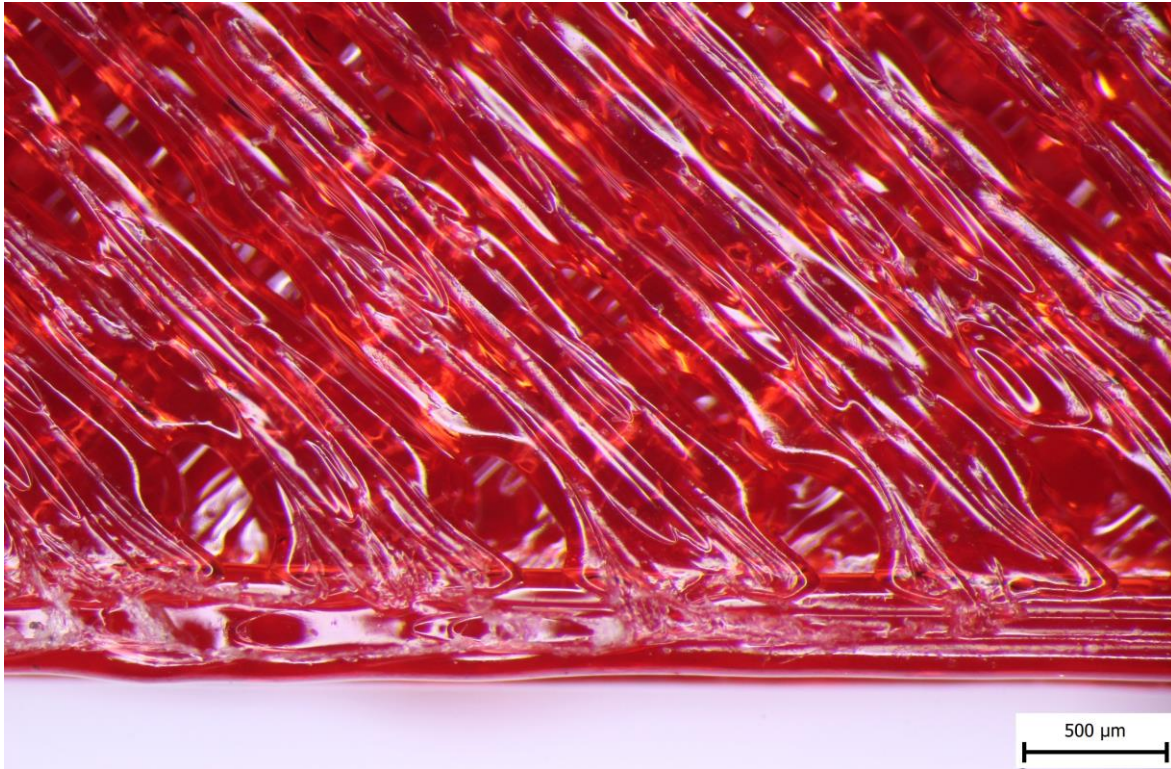
Výsledky tahové zkoušky vytištěných vzorků dopadly podle očekávání, jelikož nejmenší pevnost v tahu měly vzorky vytištěné z PET lahví. To bylo zapříčiněno tím, že tento recyklovaný materiál prošel více tepelnými úpravami, a tudíž došlo ke zhoršení mechanických vlastností, jak již bylo vysvětleno. Podle očekávání z porovnání materiálů PET a PET-G z tab. 2-1 měly vzorky z granulátu PET vyšší pevnost v tahu než vzorky z granulátu PET-G. Nejlepší pevnost v tahu tedy měly vzorky z komerčně zakoupeného PET granulátu. Oproti tomu měly vzorky z PET-G o 4 % a vzorky z PET lahví o 36 % nižší pevnost v tahu. Tyto procentuální rozdíly byly vypočítány z průměrných hodnot výsledných maximálních sil vyobrazených v tab. 5-1 a tab. 5-2.

Pro porovnání tahových zkoušek byl vybrán nejideálnější test od každého materiálu.

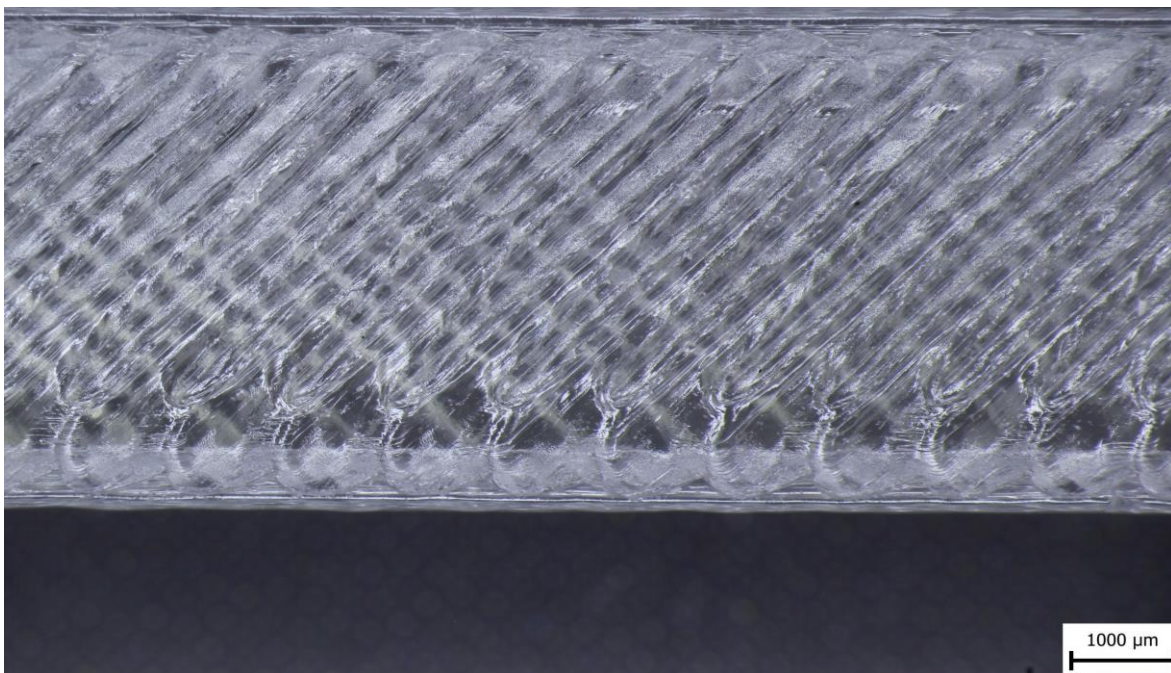


obr. 6-5 Graf tahové zkoušky v závislosti síly na deformaci

U tahových zkoušek vytištěných vzorků z jednotlivých materiálů bylo dosaženo velmi rozdílných výsledků. To bylo zapříčiněno z největší části kvůli nehomogenitě vzorků. Z důvodu nekonstantního průměru u filamentu z PET lahví docházelo u tisku vzorků k tomu, že i přes zvolenou 100% výplň byly mezi jednotlivými linkami mezery. Tato nehomogenita výplně vzorků přispěla ke snížení výsledné pevnosti v tahu.



obr. 6-6 Nehomogenita výplně vzorku z PET lahví



obr. 6-7 Dokonale homogenní výplň vzorku z PET-G

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na výrobu filamentu z PET lahví a z komerčně dostupných granulátů PET a PET-G. Následně se měly porovnat mechanické vlastnosti dílů vyrobených pomocí 3D tiskárny. Před začátkem výroby filamentu bylo nutné zajistit vhodný materiál pro výrobu. Po nevydařené extruzi nadrcených PET lahví včetně etiket a víček bylo zjištěno, že je potřeba zajistit čisté PET lahve bez příměsových materiálů. Čisté PET lahve byly nastříhány ve skartovacím stroji. Důkladnější drcení ovšem nebylo možné, proto extruze proběhla s nastříhanými pásky. To se ukázalo jako velký problém, jelikož kvůli velikosti materiálu byla jeho distribuce ve šneku extruderu špatná. Vlivem nerovnoměrného dopravování materiálu k trysce velmi kolísal průměr filamentu. Tolerance průměru filamentu $1,75 \pm 0,05$ mm dosáhlo pouhých 30 % vyrobeného filamentu. Další dvě extruze z komerčně dostupných granulátů PET a PET-G proběhly bez problémů. Požadované tolerance dosáhl filament z PET granulátu z 80 %, filament z PET-G granulátu z 92 %.

Po výrobě filamentu následoval tisk zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku na 3D tiskárně. Při tisku z recyklovaného PET filamentu se projevovaly problémy spojené s nekonstantním průměrem filamentu. V případě příliš velkého průměru se filament zasekl v trysce a tisk se musel přerušit. V případě malého průměru vznikaly mezi jednotlivými nanesenými linkami mezery. Tisk z filamentů PET a PET-G probíhal bez jakýchkoli problémů, jelikož průměr filamentů byl konstantní, tudíž i homogenita výplně zkušebních vzorků byla velmi dobrá.

Po výrobě zkušebních vzorků proběhla tahová zkouška. Zkoušely se jak samotné filamenty, tak následně i zkušební vzorky vytištěné z těchto filamentů. Při testování filamentů měl nejlepší pevnost v tahu filament z PET granulátu. Filament z recyklovaného PET spolu s filamentem z PET-G granulátu měly pevnost v tahu o 25 % nižší. Při testování zkušebních vzorků dosáhly vzorky z recyklovaného PET materiálu o 36 % nižší pevnosti v tahu než vzorky z PET granulátu. Tento pokles je způsobený vlivem recyklace, při které se zhoršují mechanické vlastnosti, ale také vlivem nehomogenní výplně vzorků. Vzorky z PET-G granulátu měly o 4 % nižší pevnost v tahu než vzorky z PET granulátu.

Výroba filamentu z recyklovaného PET je možná, ovšem je velmi důležité před samotnou extruzí správně nadrtit materiál na dostatečně jemné vločky. Pevnost v tahu recyklovaného materiálu oproti běžnému je nižší, ovšem pro technologii 3D tisku je i tato snížená pevnost v tahu recyklovaného filamentu dostačující.

Tímto byly splněny všechny dílčí cíle této bakalářské práce. V případných dalších studiích navazujících na toto téma by bylo vhodné zlepšit nadrcení recyklovaného PET materiálu. Tím by se eliminoval problém nekonstantního průměru filamentu a zlepšily by se mechanické vlastnosti výsledných součástí.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LI, Shengjie, Renji ZHANG, Qingping LU, Rendong WU, Yongnian YAN, Feng LIN, Xiaohong WANG a Zhuo XIONG. Rapid prototyping and manufacturing technology: Principle, representative technics, applications, and development trends. *Tsinghua Science and Technology* [online]. 2009, **14**(S1), 1–12. Dostupné z: doi:10.1016/s1007-0214(09)70059-8
- [2] Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping. nedatováno.
- [3] *Manufacturing Cost Estimation* [online]. [vid. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/>
- [4] BEDNÁŘ PETER, BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Faculty of Mechanical Engineering. Zpracování podkladů pro návrh objemových a plošných struktur [online]. 2013 [vid. 2019-03-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69391
- [5] ŘASA JAROSLAV a KEREČANINOVÁ ZUZANA. Nekonvenční metody obrábění 10. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [vid. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [6] BERRIMI, Chihab E, Amogh V, Anish CHAPARALA, Vijeth REDDY, BG ROSEN a Olena FLYS. Study on surface texture of Fused Deposition Modeling. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, **25**, 389–396. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2018.06.108
- [7] WANG, Jianlei, Hongmei XIE, Zixiang WENG, T. SENTHIL a Lixin WU. A novel approach to improve mechanical properties of parts fabricated by fused deposition modeling. *Materials and Design* [online]. 2016, **105**, 152–159. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.05.078
- [8] ČAPEK, Jaromír. *UNIVERZITA PARDUBICE FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ KATEDRA POLYGRAFIE A FOTOFYZIKY Hodnocení kvality tisku RepRap 3D tiskárny* [online]. 2016 [vid. 2019-04-06]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/68531/CapekJ_Hodnoceni_kvality_OP_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9] *Materiály - Prusa Research s.r.o. – 3D tisk a 3D tiskárny od Josefa Průši* [online]. [vid. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [10] ZBYNĚK POHOŘELSKÝ. *3D tisk - Teplota trysky, rychlost tisku a materiál* [online]. 2017 [vid. 2019-04-26]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-teplota-trysky-rychlost-tisku-material/>
- [11] CHACÓN, J. M., M. A. CAMINERO, E. GARCÍA-PLAZA a P. J. NÚÑEZ. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design* [online]. 2017, **124**, 143–157. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065
- [12] AWAJA, Firas a Dumitru PAVEL. Recycling of PET. *European Polymer Journal* [online]. 2005, **41**(7), 1453–1477. ISSN 00143057. Dostupné z: doi:10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005

- [13] SICHINA, W.J. (Perkin Elmer). DSC Measurement of %Crystallinity of Thermoplastics. *Thermal Analysis- Application Note (Perkin Elmer Instruments)* [online]. 2000, 1–4. Dostupné z: doi:10.1007/BF00007115
- [14] HAJI, Aminoddin a Ruhollah SEMNANI RAHBAR. Crystallinity and orientation development upon hot multistage drawing of PET multifilament yarn. *Journal of the Textile Institute* [online]. 2013, **104**(3), 231–238. ISSN 00405000. Dostupné z: doi:10.1080/00405000.2012.717377
- [15] PET, Shredding. Extrusion Walkthrough The Extrusion of PET [online]. nedatováno, 1–11. Dostupné z: <https://3devo.com/wp-content/uploads/2018/04/PET-recycling.pdf>
- [16] LENFELD PETR, POUPA TOMÁŠ, BOČEK JAN, BĚHÁLEK LUBOŠ, Vytlačil Jan. *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. [vid. 2019-03-27]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm
- [17] DAS, Anirudra, Parminder SINGH BADWAL, Doug MCLEAN, Meera MOHAN, Mitchell D. JOHNSON, Ian GIBSON a Mazher Iqbal MOHAMMED. A low carbon footprint approach to the reconstitution of plastics into 3D-printer filament for enhanced waste reduction. *KnE Engineering* [online]. 2017, **2**(2), 234. ISSN 2518-6841. Dostupné z: doi:10.18502/keg.v2i2.621
- [18] *What's the deal with rPET? | Recycling Plastic | EarthHero Blog* [online]. 2017 [vid. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://earthhero.com/whats-the-deal-with-rpet/>
- [19] MARCO. *Is PETG the best filament in the 3D Printing Industry? - 3devo* [online]. 2017 [vid. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://3devo.com/is-petg-the-best-filament-for-3d-printing/>
- [20] THOMAS SANLADERER. *Things you should know about PETG - YouTube* [online]. 2018 [vid. 2019-04-06]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=8_adY2K-YIc
- [21] TRADING SRO, Plastum. *Fyzikální vlastnosti PET* [online]. 2016 [vid. 2019-04-26]. Dostupné z: www.plastum.cz
- [22] *Properties of PET-G* [online]. 2006 [vid. 2019-04-26]. Dostupné z: http://www.axom.cz/imgs/articles/25-2_Griphen__PETG.pdf
- [23] CALEB CRAFT. *How It Is Made: 3D Printing Filament* [online]. 2015 [vid. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://makezine.com/2015/02/11/how-it-is-made-3d-printing-filament/>
- [24] ZANDER, Nicole E., Margaret GILLAN a Robert H. LAMBETH. Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, **21**(March), 174–182. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2018.03.007
- [25] ING. LUBOŠ BĚHÁLEK, Ph.D. *Polymery. ISBN 978-80-88058-68-7* [online]. 2016 [vid. 2019-03-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [26] ČSN EN ISO 527 Plasty - Stanovení tahových vlastností, 2012.
- [27] ČSN EN ISO 178 - Plasty - Stanovení ohybových vlastností, 2010.
- [28] ČSN EN ISO 180 Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod, 2000.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

RP	Rapid Prototyping
CAD	Computer Aided Design
STL	Surface Tessellation Language
SLA	Stereolithography
LOM	Laminated Object Manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
IJP	Ink Jet Printing
3DP	Three Dimensional Printing
3D	Trojrozměrný
MJM	Multi-Jet Modeling
PLA	Polymléčná kyselina
PET	Polyethylentereftalát
PET-G	Polyethylentereftalát-glykol
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
FLEX	Flexibilní materiály
HIPS	High Impact Polystyren
PP	Polypropylen
HDPE	High Density Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
DSC	Differential scanning calorimetry
POSTC-PET	Po-spotřebitelský polyethylentereftalát
rPET	Recyklovaný polyethylentereftalát
COTS PET	Komerční pelety polyethylentereftalátu

CO ₂	Oxid uhličitý
NaOH	Hydroxid sodný
UV	Ultraviolet
T_g	Teplota skelného přechodu
T_c	Teplota studené krystalizace
T_m	Teplota tání
R_l	Poloměr trnu
R_2	Poloměr podpěr
l	Délka zkušebního tělesa
b	Šířka zkušebního tělesa
h	Tloušťka zkušebního tělesa
b_N	Šířka zkušebního tělesa pod vrubem
C	Úplné přeražení zkušebního tělesa
H	Kloubové přeražení zkušebního tělesa
P	Částečné přeražení zkušebního tělesa
N	Zkušební těleso nepřeraženo
E	Modul pružnosti v tahu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1	Princip metody SLA [3].....	14
obr. 2-2	Princip metody SLM [3]	15
obr. 2-3	Princip metody SLS [3].....	16
obr. 2-4	Princip metody 3DP [3].....	16
obr. 2-5	Princip metody MJM/IJP [3].....	17
obr. 2-6	Princip metody FDM [8].....	18
obr. 2-7	Tisk mostů [10].....	19
obr. 2-8	Procesní parametry; a – orientace tisku, b – tloušťka vrstvy a obvodový perimetr [11].....	20
obr. 2-9	Grafické porovnání průměrné maximální pevnosti; a – v tahu, b – v ohybu [11].....	20
obr. 2-10	Hydrolyza, přerušení kovalentní vazby u polymeru [15]	21
obr. 2-11	Princip vstřikovacího vyfukování s přerušovaným procesem; 1 – ohřev tvarové části předlisku, 2 – přesun do vstřikovací formy, 3 – vyfukování, 4 – chlazení, vyhození [16]	22
obr. 2-12	Extruze filamentu; a – čistý granulát, b – přidání barviva, c – vytlačovací lis, d – lázeň s horkou vodou, e – lázeň se studenou vodou, f – navíjení na cívku [23]	25
obr. 2-13	Výsledné parametry extruze PET [15]	25
obr. 2-14	Výsledky tahové zkoušky recyklovaného a komerčního PET materiálu; A – graf závislosti napětí/deformace, B – konečná pevnost v tahu a modul pružnosti (rPET), (COTS PET) a kousek PET lahve [24].....	26
obr. 2-15	Rozdělení mechanických charakteristik [25].....	27
obr. 2-16	Zkušební těleso typu 1BA.....	29
obr. 2-17	Rozměry zkušebního tělesa 1BA.....	29
obr. 2-18	Poloha zkušebního tělesa na začátku zkoušky; 1 – zkušební těleso, F – použitá síla, R_1 – poloměr zatěžovacího trnu, R_2 – poloměr podpěr, h – tloušťka zkušebního tělesa, l – délka zkušebního tělesa, L – rozpětí mezi podpěrami	30

obr. 2-19	Upínací přípravky, zkušební těleso s vrubem a břít kyvadla při úderu; 1 – břít kyvadla, 2 – vrub, 3 – hrana upínacího přípravku, kolem které se těleso ohýbá, 4 – pevná část upínacího přípravku, 5 – pohyblivá část upínacího přípravku, b_N – šířka pod vrubem.....	32
obr. 2-20	Označení metod, typy zkušebních těles, typy a rozměry vrubů.....	32
obr. 4-1	Granuláty připravené k extruzi; A – granulát PET, B – granulát PET-G, C – vločky PET odpadu	35
obr. 4-2	Úprava PET lahví; A – očištěná a uříznutá PET lahev, B – nastříhané pásky	36
obr. 4-3	Model zkušebního tělesa	38
obr. 4-4	Postup tisku zkušebního tělesa; A – každá lichá vrstva, B – každá sudá vrstva; zelená – obrys, žlutá – vnější perimetr, růžová – plná výplň	38
obr. 4-5	Vytištěné zkušební vzorky; A – z granulátu PET, B – z granulátu PET-G, C – z čistých PET pásků.....	39
obr. 5-1	Graf závislosti průměru na čase u extruze PET odpadu	40
obr. 5-2	Graf závislosti průměru na čase u extruze čistých PET lahví.....	41
obr. 5-3	Graf závislosti průměru na čase u extruze komerčního granulátu PET	41
obr. 5-4	Graf závislosti průměru na čase u extruze komerčního granulátu PET-G	41
obr. 5-5	Zkušební vzorky po tahové zkoušce; A – vzorky z granulátu PET, B – vzorky z čistých PET lahví, C – vzorky z granulátu PET-G	42
obr. 6-1	Znehodnocení filamentu kvůli příměsím.....	44
obr. 6-2	Ucpávání trysky po jejím obvodu	45
obr. 6-3	Zatvrdlý filament v trysce	45
obr. 6-4	Neroztavený kousek materiálu uprostřed filamentu	46
obr. 6-5	Graf tahové zkoušky v závislosti síly na deformaci	47
obr. 6-6	Nehomogenita výplně vzorku z PET lahví.....	48
obr. 6-7	Dokonale homogenní výplň vzorku z PET-G	48

11 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1	Tabulka se základními vlastnostmi materiálů PET a PET-G [21],[22] ..	24
tab. 4-1	Parametry extruze PET odpadu	36
tab. 4-2	Parametry extruze čistého PET	37
tab. 4-3	Parametry extruze komerčního granulátu PET	37
tab. 4-4	Parametry extruze komerčního granulátu PET-G	37
tab. 4-5	Parametry tisku pro všechny filameny	38
tab. 4-6	Parametry tisku pro jednotlivé filameny	38
tab. 5-1	Výsledky tahových zkoušek filamentů	43
tab. 5-2	Výsledky tahových zkoušek zkušebních vzorků	43