



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 RECYKLOVANÉHO A NERECYKLOVANÉHO FILAMENTU Z ABS PLASTU

EXPERIMENTAL COMPARISON OF RECYCLED AND NON-RECYCLED FILAMENT OF ABS PLASTIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Grygar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Filip Grygar
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 recyklovaného a nerecyklovaného filamentu z ABS plastu

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. V průběhu tisku z materiálu ABS vzniká relativně velké množství odpadu (podpory, nepovedené tisky), který by bylo teoreticky možné znovu využít k 3D tisku a tím jednak snížit náklady a také snížit celkový vyprodukovaný odpad.

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je ověřit možnosti recyklace dílů vyrobených pomocí 3D tisku, následnou výrobu filamentu ze vzniklého granulátu a pomocí vhodně navržených experimentů ověřit vlastnosti takového filamentu a dílů z něj vyrobených v porovnání s tiskem z nerecyklovaného materiálu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- zajistit výrobu granulátu z dílů vyrobených z ABS plastu,
- stanovit parametry a realizovat výrobu filamentů z recyklovaného a běžného materiálu,
- 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:

BOLDIZAR, Antal a Kenneth MÖLLER. Degradation of ABS during repeated processing and accelerated ageing. *Polymer Degradation and Stability*. 2003, 81(2), 359-366. DOI: 10.1016/S0141-3910(03)00107-1. ISSN 01413910. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391003001071>

SHARMA, Mala a Sophia ZIEMIAN. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. GOKCEK, Murat. *Mechanical Engineering [online]*. InTech, 2012, s. 159-180 [cit. 2018-10-26]. ISBN 978-953-51-0505-3. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/download/pdf/35261>

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>

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

V průběhu 3D tisku vzniká plastový odpad, který by mohl být recyklován. Jedním z nejpoužívanějších materiálů je ABS, jehož recyklaci se věnuje tato práce. Při recyklaci ABS dochází k velmi výraznému zhoršení mechanických vlastností, což se kompenzuje přidáním nerecyklovaného materiálu. V této práci se pracovalo s poměrem 25 % recyklovaného a 75 % nerecyklovaného materiálu, což je poměr, který ještě nebyl testován a nejspíše představuje hraniční poměr, kdy má recyklace ještě smysl.

Bohužel se z recyklovaného materiálu nepodařilo vyextrudovat dostatečně kvalitní filament, který by bylo možné použít pro bezproblémový tisk. A to vlivem nehomogenity nadrcených dílů a konstrukce extrudéru. Pro zlepšení vlastností by byl potřeba komplexnější extrudér s větším průměrem šneku, či dvěma šneky a také více zónový chladicí systém. Pro zlepšení homogenity materiálu by bylo třeba využít profesionálních drtičů se sítí. Index toku taveniny a testování samotného filamentu ukázalo, že se jedná o schůdnou cestu a taková recyklace je reálná.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, ABS, filament, extruze, recyklace

ABSTRACT

Plastic waste which arises from 3D print could be recycled. One of the most used materials is ABS with which this degree work deals. During recycling of ABS mechanical qualities rapidly deteriorate which is compensated by adding non-recycled ABS. This degree work dealt with a ratio of 25% of recycled to 75% of non-recycled material which is a ratio not have been tested so far, and most likely represents a boundary ratio when recycling still makes sense.

Unfortunately, it was not possible to extrude from a recycled material a filament of high-quality enough which could be used for problem-free print. It was influenced by non-homogeneity of crushed components and the construction of an extruder. For improving the characteristics a more complex extruder would be needed, with a bigger screw diameter or with two screws, and also a cooling system with more zones. Professional grinders with screens would have to be used for improving homogeneity of the material. The melt flow index of the liquid alloy and the testing of the filament itself showed that this way is practicable and such a recycling is realistic.

KEYWORDS

3D print, ABS, filament, extrusion, recycling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GRYGAR, Filip. *Experimentální porovnání recyklovaného a nerecyklovaného filamentu z ABS plastu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117224>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Tomáš Koutecký Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Kouteckému Ph.D. za jeho trpělivost, odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Vosynkovi Ph.D. za pomoc při testování vzorků. Taktéž bych chtěl poděkovat svému dědovi za pomoc s drcením vzorků a také své rodině a všem, kteří mi byli nápomocní, jak při vypracovávání této bakalářské práce, tak i v průběhu svého dosavadního studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	FDM tisk	14
2.2	ABS	16
2.3	Výroba filamentu	18
2.4	Proč recyklovat	20
2.5	Recyklace ABS plastu	21
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	24
3.1	Analýza problému	24
3.2	Cíl práce	24
4	MATERIÁL A METODY	25
4.1	Použité stroje	25
4.1.1	Extrudér	25
4.1.2	3D tiskárna	26
4.2	Vybraný materiál	27
4.3	Návrh experimentu	28
4.4	Metody vyhodnocování vzorků	29
4.4.1	Tahová zkouška	29
4.4.2	Index toku taveniny	30
4.4.3	Zkouška filamentu	30
4.4.4	3 body ohyb	31
5	VÝSLEDKY	32
5.1	Zkoušení filamentu	32
5.2	Index toku tekutiny	34
5.3	Tahová zkouška	34
5.4	3 body ohyb	36
6	DISKUZE	37
7	ZÁVĚR	39

8	CITACE	41
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	45
9.1	Příklady použitých fyzikálních veličin	45
9.2	Příklady použitých zkratk	45
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	46
11	SEZNAM TABULEK	47

1 ÚVOD

S ohledem na novodobé snahy snižovat objem vyprodukovaného odpadu a recyklovat stále větší objem materiálu, je potřeba hledat každou cestu, jak tohoto dosáhnout. Tento problém se týká především plastů. Dobrou možnost poskytuje 3D tisk, a to především metoda Fused Deposition Modeling (FDM). Tato metoda představuje technologii, která dnes podléhá velkému rozvoji a stává se stále rozšířenější, především u laické veřejnosti. I přes obecné přesvědčení, že se jedná o bezodpadovou metodu při její realizaci vniká odpad ve formě podpor či nepovedených výtisků.

Jedním z nejpoužívanějších plastů pro tisk FDM metodou je plast ABS. Proto se tato práce zabývá výrobou a experimentálním porovnáním vlastností nerecyklovaného a recyklovaného filamentu z ABS. Navíc je sledován vývoj mechanických vlastností v závislosti na počtu recyklačních cyklů.

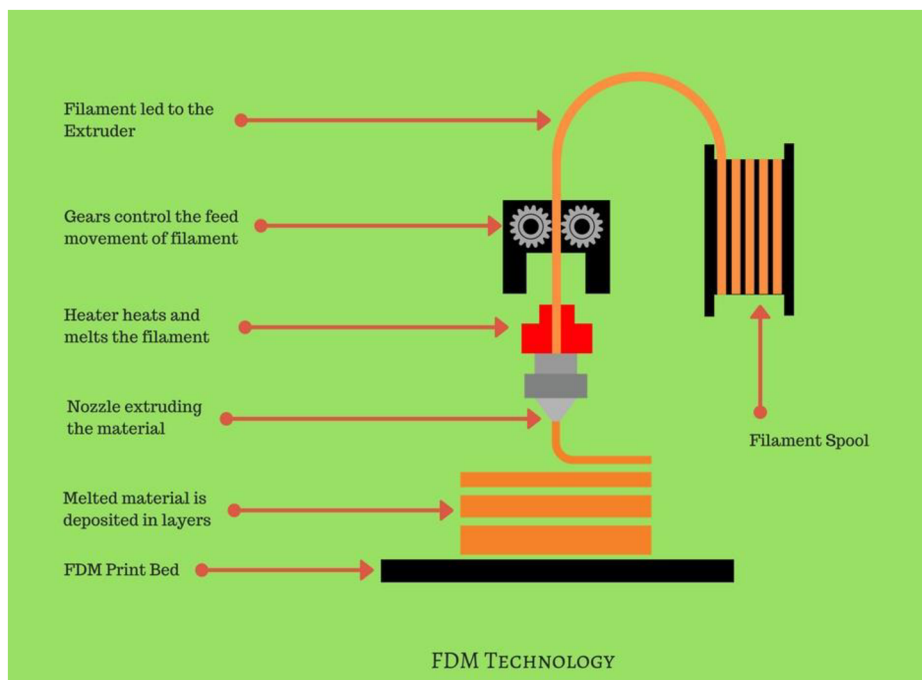
Cílem této práce je ověřit možnost použít odpad vzniklý při tisku FDM metodou k výrobě nového filamentu. A s tímto filamentem dosáhnout podobných mechanických vlastností nerecyklovaných filamentů a ověřit možnost tisku takovým filamentem při zachování mechanických vlastností vytisknutého dílu. Takto by mohlo dojít k snížení vyprodukovaného odpadu a zároveň ke snížení produkce nového materiálu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 FDM tisk

FDM (Fused deposition modeling) je technologie 3D tisku, při které dochází k tavení materiálu v extrudéru, který je posléze vytlačován a ve vrstvách nanášen na pracovní desku. Tomu je potřeba uzpůsobit návrh tisknuté součásti.

Metoda umožňuje stavbu podpor pro tisk složitějších nebo jinak nevytisknutelných tvarů. V případě tiskárny, která je schopna tisknout z více filamentů naráz, je možnost podpory tisknout z jiného materiálu. Takto vzniklé podpory je možné poté odstranit chemicky nebo mechanicky. Popřípadě existuje možnost využít několik filamentů pro tisk vícebarevných dílů. Pro tisk je možno volit mnoho tiskových atributů jako třeba tloušťku vrstvy, míru výplně materiálem, způsob výplně, orientaci modelu v pracovní oblasti a další [1].



obr. 2-1 Tisk metodu FDM [2]

Tisk probíhá tak (viz. Obr. 2-1), že je materiál vtlačován do trysky ve formě filamentu, kde je nahříván na určitou teplotu, při které je dostatečně viskózní. Tryskou je nejdříve nanесena jedna vrstva v osách X, Y a poté se posune o výšku nanášené vrstvy v ose Z a nanáší další vrstvu. Proces probíhá, dokud není vytištěn celý díl. Filament bývá namotán na cívce a v průběhu tisku je z ní odmotáván [2].

Používané materiály pro tuto metodu jsou termoplasty: ABS, PLA, PET, PETG, HDPE a další [3].

Jak uvádí studie [4], tak pro potřeby recyklace materiálu je právě FDM technologie nejvhodnější. A to z důvodu snadné recyklovatelnosti použitých materiálů, tak i dostupností recyklačních systémů.

2.2 ABS

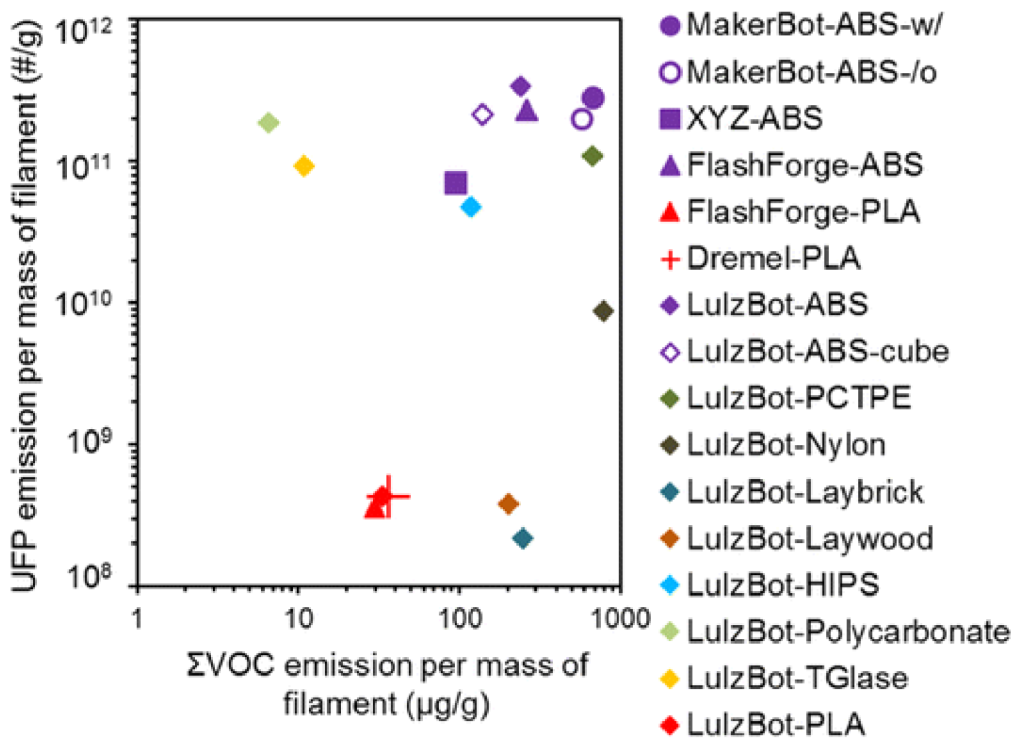
ABS (Akrylonitril butadien styren) je inženýrský termoplast hojně používaný při 3D tisku FDM metodou. Jedná se o amorfni látku, takže nemá pravidelnou krystalickou strukturu. Také nemá žádný skutečný bod tání, ale pro potřeby 3D tisku je uváděna teplota 200-250 °C jako teplota, při které je materiál dostatečně viskózní [5]. Jeho hlavními vlastnostmi jsou vysoká houževnatost, odolnost proti rázům a nízká hustota. Další výhodou je chemická odolnost, a to především proti koroziivním chemikáliím, alkoholům, živočišným, rostlinným a minerálním olejům. ABS je rozpustné v Acetonu, čehož se využívá při odstraňování podpor. Aceton může také sloužit k vyhlazení povrchu dílu po FDM tisku [5].



obr. 2-2 ABS granulát

ABS je vhodné pro tisk mechanických dílů. Překážkou může být silný pach při extruzi, některé filamenty jsou vyráběny tak, aby tisk nenarušoval nepříjemný pach [6] [7].

Při tisku ABS je do okolí uvolňováno velké množství mikroplastů, a to i řádově více než u jiných materiálů (např.: PLA). Při tisku ABS se dále uvolňuje velké množství styrenu. Uvolňují se také jiné chemikálie. Opět je uvolňováno řádově větší množství chemikálií než u jiných plastů (např.: PLA). K uvolňování dochází i při nižších teplotách, než jsou tiskové teploty. Koncentrace dosahovaly hodnot větších, než jsou běžně uvažované hodnoty pro obytné a kancelářské prostory [8]. Přitom styren je řazen mezi karcinogeny a může způsobovat vícero zdravotních komplikací [9].



obr. 2-3 Emise vznikající při tisku [8]

S ohledem na tyto skutečnosti bývá doporučováno tisknout v odvětrávaných prostorech a netrávit v těchto prostorech příliš mnoho času [8]. Další možností je kryt na samotnou tiskárnu s vlastním filtrem.

Původní barva ABS je krémově bílá, ale lze ji změnit přidáním barviv. Otevřené tiskárny se nehodí pro tisk velkých dílů, kvůli vysoké teplotě při extruzi, která zapříčiňuje velké smrštění dílu po vychladnutí. Tomuto lze zabránit použitím zakrytované tiskárny. Při kontaktu s tiskovou podložkou se díl může kroutit, což vede k poškození dílů a nepřesnostem a může vyústit až k úplnému zničení tisknuté součásti. Tomuto lze předcházet použitím vyhřívané tiskové podložky nebo právě zakrytovanou konstrukcí [5].

Další nevýhodou ABS je citlivost na UV záření, které by mohlo vyvolat proces degradace. S ohledem na tuto skutečnost by se mělo volit jeho použití a umístění. Existuje možnost použít aditiva, která zabraňují nebo zmírňují dopady UV záření [10].

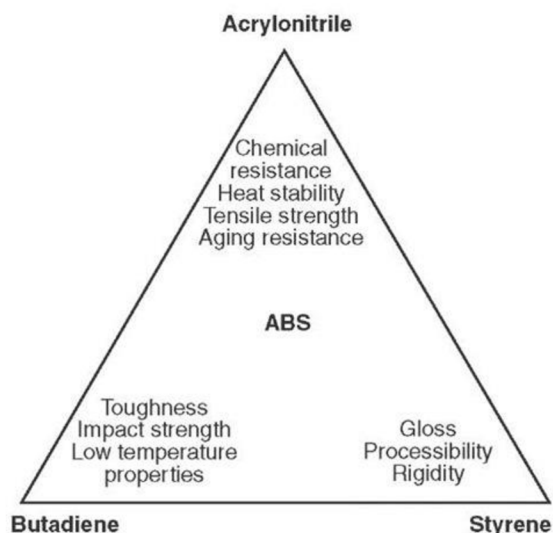
ABS je tvořeno třemi složkami. Podíl jednotlivých složek na celkovém složení je velmi variabilní, což má za následek rozdílné vlastnosti ABS od každého výrobce.

Rozsahy podílů jsou definovány takto: [11]

- 15-35 % acrylonitrilu
- 5-30 % butadienu
- 40-60 % styrenu

Velký rozsah podílů jednotlivých složek může vyústit v rozdílné vlastnosti v závislosti na zvolených podílech. Díky tomuto existuje spousta typů ABS s rozličnými vlastnostmi. Tyto vlastnosti se mohou dále upravovat přidáváním různých aditiv.

Na obr. 2-4 můžeme vidět jaké vlastnosti vnáší do ABS jeho jednotlivé fáze. Acrylonitril bývá zodpovědný za chemickou odolnost, tepelnou stabilitu, pevnost v tahu a odolnost proti stárnutí. Butadien ovlivňuje rázovou houževnatost, chování materiálu za nízkých teplot. Styren zodpovídá za lesk, možnost zpracovatelnosti a tuhost.

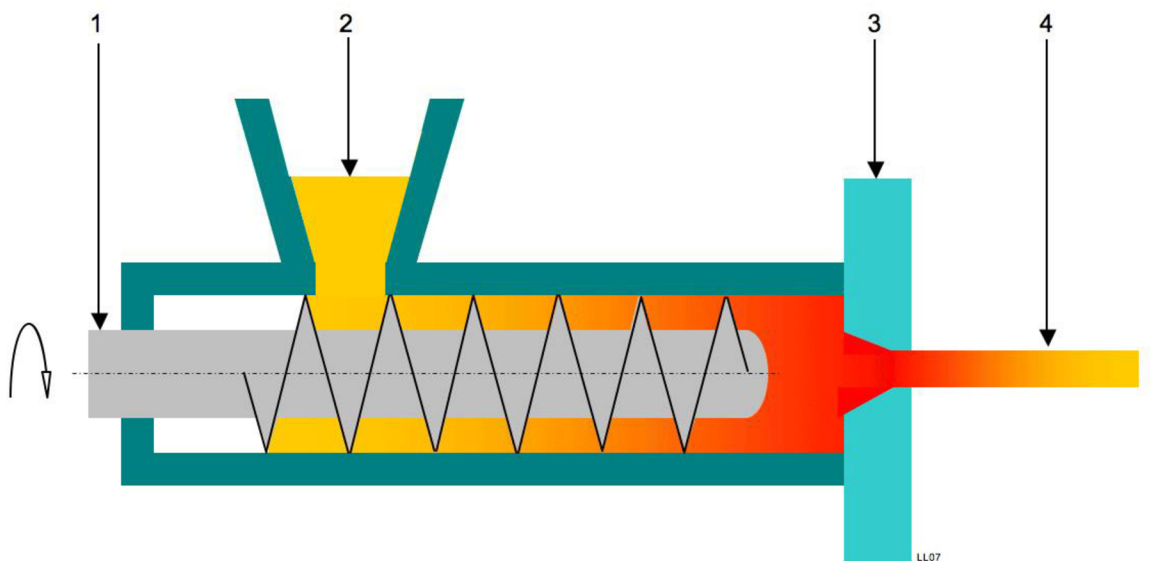


obr. 2-4 Vlastnosti jednotlivých složek ABS na jeho vlastnosti [32]

2.3 Výroba filamentu

K 3D tisku se jako výchozí materiál používá filament namotaný na cívce. Filament je v podstatě dlouhý drát, respektive vlákno vyrobené z plastu.

Jako výchozí materiál se používá granulát. Ke granulátu se mohou přimíchat různá aditiva pro zabarvení či úpravu některých vlastností jako třeba vyšší odolnost proti UV záření. Je dobré před začátkem procesu směs přehřát a zbavit vlhkosti.



obr. 2-5 Extruze pomocí šroubu [33]

Směs materiálu je nasypána do zásobníku (2), kde je pomocí gravitace tlačena do tuby, ve které se otáčí šroub (1). Tím je směs posouvána i mixována. Směs prochází přes několik tepelných zón, kde se nahřívá. Dále je tlačena přes trysku kruhového průřezu (3). Po průchodu tryskou vniká filament (4), který je dále ochlazován (obr. 2-5) [12].

Průměr vycházejícího filamentu ovlivňuje průměr trysky, ale hlavně je závislý na rychlosti a síle, kterou je tažen [13].

Tažná síla je vyvíjena při namotávání filamentu na cívku. Ještě před namotáním se kontinuálně měří průměr filamentu. Ten by měl splňovat určitá kritéria. Běžné jsou průměry 1,75 mm a 2,85 mm. Pro běžné použití se většinou uvádí tolerance $\pm 0,05$ mm nebo přesnější [13] [6]. Někteří výrobci dokonce poskytují informace o průměru filamentu napříč celou délkou [14].

Teploty v jednotlivých tepelných zónách jsou závislé na použitém materiálu, a je potřeba dodržovat maximální i minimální hodnoty udávané výrobcem. Jinak by mohlo dojít k znehodnocení plastu jeho rychlou degradací nebo k nedostatečnému nahřátí a z toho vyplývající nízké tekutosti.

2.4 Proč recyklovat

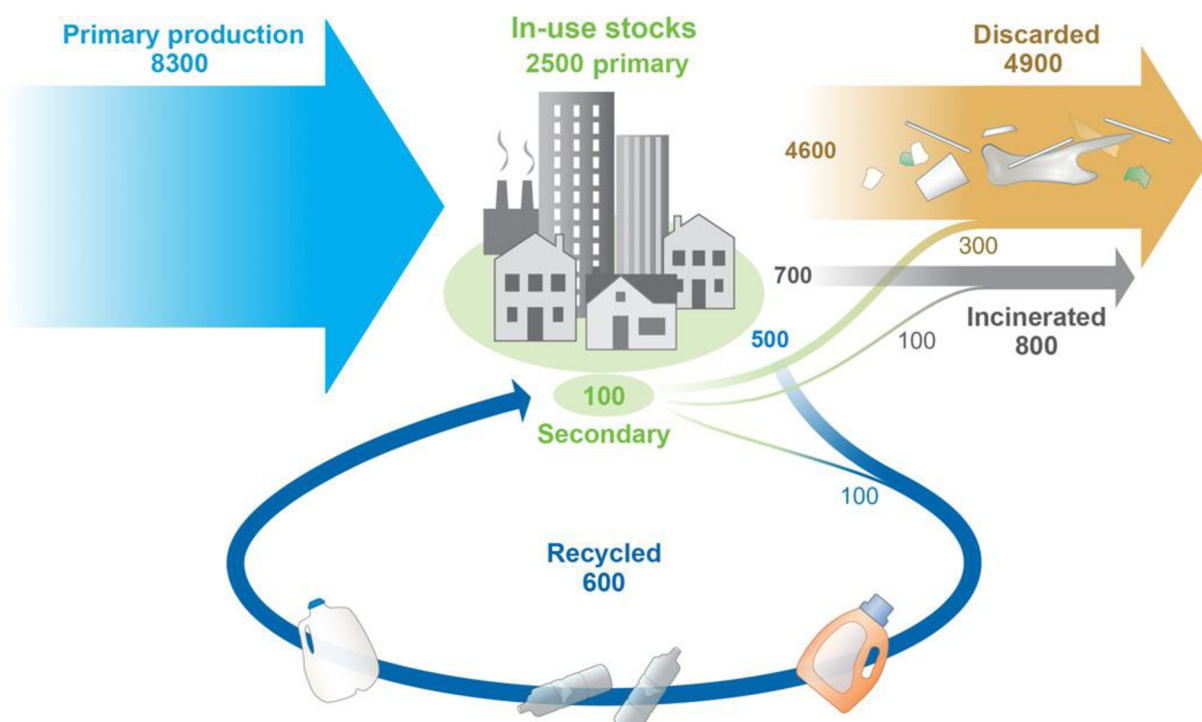
V dnešní době velice rychle narůstá množství vyrobeného plastu a také požadavek na jeho recyklaci. Za posledních 60-70 let se produkce plastů zvýšila přibližně 190x. Z 2 Megatun (Mt) za rok 1950 na 380 Mt za rok 2015. Do roku 2015 se vyrobilo přibližně 8300 Mt plastu. 30 % těchto plastů je stále aktivně využíváno [15]. Zbytek plastů už dosloužil a je potřeba se ho nějak zbavit. V podstatě jsou 3 možnosti, co s odpadem dělat [15].

1. Odpad uložit (sklárky, vyhazování do moře)
2. Spálit (ne vždy se spaluje za produkce elektřiny nebo tepla)
3. Znovupoužit, recyklovat

Z celkové hmotnosti vyrobených plastů do roku 2015 již 70 % dosloužilo. Z těchto 70 % je [15]:

- 84 % skladováno
- 12 % spáleno
- 9 % recyklováno

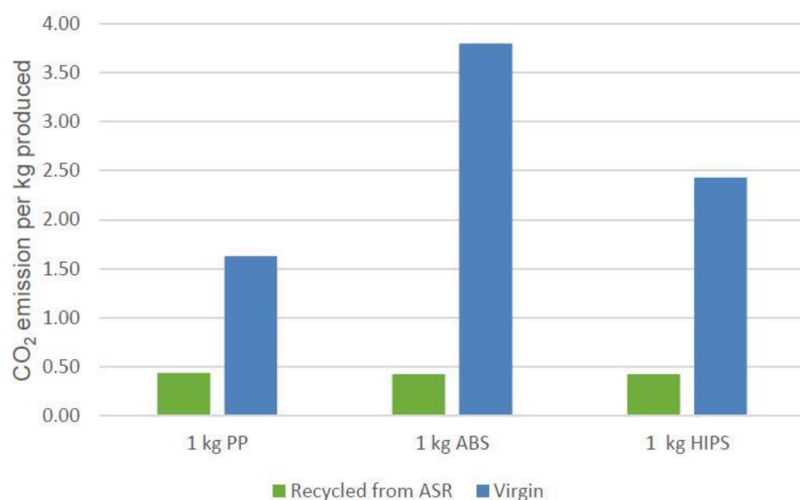
Z těchto 9 % recyklovaného plastu, bylo opět recyklováno jen 10 % více než jednou. Ovšem za rok 2014 bylo v Evropě recyklováno 30 % odpadu [15]. Z čehož lze vyvodit, že podíl recyklovaného plastu oproti jiným formám zacházení s plastem stoupá.



obr. 2-6 Co se děje s vyhozeným plastem [15]

Evropská Unie navíc vydává předpisy o odpadech a jejich recyklaci, které počítají se zvýšením podílu recyklovaného odpadu [16].

Podle výše zmíněných informací je patrný trend recyklovat co nejvíce materiálu, a to i více než jednou. Výroba plastu ABS je nákladná. Na 1 kg se spotřebuje cca 95,33 MJ energie [17]. Navíc podle obr. 2-7 dochází při recyklaci k významnému snížení emisí nutných pro výrobu ABS (data se vztahují na Axion Polymers' proces, ale ostatní metody by měly vykazovat podobná čísla) [18].



obr. 2-7 Srovnání emisí vzniklých při výrobě čistého ABS a recyklovaného [18]

Při tisknutí dílů na 3D tiskárně vzniká odpadní materiál (podpory, nepovedené výtisky, staré díly atd.), které by se daly po recyklaci znovu využít. Navíc můžeme využít i díly, které se už dosloužily nebo u nich došlo k meznímu stavu a jsou dále nepoužitelné.

2.5 Recyklace ABS plastu

Jak bylo ve studii dokázáno [19], při recyklaci čistého ABS dochází k degradaci materiálu kvůli vysoké teplotě, které je v průběhu procesu vystavován. Degradace je způsobena štěpením polymerních řetězců, ze kterých je plast tvořen. To se projevuje výrazným snížením houževnatosti, ale naopak pevnost v tahu se mírně zvyšuje [19] [20].

S narůstajícím počtem recyklačních cyklů dochází stále k výraznější ztrátě mechanických vlastností. Ovšem většina studií pracovala s malým počtem recyklačních cyklů. Většinou 5 a méně cyklů [19] [21] [22].

Používá se více metod, jak ztrátě mechanických vlastností zabránit

1. Přidáním aditiv – zvyšující mechanické vlastnosti (př. Modifikátory rázu ...)
2. Přimíchání nerecyklovaného materiálu (používají se totožné i jiné plasty než původní)

Dále bude popisována metoda míchání recyklovaného a nerecyklovaného materiálu, protože se ukazuje jako nejjednodušší metoda, která má dobrý potenciál do budoucna [23]. Navíc tato metoda šetří až 70 % energie nutné pro výrobu recyklovaného materiálu vzhledem k nerecyklovanému ABS [24].

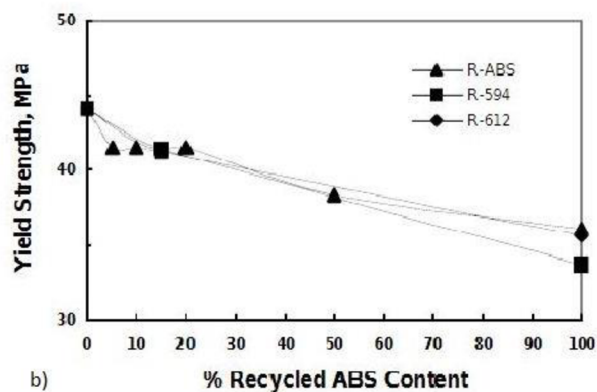
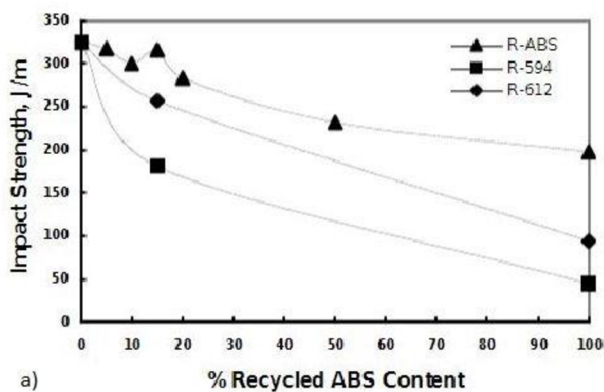
Ve studii [20] zabývající se recyklací ABS bylo dokázáno, že při 10 recyklačních cyklech je opět pozorováno mírné zvýšení pevnosti v tahu. Nárazová pevnost se rapidně snížila a to o 60 % [20].

tab. 2-1 mechanické vlastnosti ABS v závislosti na počtu recyklačních cyklů [20]

Recyklační cyklus	Modul pružnosti Nmm ⁻²	Pevnost v tahu Nmm ⁻²	Nárazová práce kJm ⁻²
0	–	–	–
1	2652 ± 75	48.6 ± 0.3	9.5 ± 0.9
2	2487 ± 49	48.2 ± 0.5	10.5 ± 0.7
3	2596 ± 48	48.9 ± 0.9	8.9 ± 1.0
4	2490 ± 55	47.9 ± 0.5	9.6 ± 1.2
5	2563 ± 69	49.0 ± 0.3	7.0 ± 0.6
6	2513 ± 46	48.5 ± 0.4	8.2 ± 0.8
7	2530 ± 41	49.5 ± 0.6	5.6 ± 0.9
8	2489 ± 73	48.9 ± 0.7	6.1 ± 1.0
9	2462 ± 44	48.9 ± 0.5	6.1 ± 1.7
10	2492 ± 61	49.8 ± 0.4	3.8 ± 0.6

Do inženýrských plastů je přidáváno mnoho aditiv za různými účely, a to zejména kvůli prodloužení životnosti, změně barvy, zpomalení hoření aj. [21]. Pro potřeby recyklace 3D tisknutých dílů, je snazší přidat čisté ABS, protože ho máme k dispozici (granulát, staré díly, podpory...).

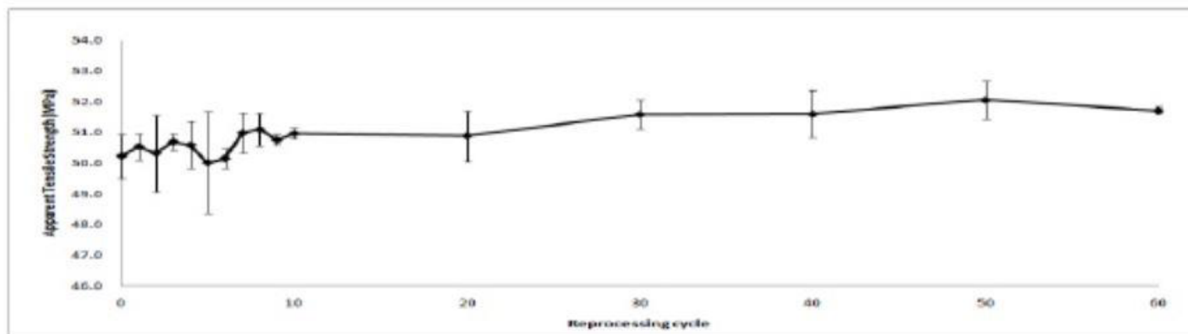
Vlastnosti recyklovaného ABS lze zlepšit přidáním různých aditiv nebo recyklované ABS míchat s čistým nerecyklovaným ABS [25]. Problémem zůstává nutný vysoký podíl čistého materiálu ku recyklovanému, abychom udrželi dobré mechanické vlastnosti. Byla zpracována studie, která popisuje mechanické vlastnosti materiálu v závislosti na podílu čistého a recyklovaného materiálu [25].



obr. 2-8 závislost podílu recyklovaného ABS na a) na rázové houževnatosti; b) mezi kluzu [25]

Jak můžeme vidět z obr. 2-8 a) i b) tak se vlastnosti směsi okolo 15 % recyklovaného materiálu mění jen málo. Od 20 % recyklovaného materiálu až do 50 % recyklovaného materiálu nemáme data, ale grafy naznačují, že se jedná o relativně stabilní oblast.

Podle další studie, která použila 20 % recyklovaného a 80 % čistého materiálu, po 60 recyklačních cyklech dochází k mírnému zlepšení pevnosti v tahu, přibližně o 3 %, ale k mírnému snížení elasticity, asi o 6,3 % [23]. Tato studie se bohužel nezabývala měřením nárazové práce.



obr. 2-9 závislost zdánlivé pevnosti v tahu na počet recyklačních cyklů [23]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Při recyklaci ABS dochází k degradaci a tím i ke zhoršení mechanických vlastností, a to zejména rázové houževnatosti. Existuje více způsobů, jak tomuto zabránit. Pro naši aplikaci se nejvíce hodí metoda přimíchání nerecyklovaného ABS, k již použitému ABS.

Vzhledem k již proběhlým testům se jeví jako nejvhodnější možnost zvolit poměr recyklovaného a nerecyklovaného ABS 25:75. Takovýto poměr by stále mohl vykazovat dobré mechanické vlastnosti, zatímco využijeme velký podíl recyklátu.

Většina experimentů pracovala se vstřikováním plastu do formy, a ne s 3D tiskem. Náš případ se od ostatních bude lišit tím, že ze směsi budeme vyrábět filament pomocí extruze, z něhož budeme následně tisknout FDM metodou zkušební tělíska. Při výrobě filamentu musíme ohlídat jeho průměr. Dále musíme hlídat nečistoty ve filamentu, které by trysku tiskárny mohly ucpat.

Vytisknuté vzorky podrobíme testům podle norem ISO, a to tahové zkoušce, 3 bodému ohybu, indexu toku taveniny.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je ověřit možnosti recyklace dílů vyrobených pomocí 3D tisku. Následnou výrobu filamentu ze vzniklého granulátu a pomocí vhodně navržených experimentů ověřit vlastnosti takového filamentu a dílů z něj vyrobených v porovnání s tiskem z nerecyklovaného materiálu.

Dílní cíle

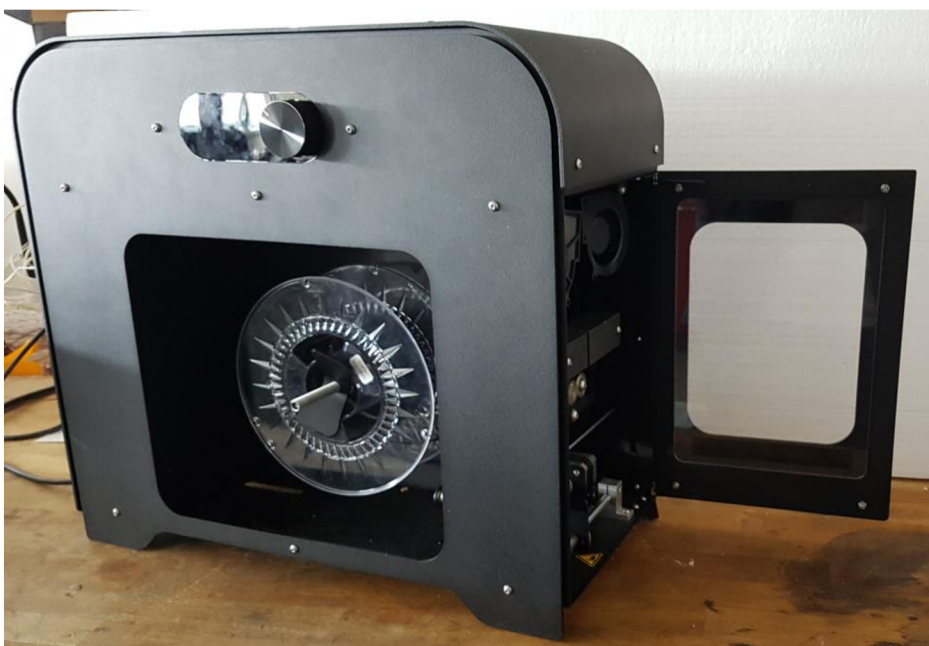
- zajistit výrobu granulátu z dílů vyrobených z ABS plastu
- stanovit parametry a realizovat výrobu filamentů z recyklovaného a běžného materiálu
- stanovit způsob a parametry experimentálního porovnání obou filamentů
- realizovat experimenty
- vyhodnotit výsledky a stanovit závěry

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Použité stroje

4.1.1 Extrudér

Filament bude vyráběn z granulátu na stroji NEXT 1.0 Advanced od firmy 3devo. Tento extrudér je cenově dostupný i pro ty menší firmy.



obr. 4-1 extrudér NEXT 1.0 Advanced od firmy 3devo

Tento extrudér se vyznačuje především úplnou automatizací, přičemž veškeré potřebné funkce a komponenty má v sobě již obsažené. Výsledkem je pak automatická výroba filamentu, hlídání jeho průměru i navíjení na cívku [26].

Extrudér je schopen zpracovat až 0,7 kg materiálu za hodinu. Problémem se jeví rozlišovací schopnost senzoru na kontrolu průměru filamentu, která je 43 μm [26]. Což pro požadovanou přesnost $\pm 50 \mu\text{m}$ nemusí stačit. Do extrudéru je možno vkládat granulát do největšího rozměru 5 mm.

Granulát se do extrudéru sype přes násypku, která navíc slouží i jako zásobník. Odtud je granulát dopravován pomocí šroubu z nitridované oceli skrz 4 topné zóny. Každá zóna má zvlášť nastavitelnou teplotu. Šroub je navíc vybaven speciální míchací částí, kde dochází k mixování materiálu. Což je výborné pro smíchání různých barev nebo více různých materiálů. Po průchodu míchací částí prochází natavený materiál kruhovou tryskou. Zde se z materiálu tvoří filament, který je chlazen ventilátory a natahován podávacím kolečkem. Těsně před podávacím kolečkem je měřen průměr filamentu. Nakonec je filament navíjen na cívku.

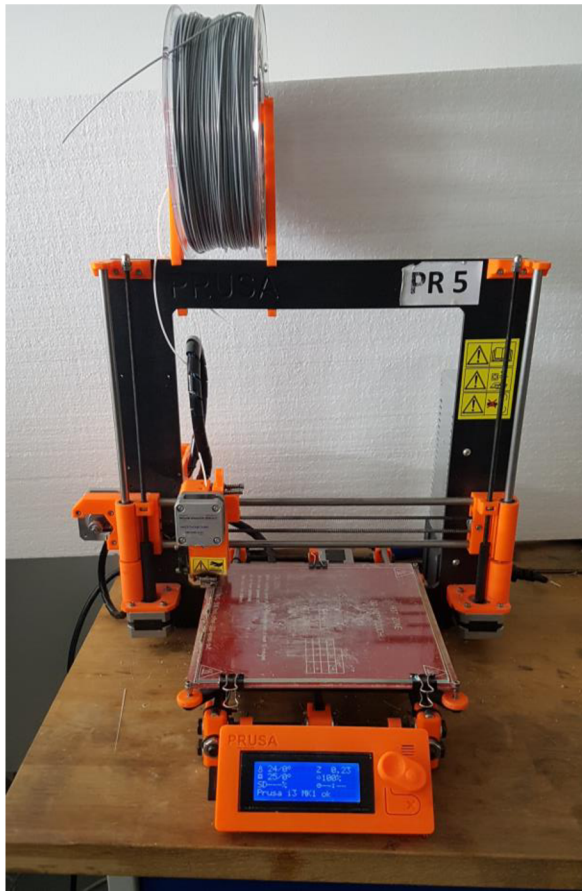
Výrobce dodává extrudér přednastaven pro běžně dostupné plasty, ze kterých se filament vyrábí, což nám ušetří čas s experimentováním. Dále je extrudér vybaven zpětnou vazbou, takže je schopen drobně měnit nastavení pro dosažení optimálního průměru filamentu. Extrudér zaznamenává informace o průběhu extruze. Například teploty jednotlivých topných spirál, rychlost otáčení šneku, průměr filamentu, objem vyextrudovaného materiálu, délku filamentu a další. Tyto informace jsou využívány pro zpětnou vazbu, ale také se dají, po připojení pc k extrudéru, vyexportovat a následně vyhodnotit, čehož je využito i v této práci.

Ohledně používání extrudéru jsme s dalšími studenty natočili krátké instruktážní video, kde popisujeme základní ovládání extrudéru, vyextrahování dat a jeho čištění [27].

4.1.2 3D tiskárna

Pro tisk vzorků z vyrobeného filamentu použijeme tiskárnu Original Průša i3 MK1 od firmy Prusa Research s.r.o. Jedná se o verzi pro tisk z filamentu o průměru 1,75 mm. Předností této tiskárny je nízká cena a velká část jejich součástí je tisknutelná pomocí 3D tisku, což zjednodušuje opravy.

Jedná se o tiskárnu s otevřenou konstrukcí, tudíž si tiskárna neudrží vyšší teplotu, než je teplota okolí. Tiskárna je vybavena vyhřívanou podložkou se skleněnou deskou. To umožňuje vyhřívání dílu ze spodu a alespoň z části zamezovat kroucení dílů vlivem smrštění. Skleněná deska je odnímatelná a pro lepší přilnavost lze na desku nanést lepicí směs. Pro ještě větší přilnavost ABS je možnost aplikovat ABS Juice.



obr. 4-2 Tiskárna Original Průša i3 MK1 od firmy Prusa research

Průša disponuje velikostí tiskového prostoru 21x20x20 cm. Minimální výška vrstvy je 0,05 mm a maximální 0,25 mm. Použitá tryska má výstupní průměr 0,04 mm.

4.2 Vybraný materiál

Jak už bylo zmíněno výše, testován bude plast ABS od firmy Plasty Mladeč, který dodala ve formě filamentu. Filament od Plastů Mladeč má průměr $1.75 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ [28]. Pro potřeby tvorby recyklační směsi dodaly Plasty Mladeč granulát, ze kterého prodáváný filament vyrábějí. Takto se zajistí, že se pracuje se stále stejným materiálem.

Pro čištění extrudéru je potřeba několik speciálních čistících granulátů. Pro hrubé čištění použijeme Devoclean od firmy 3devo. Po použití tohoto čistícího granulátu se používá ještě HDPE, aby vyplavilo čistící granulát a případné zbylé drobné nečistoty. Používá se průhledné HDPE, ve kterém jdou vidět nečistoty či čistící granulát, takže lze poznat, kdy už je extrudér vyčištěn. Na čištění je potřeba velké množství materiálu, a to přibližně 150 g Devocleanu a 100 g HDPE na jedno čištění.

4.3 Návrh experimentu

Aby byl správně simulován proces zpracování materiálu a jeho následná recyklace, je nutné z prodávaného filamentu vytisknout na 3D tiskárně testovací tělíška. Tisknout se bude podle přednastavených parametrů pro tisk ABS, který stroj obsahuje již od výrobce. Tab. 4-1 poskytuje přehled nejdůležitějších parametrů. Objem samotných tělísek nebude pro recyklaci stačit, a proto se za stejných podmínek vytiskne další těleso, které bude sloužit jen jako hmota navíc. Tato hmota navíc bude také tištěna na 3D tiskárně, aby materiál prošel ohřevem na tiskovou teplotu a následným zchlazením.

tab. 4-1 Parametry tisku

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Výška vrstvy [mm]	Výplň [%]	Výplňový vzor	Průměr trysky [mm]
240	100	0,25	100	rectilinear	0,4

Tisknutá tělesa byla vymodelována v programu Inventor od Autodesku a pro vygenerování Gcodu byl použit program Prusa3D Sic3er 1.75 mm od firmy Prusa research pro tiskárnu Prusa i3 MK1.

Následně se tělesa musí podrtit. Vzhledem k absenci drtiče na plasty se díly namelou pomocí frézky a nástrojem s lamačem třísek. Aby nedošlo k teplenému ovlivnění materiálu musí frézka běžet na nízké otáčky (přibližně $60 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$). Takto se vytvoří granulát, který se následně použije při extruzi. Nebyl dostupný vhodnější postup pro vytvoření dostatečně jemného granulátu.

Extruze se jeví jako nejsložitější proces. Jak už bylo zmíněno výše, bude potřeba hmota navíc, a to hlavně kvůli extruzi protože:

- 1) Určitou dobu trvá, než se dosáhne požadovaného průměru filamentu. Extrudér si na základě zpětné vazby upravuje rychlost podávacího kolečka, čímž upravuje průměr filamentu, dokud nedosáhne požadované hodnoty. Požadované hodnoty extrudér ve většině případů docílí rychle a vyextruduje jen pár metrů nepoužitelného filamentu.
- 2) Extrudér se musí po každé změně materiálu čistit čistícím granulátem. Když je poté do extrudéru nasypán granulát ABS, tak se začne mixovat s čistícím granulátem, tudíž určitý čas trvá, než z extrudéru vychází čisté ABS.
- 3) Jakmile se šneku extrudéru nedostává nového materiálu, tak klesá tlak na výstupní trysce a extrudér již není schopen udržet konstantní průměr filamentu. Toto se děje na konci extruze. Z toho důvodu je potřeba materiál navíc. Pokud bychom do extrudéru dávali jiný granulát, aby neklesal tlak (třeba čistící granulát), tak nejsme schopni s určitostí poznat, kdy je filament tímto granulátem kontaminován.

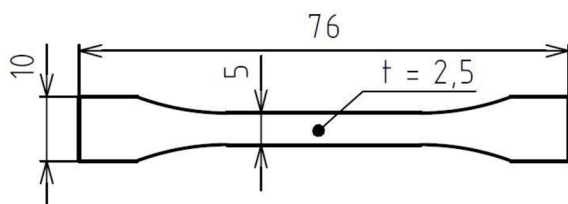
Množství potřebné hmoty navíc je velice složité určit. Navíc se může měnit s každým recyklačním cyklem, kvůli změně vlastností materiálu. Experimentálně byla stanovena hodnota 200 g granulátu. Toto množství je schopno pokrýt ztráty vlivem extruze, a ještě zůstane dostatek materiálu na testovací tělesa a materiál pro další recyklační cyklus.

Extruze může začít, jakmile je k dispozici dostatečné množství granulátu. Vyextrudovaný filament použijeme pro tisk testovacích tělísek a hmoty navíc i pro samotné testy. Původním plánem bylo alespoň 10 recyklačních cyklů, ale vlivem problematické extruze, tvorby granulátu a problémovém tisku kvůli špatnému filamentu, byl počet recyklačních cyklů nakonec snížen na 3.

4.4 Metody vyhodnocování vzorků

4.4.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška bude probíhat podle normy ČSN EN ISO 527-1:2012 na stroji ZWICK Z020. Pro ušetření času tisku bylo vybráno zkušební těleso 1BA, které je malé. Výsledky na tomto tělese sice nejsou srovnatelné s testy na klasickém velkém tělese, ale my se zaměřujeme především na relativní vlastnosti jednotlivých recyklačních cyklů, a ne na absolutní. Pro relevantní posouzení dat je potřeba aspoň 5 těles [29].



obr. 4-3 rozměry tělesa 1BA pro tahovou zkoušku

Výstupem zkoušky je tahový diagram, což je závislost prodloužení na síle. Dále modul pružnosti E , který se určí jako směrnice přímky, která vznikne proložením závislosti v místě lineárního zatěžování. Posledním výstupem je maximální síla F_m , kterou bylo těleso zatěžováno [29].

Očekáváme, že hodnoty modulu pružnosti i maximální síly se nebudou s postupujícími recyklačními cykly měnit, popřípadě je možný mírný nárůst.

4.4.2 Index toku taveniny

Při tepelném zpracování materiálu dochází ke štěpení polymerních řetězců na kratší, což nazýváme degradací. Při štěpení řetězců dochází ke změně tekutosti taveniny, kterou můžeme měřit. Měříme tak, že vytlačujeme roztavený materiál skrz trysku o jasně definované geometrii při dané teplotě a zatížení. Měříme hmotnost protlačeného materiálu za určitý časový úsek. Měření probíhalo na stroji Modular Melt Flow, Model 7024.000 (výrobce CEAST S. p. A., Italy) [30].

Měření provádíme podle normy ISO ČSN 1133 a výstupem je hmotnost protečeného materiálu tryskou v měřeném časovém úseku 10 minut.

4.4.3 Zkouška filamentu

Jelikož pro zkoušení filamentu nejsou žádné normalizované zkoušky, tak se bude filament testovat jako na tahové zkoušce opět na stroji ZWICK Z020. Filament nelze sevřít do čelistí jako tahové tělísko, protože má kruhovitý průřez a v místě sevření by docházelo k deformaci a také ke koncentraci napětí. Proto se místo čelistí použije válec, jehož osa je kolmá k ose napjatosti. Filament se namotá na tento válec.

A jako u tahové zkoušky tělesa měříme modul pružnosti E a maximální sílu F_m . Výsledné hodnoty jednotlivých recyklačních cyklů předpokládáme opět stejné nebo mírně vyšší s postupujícími recyklačními cykly.

4.4.4 3 bodý ohyb

3 bodý ohyb bude probíhat podle normy ČSN EN ISO 178:2011. Těleso je podepřeno 2 podporami a do středu mezi ně tlačí přítlačný trn, který prohýbá dané těleso. Je potřeba alespoň 5 zkušebních těles pro správné vyhodnocení. Výstupem je pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu [31].

Zkušebním tělesem je kvádr o rozměrech:

délka	80 mm
šířka	10 mm
tloušťka	4 mm
rozpětí mezi podporami	64 mm

Pokud nedochází k degradaci materiálu budou výsledky zkoušky neměnné. Pokud bude k degradaci docházet, tak se výsledky výrazně zhorší s postupujícími recyklačními cykly.

5 VÝSLEDKY

Velkým problémem se ukázala samotná extruze. Vyextrudovaný filament nespĺňoval požadované parametry a nepovedlo se udržet konstantní průměr filamentu. Průměry byly tak nesourodé, že byl prakticky znemožněn tisk zkušebních těles, což znemožnilo další testy.

tab. 5-1 charakteristiky filamentu jednotlivých extruzí

vzorek	průměrný průměr [μm]	směrodatná odchylka [μm]	v intervalu [%]	mimo interval [%]
1. RC	1752	90,3	59,46	40,54
2. RC	1748	100,3	51,56	48,44
3. RC	1745	98,9	54,48	45,52
čistý granulát	1751	63,8	72,73	27,27

Tab. 5-1 ukazuje charakteristiky filamentů, které byly vyextrudovány v jednotlivých recyklačních cyklech (RC značí recyklační cyklus) a navíc jsou přidány hodnoty poskytnutého čistého granulátu pro porovnání vlivu recyklátu a nehomogenosti směsi na výsledné vlastnosti.

Jak již bylo výše zmíněno, filamenty se dodávají o průměru $1750 \pm 50 \mu\text{m}$. Proto je v tab. 5-1 ještě uvedeno, kolik procent hodnot tuto toleranci splňovalo a kolik ne.

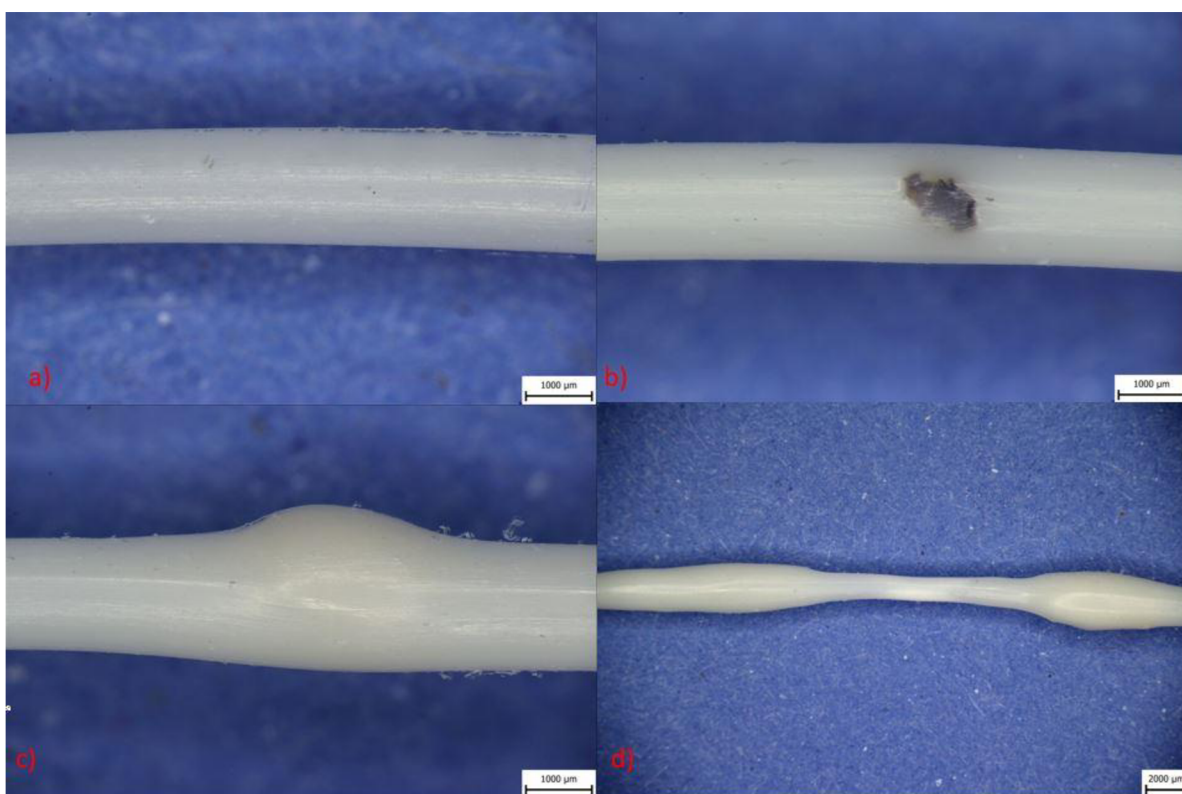
5.1 Zkoušení filamentu

Filament byl zkoušen tahovou zkouškou. Ovšem filament nebyl uchycen jako klasický vzorek mezi čelisti, ale byl namotán na čepu. To proto, aby v místě uchycení nevznikal koncentrátor napětí. Bohužel tento způsob uchycení způsoboval skluz filamentu v čepu při vyvození napětí, které se takto krátkodobě snižovalo. Proto nebylo možné měřit modul pružnosti v tahu E.

tab. 5-2 výsledky tahové zkoušky pro filament

Vzorek	Maximální síla F_m [N]
poskytnutý	$75,05 \pm 1,71$
RC1	$78,17 \pm 3,84$
RC2	$78,46 \pm 1,65$
RC3	$75,15 \pm 3,35$

Jako první je v tabulce uvedený nerecyklovaný poskytnutý filament od Plastů Mladeč. Jako další jsou uvedeny filameny, které prošly recyklačními cykly (RC).



obr. 5-1 fotky filamentů pod mikroskopem. a) filament z poskytnutého granulátu. b) nečistota ve filamentu. c) vyboulenina a otřepy. d) vyboulenina a následné zúžení

Obr. 5-1 zobrazuje filameny pod mikroskopem. V části a) je vidět část filamentu vyrobeného z poskytnutého granulátu s konstantním průměrem. V části b) je patrná nečistota. Jedná se nejspíše o kus degradovaného materiálu. Tyto nečistoty mohou způsobovat ucpání trysky 3D tiskárny. V části c) můžeme vidět vybouleninu a otřepy. Vyboulenina nejspíše vznikla nedostatečným natavením nějakého kusu granulátu. V části d) vidíme vybouleninu, následné zúžení a další vybouleninu. Tento defekt společně většinou způsobuje zaseknutí filamentu v podavači.

5.2 Index toku tekutiny

Jako výchozí materiál byl použit vyextrudovaný filament, který byl nastříhán a poté precizně napěchován do stroje, aby došlo k vytlačení vzduchu a opravdu byl měřen index toku ABS, a ne směsi ABS a vzduchu, což by vnášelo chyby do měření.

tab. 5-3 výsledky indexu toku taveniny (MFR)

Vzorek	MFR [g*10 min ⁻¹]
čistý granulát	58,49
1.RC	66,05
2.RC	67,30
3.RC	61,02

Tab. 5-3 ukazuje výsledky měření indexu toku taveniny. Měření proběhlo pro čistý granulát a poté pro jednotlivé recyklační cykly (RC). Jako parametry zkoušky bylo zvoleno zatížení 10 kg a teplota předehřevu 220 °C. Při stejných podmínkách daný materiál testoval výrobce.

5.3 Tahová zkouška

Vzhledem k rozdílnosti průměrů filamentu nebylo možné kvalitně tisknout zkušební tělesa. Z mnoha výtisků by jen pár mohlo splňovat požadované vlastnosti. Většina výtisků byla nepoužitelná.



obr. 5-2 fotografie nepovedených výtisků a) ucpání trysky b) nedostatečný průtok materiálu

Na obr. 5-2 můžeme vidět nepovedené výtisky zobrazující 2 nečastější problémy při tisku.

- a) Pokud měl filament příliš velký průměr mohl se zaseknout v podavači, kde podávací kolečko vyfrézovalo část filamentu, takže již nemohlo podávat.
- b) Rozdílný průtok materiálu vlivem proměnného průměru, který v některých místech způsoboval nedostatek materiálu a v některých přebytek.



obr. 5-3 fotografie použitého tělesa na tahovou zkoušku

Na obr. 5-3 je možno vidět, že první vrstva je průhledná a zpoza ní prosvítá druhá vrstva. Z toho lze usoudit, že se vlákna nedotýkají a v průřezu vzorku bude tedy spousta nevyplněných míst.

tab. 5-4 výsledky tahové zkoušky

Vzorek	Modul pružnosti E [Mpa]	Maximální síla F_m [N]
0.RC	2075	309
0.RC	2074	306
0.RC	2030	302
0.RC	1970	302
0.RC	1890	289
1.RC	735	133
1.RC	1088	140
1.RC	928	124
2.RC	1428	209
2.RC	1705	250
2.RC	1823	267

Tab. 5-4 ukazuje výsledky tahových zkoušek ze vzorků, které se jevily jako nejvíce povedené. 0.RC značí vzorky tisknuté z poskytnutého filamentu, další pak značí jednotlivé recyklační cykly. Takto nesourodými výsledky jsou zatíženy problémy 3D tisku a nereflektují skutečné mechanické vlastnosti recyklovaného materiálu. Spíše ukazují, že z daného filamentu opravdu nejde uspokojivě tisknout. Vzhledem k nesourodosti výsledků nemá smysl tyto data dále zpracovávat.

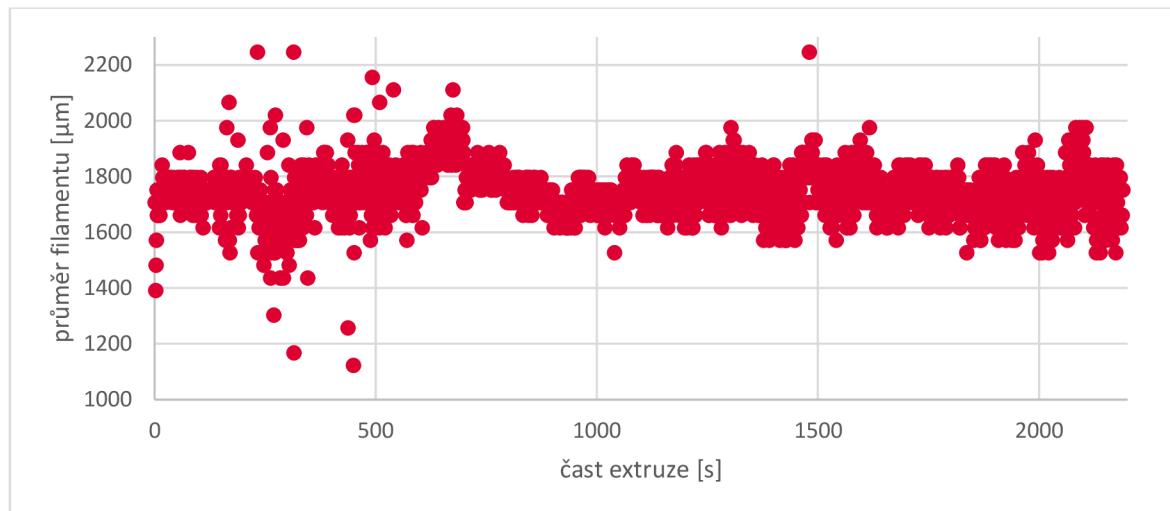
5.4 3 bodý ohyb

Při tisku tělísek na 3 bodý ohyb nastaly stejné komplikace jako při tisku vzorků na tahovou zkoušku. Vzorky na 3 bodý ohyb byly na tisk ještě náročnější, protože mají větší objem, tudíž tiskárnou projde větší množství filamentu a tím roste variabilita průměrů.

Po výsledcích tahové zkoušky se jevílo jako zbytečné pokoušet se o 3 bodý ohyb. Výsledky by s největší pravděpodobností vykazovali stejné problémy jako výsledky tahové zkoušky, kvůli kvalitě 3D tisku.

6 DISKUZE

Při zvoleném poměru recyklovaného a nerecyklovaného granulátu 25:75 % se jako velký problém ukázala tvorba filamentu. Filament tvořený z granulátu vytvořeného nadrcením nedosahoval kvalit běžně dostupných komerčních filamentů. Měl příliš proměnný průměr.



obr. 6-1 průměry filamentu v průběhu extruze při prvním recyklačním cyklu

Obr. 6-1 ukazuje průměry filamentu v průběhu extruze po první recyklaci. Vidíme, že hodnoty průměrů jsou velice proměnné. Hodnoty by se měly držet mezi 1700 μm a 1800 μm, což je často překračováno, někdy i dlouhodobě. Výsledný filament je tak špatně použitelný pro tisk, z důvodu zasekávání filamentu v podavači tiskárny. Podobné výsledky vykazují i filamenty vytvořené i v dalších recyklačních cyklech. Mimo tento interval se pohybuje 40 až 48 % naměřených průměrů pro filament z recyklovaného materiálu. Navíc směrodatná odchylka průměrů se nachází mezi 90 až 100 μm.

Toto se neděje v důsledku špatně zvoleného recyklačního poměru, ale je to způsobeno extrudérem. Nadrcené díly nebyly homogenní. Když byla poté otestována poskytnutá granulární směs, která byla homogenní, tak se v daném intervalu nacházelo 73 % naměřených průměrů, což je výrazné zlepšení. Navíc došlo i ke snížení hodnoty směrodatné odchylky, a to na hodnotu 63,8 μm.

Když byly tyto filamenty poté otestovány tahovou zkouškou, tak je pozorovatelný mírný nárůst maximální síly F_m u filamentů 1. a 2. recyklačního cyklu, a to až o 4,5 %. U 3. recyklačního cyklu došlo ke snížení maximální síly oproti předchozím dvěma cyklům, ale hodnota je pořád vyšší než pro koupený filament. Výsledky odpovídají předpokládaným hodnotám, protože byl očekáván mírný nárůst, který opravdu můžeme pozorovat.

Výsledky tahové zkoušky těles vytisknutých z recyklovaného filamentu odpovídají špatné kvalitě filamentu, ze kterého byly tisknuty. Bohužel nemají odpovídající vypovídající hodnotu vzhledem k materiálovým vlastnostem. U tělesa v prvním recyklačním cyklu se maximální síla F_m pohybuje mezi 124 a 140 N, což je 13 % rozdíl. U druhého recyklačního cyklu se maximální síla F_m pohybuje mezi 209 a 267 N, což je 28 % rozdíl. U koupeného filamentu jsou výsledky mnohem lepší. Maximální síla F_m se pohybuje mezi 289 a 309 N, což je 6 % rozdíl. Z toho lze usuzovat, že takto rozdílné hodnoty vycházejí kvůli špatnému tisku. Jak už bylo zmíněno výše, rozdílný průměr filamentu způsobuje problémy v podavači. Dále kvůli proměnnému průměru dochází k rozdílnému průtoku materiálu tryskou, což opět vyúsťuje v nekvalitní tisk a takto proměnné hodnoty.

Jako alternativa pro lepší kvalitu vytisknutých dílů z recyklovaného filamentu byla použita tiskárna original Průša i3 MK3 vybavena dvěma podávacími kolečky, které by mohly způsobit snazší průchod filamentu. Bohužel se nepodařilo vytisknout žádné použitelné těleso a došlo k zaseknutí filamentu v podavači, takže se takto vzniklá tělesa nepoužila na testování a tímto pokusem nedošlo ke zlepšení.

Při tisku těles u druhého recyklačního cyklu došlo k výraznému zlepšení modulu pružnosti, a také ke snížení rozdílu mezi jednotlivými testy. To bylo způsobeno manuálním protlačením filamentu tryskou, takto to ale při běžném tisku dělat nelze. I přes tento pokus se nepovedlo dosáhnout zkušebních tělísek vhodných pro zkoušku.

Těleso na tahovou zkoušku má menší objem než těleso na 3 body ohyb, tudíž se na tisk použije menší délka filamentu, kde je menší pravděpodobnost velkých výkyvů průměru filamentu. Z tohoto důvodu po prvotních neúspěšných pokusech nemělo smysl tisknout tělesa pro 3 body ohyb.

Pro měření indexu toku taveniny byly použity podmínky, za kterých testoval výrobce a to zátěž 10 kg a teplotu 220 °C. Výrobce používá normu DIN, takže výsledky nebudou srovnatelné. Z toho důvodu byl otestován i čistý granulát, za podmínek udávaných výrobcem.

Pro čistý granulát vyšel index toku taveniny 58,49 g/10*min. Pro recyklační cykly vyšel v rozmezí 61,02 až 67,30 g/10*min. Což mezi cykly činí 9,3 % rozdíl. Mezi čistým granulátem a posledním recyklačním cyklem je jen 4 % nárůst. Vyšší hodnota indexu toku taveniny značí výraznější zmenšení hmotnosti molekul neboli vyšší úroveň degradace. Hodnota pro čistý granulát je nižší než jakákoliv hodnota pro recyklovaný, ale u hodnot pro recyklovaný materiál není pozorována vzestupná tendence. Z toho lze usoudit, že nedochází k degradaci materiálu nebo jen k velmi mírné, která by se mohla projevit až po mnoha recyklačních cyklech. Velké rozdíly mezi jednotlivými měřeními lze vysvětlit extrémními podmínkami testu, a to převážně velkou zátěží. Kdybychom testovali za přívetivějších podmínek, vyšly by nejspíše vzájemně podobnější hodnoty.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo experimentálně porovnat vlastnosti nerecyklovaného a recyklovaného filamentu. Dále prověřit možnosti recyklace dílů. A to tak, že nejdříve otestujeme běžně dostupný filament, ze kterého se následně vytisknou zkušební tělesa na 3D tiskárně, která se také podrobí testům. Takto vzniklý materiál se podrtí a na extruderu se z něj vyextruduje filament, který se podrobí testům a také se z něj vytisknou další zkušební tělesa. To vše, dokud nedosáhneme třech recyklačních cyklů.

Na začátku bylo potřeba stanovit poměr recyklovaného a nerecyklovaného granulátu, protože materiál jen z recyklovaných materiálů rychle degraduje a ztrácí své vlastnosti. Jako ideální byl zvolen poměr 25 % recyklovaného a 75 % nerecyklovaného materiálu. Tento poměr ještě nebyl v nalezených publikacích vyzkoušen a mohl by tvořit hranici proveditelnosti recyklace.

Jako největší problém se ukázala extruze. Vyextrudovaný filament z nadrcených dílů měl velmi nehomogenní průměr. Pro filamenty se uvádí průměr $1750 \pm 50 \mu\text{m}$. V průběhu jednotlivých recyklačních cyklů se v tomto intervalu nacházelo průměrně 55 % z naměřených průměrů. Což je nevyhovující pro následný 3D tisk, který byl z takového filamentu téměř nemožný.

Ukázalo se, že se nejedná o problém zvoleného recyklačního poměru, ale je to způsobeno konstrukcí extrudéru a nehomogenní směsí, která je sypána do extrudéru. I když jednotlivé kusy splňovaly velikostní podmínku, tak ne vždy docházelo k jejich úplnému roztavení a tvořily ve filamentu vybouleniny. Když byl do extrudéru nasypán komerční poskytnutý homogenní granulát, tak se výsledky znatelně zlepšily. Do intervalu průměrů filamentu padlo 73 % z naměřených průměrů. Z toho lze usoudit, že směs materiálu, který je do extrudéru sypán výrazně ovlivňuje kvalitu filamentu, i když splňuje požadavky uvedené výrobcem. Dále by mohlo pomoci, pokud by se zvolilo jiné konstrukční řešení extrudéru. Filament by mohl být napínám přímo namotáváním na cívku, a ne přes podávací kolečka.

Filament byl otestován jako při tahové zkoušce a jak bylo předpokládáno, vykazoval mírný nárůst maximální síly, kterou bylo možno ho táhnout. Nárůst mezi nerecyklovaným filamentem a filamentem 3x recyklovaným byl o 4,5 %.

Kvůli kolísavému průměru filamentu nebylo možné tisknout zkušební tělíska o požadované kvalitě na tahovou zkoušku a 3 body ohyb. Rozdíly u tahové zkoušky maximální síly F_m v jednotlivých měření dosahovaly až 28 % z čehož nelze získat spolehlivé materiálové charakteristiky. Navíc se nepovedlo vytisknout ani dostatečný počet zkušebních těles. Tělesa pro 3 body ohyb se nepovedlo vytisknout vůbec.

Index toku taveniny ukázal, že mezi třetím recyklačním cyklem a nerecyklovaným ABS je jen 4 % rozdíl, který naznačuje, že pokud dochází k degradaci, tak jen k mírné. Ovšem mezi maximální a minimální hodnotou indexu toku taveniny je 15 % rozdíl, což je už značný rozdíl, který je způsoben extrémními podmínkami testu. Pro mírnější podmínky zkoušky by mohly vyjít menší rozdíly.

Cíle bakalářské práce byly splněny. Výsledky naznačují, že při zvoleném recyklačním poměru nedochází k výrazné degradaci materiálu, ale je potřeba tuto hypotézu ověřit při větším počtu recyklačních cyklů. Pro 3 recyklační cykly je tento poměr použitelný a pro 1 recyklační cyklus naprosto dostačující. Většina problémů vzniklých při práci, by se dala vyřešit použitím velkého průmyslového extrudéru, kde nehomogenita směsi nemusela hrát žádnou roli nebo dokonalejším nadrcením vzorků a následným roztříděním přes síta, přičemž by ale ztrácelo velké množství materiálu. Takto byla objevena závislost homogenity směsi na výsledné kvalitě filamentu.

8 CITACE

- [1] *Aditivní technologie - metody Rapid Prototyping* [online]. VUT Brno, b.r. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_techologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [2] How FDM/FFF 3D Printing Technology Works?. *Manufactur3D* [online]. Manufactur3D, 2018 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/working-fdm-fff-3d-printing-technology/>
- [3] Ultimate 3D Printing Materials Guide. *Simplify3D* [online]. 2019 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- [4] HELLEBRAND, Martin. *Recyklace plastů pro potřeby 3D tisku*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
- [5] ABS. *RepRap* [online]. b.r. [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/ABS>
- [6] Bílá EasyABS tisková struna (filament) 1kg. *Prusa Research s.r.o.* [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/tiskove-struny/130-bila-easyabs-tiskova-struna-filament-1kg.html>
- [7] ABS. *Materialpro 3D* [online]. b.r. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [8] AZIMI, Parham, Dan ZHAO, Claire POUZET, Neil CRAIN a Brent STEPHENS. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. *Environmental Science & Technology* [online]. 2016, **50**(3), 1260-1268 [cit. 2019-02-13]. DOI: 10.1021/acs.est.5b04983. ISSN 0013-936X. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b04983>
- [9] Styren. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Styren>
- [10] Degradace stavebních materiálů: Degradace plastů. In: *SERVERU KATEDRY MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ A CHEMIE* [online]. Praha [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/DSM/DSM_10.pdf

- [11] Acrylonitrile butadiene styrene. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene
- [12] Composer and Precision Filament Makers. *3devo* [online]. Utrecht: 3devo, 2016 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <https://3devo.com/next-filament-extruder/>
- [13] KRAFT, Caleb. How It Is Made: 3D Printing Filament. In: *Makezine* [online]. 2015 [cit. 2018-11-18]. Dostupné z: <https://makezine.com/2015/02/11/how-it-is-made-3d-printing-filament/>
- [14] Prusament PLA Prusa Galaxy Black 1kg. *Prusa Research s.r.o.* [online]. 2018 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/711-prusament-pla-prusa-galaxy-black-1kg.html>
- [15] GEYER, Roland, Jenna JAMBECK a Kara LAW. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*. 2017, **3**(7). DOI: 10.1126/sciadv.1700782. ISSN 2375-2548. Dostupné také z: <http://advances.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/sciadv.1700782>
- [16] Nakládání s odpady a recyklace: Rada přijala nová pravidla. In: *Evropská rada Rada Evropské unie* [online]. 2018, **2018** [cit. 2019-05-16].
- [17] BOUSTEAD, I. *Eco-profiles of the European Plastics Industry: Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer (ABS)*. 2005. Brussels: PlasticsEurope, 2005.
- [18] Plastics Recycling. In: *British Plastics Federation 2018* [online]. London, b.r. [cit. 2018-11-10].
- [19] BAI, Xiaojuan, D.H. ISAAC a K. SMITH. Reprocessing acrylonitrile–butadiene–styrene plastics: Structure–property relationships. *Polymer Engineering & Science* [online]. 2007, **47**(2), 120-130 [cit. 2018-11-17]. DOI: 10.1002/pen.20681. ISSN 00323888. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.20681>
- [20] PÉREZ, J., J. VILAS, J. LAZA, S. ARNÁIZ, F. MIJANGOS, E. BILBAO a L. LEÓN. Effect of Reprocessing and Accelerated Weathering on ABS Properties. *Journal of Polymers and the Environment* [online]. Boston: Springer US, 2010, **18**(1), 71-78 [cit. 2018-11-13]. DOI: 10.1007/s10924-009-0154-7. ISSN 1566-2543.

- [21] BARTHES, Marie-Lise, Olivier MANTAUX, Matthieu PEDROS, Eric LACOSTE a Michel DUMON. Recycling of aged ABS from real WEEE through ABS/PC blends in the ABS-rich compositions. *Advances in Polymer Technology* [online]. 2012, **31**(4), 343-353 [cit. 2018-11-17]. DOI: 10.1002/adv.20257. ISSN 07306679. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adv.20257>
- [22] KARAHALIOU, E.-K. a P.A. TARANTILI. Stability of ABS compounds subjected to repeated cycles of extrusion processing. *Polymer Engineering & Science* [online]. 2009, **49**(11), 2269-2275 [cit. 2018-11-17]. DOI: 10.1002/pen.21480. ISSN 00323888. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.21480>
- [23] CHIN, Ng, Nik MIZAMZUL MEHAT, Shahrul KAMARUDDIN a Zulkifli ARIFF. A Degradation Study of Virgin and Recycled ABS Blends Subjected to Multiple Processing. *International Journal of Research in Mechanical Engineering* [online]. 2013, **2013**(1) [cit. 2018-11-17]. ISSN 2347-5188. Dostupné z: http://www.academia.edu/5728193/A_Degradation_Study_of_Virgin_and_Recycled_ABS_Blends_Subjected_to_Multiple_Processing
- [24] SANTOS, Palova a Sérgio PEZZIN. Mechanical properties of polypropylene reinforced with recycled-pet fibres. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, **143-144**, 517-520 [cit. 2019-03-08]. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00391-1. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013603003911>
- [25] RUIFENG, Liang a Gupta RAKESH. *The effect of residual impurities on the rheological and mechanical properties of engineering polymers separated from mixed plastics* [online]. 2001 [cit. 2018-11-17]. ISSN 2347-5188. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/242296891_The_effect_of_residual_impurities_on_the_rheological_and_mechanical_properties_of_engineering_polymers_separated_from_mixed_plastics
- [26] *THE NEXT 1.0*. Zonnebaan: 3devo, 2016.
- [27] VUT - UK - Extruder Tutorial. In: *You Tube* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=teGWks_qSiE
- [28] Filament 1,75 ABS - bílá 1 kg. In: *Filament PM* [online]. Hanovice, b.r. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/filament-1-75-abs-bila-1-kg/p6>
- [29] *ČSN EN ISO 527-1*. 640604. Zlín: Institut pro testování a certifikaci a. s., 2012.

- [30] *ČSN EN ISO 1133-1*. 640861. Zlín: Institut pro testování a certifikaci a.s., 2012.
- [31] *ČSN EN ISO 178*. 640607. Zlín: Institut pro testování a certifikaci a. s., 2011.
- [32] *ABS plastics* [online]. b.r. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <http://what-when-how.com/materialsparts-and-finishes/abs-plastics/>
- [33] Extrusion process 1. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Extrusion_process_1.png

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Příklady použitých fyzikálních veličin

F_m maximální síla v jedné ose

E modul pružnosti

d průměr

9.2 Příklady použitých zkratk

MFR index toku taveniny

FDM Fused deposition modeling

ABS Akrylonitril butadien styren

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1 Tisk metodu FDM [2].....	14
obr. 2-2 ABS granulát.....	16
obr. 2-3 Emise vznikající při tisku [8].....	17
obr. 2-4 Vlastnosti jednotlivých složek ABS na jeho vlastnosti [29]	18
obr. 2-5 Extruze pomocí šroubu [30]	19
obr. 2-6 Co se děje s vyhozeným plastem [15].....	20
obr. 2-7 Srovnání emisí vzniklých při výrobě čistého ABS a recyklovaného [18].....	21
obr. 2-8 závislost podílu recyklovaného ABS na a) na rázové houževnatosti; b) mezi kluzu [25]	23
obr. 2-9 závislost zdánlivé pevnosti v tahu na počet recyklačních cyklů [23]	23
obr. 4-1 extrudér NEXT 1.0 Advanced od firmy 3devo	25
obr. 4-2 Tiskárna Original Průša i3 MK1 od firmy Prusa research	27
obr. 4-3 rozměry tělesa 1BA pro tahovou zkoušku.....	30
obr. 5-1 fotky filamentů pod mikroskopem. a) filament z poskytnutého granulátu. b) nečistota ve filamentu. c) vyboulenina a ořepy. d) vyboulenina a následné zúžení	33
obr. 5-2 fotografie nepovedených výtisků a) ucpání trysky b) nedostatečný průtok materiálu	34
obr. 5-3 fotografie použitého tělesa na tahovou zkoušku.....	35
obr. 6-1 průměry filamentu v průběhu extruze při prvním recyklačním cyklu	37

11 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1 mechanické vlastnosti ABS v závislosti na počtu recyklačních cyklů [20]	22
tab. 4-1 Parametry tisku	28
tab. 5-1 charakteristiky filamentu jednotlivých extruzí	32
tab. 5-2 výsledky tahové zkoušky pro filament	33
tab. 5-3 výsledky indexu toku taveniny (MFR).....	34
tab. 5-4 výsledky tahové zkoušky	35