

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi

**RECYKLACE PLASTOVÉHO ODPADU S CÍLEM
PŘÍPRAVY MATERIÁLŮ PRO 3D TISK**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Vít Kružík

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Lucie Zárybnická, Ph.D.

Jihlava 2025

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: **Bc. Vít Kružík**

Studijní program: Aplikovaná technika pro průmyslovou praxi

Garant studijního programu: doc. Ing. Rašek Kolman, Ph.D.

Název práce: **Recyklace plastového odpadu s cílem přípravy materiálů pro 3D tisk**

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Lucie Zárybnická, Ph.D.

Cíl práce: Produkce plastového odpadu je aktuálním problémem s dopadem na odpadové hospodářství. Recyklací vhodně zvoleného plastového odpadu do podoby filamentu, který by měl dále znovu uplatnění ve zpracování pomocí aditivních technologií bude mít pozitivní dopad, jelikož obliba např. technologie Fused filament fabrication (FFF) je stále na vzestupu i pro hobby uživatele. Cílem diplomové práce je tedy připravit recyklovaný filament, který bude zhodnocen z hlediska fyzikálních a mechanických charakteristik. Následně bude filament použit pro samotný 3D tisk technologií FFF pro přípravu vzorků na testování fyzikálně-mechanických vlastností.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá výrobou filamentu z recyklovaného polyethylentereftalátu (rPET) určeného pro 3D tisk technologií Fused Filament Fabrication (FFF) s cílem připravit vzorky na testování vybraných základních fyzikálně-mechanických vlastností. Filament byl vyroben pomocí šnekové extruze z drcených PET lahví. Výsledky testování prokázaly, že filament z rPET je vhodný pro výtisky určené k méně náročným aplikacím. Práce přispívá k rozvoji udržitelných přístupů v oblasti aditivní výroby a potvrzuje potenciál využití rPET jako alternativního materiálu pro 3D tisk.

Klíčová slova

Recyklace; extruze filamentu; polyethylentereftalát; 3D tisk; mechanické testování

Abstract

The thesis deals with the production of filament from recycled polyethylene terephthalate (rPET) intended for 3D printing using Fused Filament Fabrication (FFF) technology with the aim of preparing samples for testing selected basic physical and mechanical properties. The filament was produced using screw extrusion from crushed PET bottles. The test results showed that the rPET filament is suitable for prints intended for less demanding applications. The work contributes to the development of sustainable approaches in the field of additive manufacturing and confirms the potential of using rPET as an alternative material for 3D printing.

Keywords

Recycling; filament extrusion; polyethylene terephthalate; 3D printing; mechanical testing

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

Při zpracování práce byly využity nástroje umělé inteligence ChatGPT, Perplexity a NotebookLM, a to pro korekci a překlad textu a pro podporu při vyhledávání informačních zdrojů. Odborný obsah a závěry jsou výsledkem samostatné práce autora.

V Jihlavě dne 26. listopadu 2025

.....

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji Ing. Mgr. Lucii Zárybnické, Ph.D. za odborné rady a vedení mé práce. Dále děkuji Bc. Stanislavovi Kunáškoví za zapůjčení 3D tiskárny.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek	9
Seznam zkratk.....	10
Úvod	12
1 Teoretická část	13
1.1 Polymery	13
1.2 3D tisk	15
1.3 Výroba filamentu pro FFF 3D tisk	29
1.4 Výroba filamentu z recyklovaného PET ve formě drtiny	30
2 Experimentální část	33
2.1 Příprava materiálu pro 3D tisk vzorků	33
2.2 3D tisk zkušebních vzorků.....	42
2.3 Výroba filamentu z „čirých“ PET lahví	48
2.4 Metody testování vstupních materiálů a připravených vzorků.....	49
3 Výsledky a diskuse.....	51
3.1 Výsledky testování vstupních materiálů a filamentů.....	51
3.2 Vyhodnocení testování připravených vzorků	55
3.3 Porovnání s jinými existujícími řešeními využívající PET lahve k 3D tisku	66
3.4 Možnosti optimalizace stávajícího řešení.....	69
Závěr	70
Seznam použité literatury	71
Přílohy.....	77

Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení polymerů dle teplotního chování	14
Obr. 2: Schéma BJT.....	16
Obr. 3: Schéma DED	17
Obr. 4: Schéma MEX.....	18
Obr. 5: Schéma MJT	19
Obr. 6: Schéma PBF.....	20
Obr. 7: Schéma SHL.....	20
Obr. 8: Schéma VPP.....	21
Obr. 9: Kartézská tiskárna	23
Obr. 10: Delta tiskárna	24
Obr. 11: CoreXY tiskárna	25
Obr. 12: Polární tiskárna	25
Obr. 13: Pásová tiskárna	26
Obr. 14: SCARA tiskárna	26
Obr. 15: Komponenty 3D tiskárny.....	28
Obr. 16: Detail hot endu	29
Obr. 17: Jednošneková extruze.....	30
Obr. 18: Zalamovací nůž, kuchyňské a zahradní nůžky.....	33
Obr. 19: Kuchyňské síto.....	34
Obr. 20: Původní sestava pro výrobu filamentu	34
Obr. 21: Výsledná sestava pro výrobu filamentu.....	34
Obr. 22: Rozstříhnutí hrdla.....	35
Obr. 23: Prodloužení řezů po rozstříhnutí	36
Obr. 24: Oddělení spodní části.....	36
Obr. 25: Odříznutí etikety	37
Obr. 26: Oplachování PET lahví.....	37
Obr. 27: Sušení PET lahví.....	38
Obr. 28: Rozstříhané proužky PET lahve k drcení	38
Obr. 29: Rozstříhaná spodní část PET lahve.....	38
Obr. 30: Volitelné zmenšení tvrdších částí PET lahve	39
Obr. 31: Čtyřikrát nadrcený plastový odpad z PET lahve	40
Obr. 32: Nedostatečně zmenšené části PET lahve.....	40
Obr. 33: Filament vzniklý při nižších teplotách	41
Obr. 34: Vznikající filament při optimální teplotě.....	41
Obr. 35: Nečistota obsažená ve filamentu.....	42
Obr. 36: 3D tiskárna InfinityForge.....	42
Obr. 37: První testovací výtisk.....	43
Obr. 38: Druhý testovací výtisk – nedokončen	43
Obr. 39: Třetí testovací výtisk	44
Obr. 40: Čtvrtý testovací tisk – nedokončený	44
Obr. 41: Opakování čtvrtého testovacího tisku	45
Obr. 42: Pátý testovací tisk	45

Obr. 43: Šestý testovací tisk	46
Obr. 44: Nedokončený výtisk modelu pro tahovou zkoušku	46
Obr. 45: Sedmý testovací tisk.....	46
Obr. 46: Osmý testovací tisk	47
Obr. 47: Nedokončený devátý testovací tisk	47
Obr. 48: „Čiré“ PET lahve	48
Obr. 49: Extruze filamentu z „čirého“ PET odpadu	49
Obr. 50: Zkouška ohybem	50
Obr. 51: Velikost drtin propadlých skrz síto (20x zvětšeno)	52
Obr. 52: Termická analýza – rozdrčený odpad z různobarevných PET lahví.....	53
Obr. 53: Termická analýza – rozdrčený odpad z čirých PET lahví	53
Obr. 54: Termická analýza – filament z různobarevných PET lahví	54
Obr. 55: Termická analýza – filament z čirých PET lahví	54
Obr. 56: Vzorky pro ohybovou zkoušku (50x zvětšeno).....	58
Obr. 57: Detail boční struktury vzorků pro ohybovou zkoušku (50x zvětšeno)	59
Obr. 58: Struktura vzorků pro tahovou zkoušku (50x zvětšeno)	60
Obr. 59: Detail struktury vzorku pro tahovou zkoušku (50x zvětšeno)	61
Obr. 60: Struktura vzorků z „čirého“ PET pro tahovou zkoušku (50x zvětšeno)	61
Obr. 61: Porovnání struktury vzorků pro tahovou zkoušku (50x zvětšeno).....	62
Obr. 62: Tahový diagram – vzorky z různobarevného PET.....	63
Obr. 63: Tahový diagram vzorků z čirého PET.....	64
Obr. 64: Ohybový diagram	65
Obr. 65: Filament vyrobený z pásky PET lahve	66
Obr. 66: Tvar profilu filamentu vyrobeného z pásky PET lahve.....	67
Obr. 67: Násypka s extruderem pro přímý 3D tisk.....	68
Obr. 68: Struktura vzorků vytištěných přímým 3D tiskem	68

Seznam tabulek

Tab. 1: Rozdělení technologie 3D tisku	16
Tab. 2: Výsledky studie Çava a Aslan	32
Tab. 3: Podmínky prvního testovacího tisku	43
Tab. 4: Druhý testovací tisk	43
Tab. 5: Třetí testovací tisk	43
Tab. 6: Čtvrtý testovací tisk	44
Tab. 7: Pátý testovací tisk	45
Tab. 8: Šestý testovací tisk	45
Tab. 9: Sedmý testovací tisk	46
Tab. 10: Osmý testovací tisk	47
Tab. 11: Devátý testovací tisk	47
Tab. 12: Tiskové parametry pro tisk vzorků	48
Tab. 13: Velikost drtin propadlých skrz síto	51
Tab. 14: Naměřené hodnoty hmotnostního indexu toku taveniny	55
Tab. 15: Naměřené rozměry vzorků z různobarevného PET pro zkoušku tahem	56
Tab. 16: Naměřené rozměry vzorků z různobarevného PET pro zkoušku ohybem	56
Tab. 17: Naměřené rozměry vzorků z čirého PET pro zkoušku tahem	57
Tab. 18: Průměrné hodnoty drsnosti povrchu	62
Tab. 19: Výsledky zkoušky tahem pro vzorky z různobarevného PET	63
Tab. 20: Výsledky zkoušky tahem pro vzorky z čirého PET	64
Tab. 21: Porovnání naměřených tahových napětí	64
Tab. 22: Výsledky zkoušky ohybem	65
Tab. 23: Porovnání naměřených ohybových napětí	66

Seznam zkratek

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASTM	American Society for Testing and Materials (Americká společnost pro zkoušení a materiály)
BJT	Binder Jetting (Vazebné tryskání)
CAD	Computer-aided design (Počítačem podporované projektování)
DED	Directed Energy Deposition (Řízená energetická depozice)
DLP	Digital Light Processing (Digitální zpracování světla)
EBM	Electron Beam Melting (Tavení elektronovým paprskem)
EVA	Ethylenvinylacetát
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelování tavným nanášením)
FFF	Fused Filament Fabrication (Výroba tavným filamentem)
G-kód	Geometrický kód
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
LCD	Liquid Crystal Display (Displej z tekutých krystalů)
MEX	Material Extrusion (Vytlačování materiálu)
MJT	Material Jetting (Tryskání materiálu)
PBF	Powder Bed Fusion (Fúze práškového lůžka)
PC	Polykarbonát
PCL	Polykaprolakton
PE	Polyethylen
PEKK	Polyetherketonketon
PET	Polyethylentereftalát
PET-B	Bottle grade polyethylene terephthalate (Lahvový typ polyethylentereftalátu)
PLA	Polylactic acid (Kyselina polymléčná)
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluoretylen
rPET	Recyklovaný polyethylentereftalát

SCARA	Selective Compliance Assembly Robotic Arm (Robotické rameno s volbou výběru pohybu)
SHL	Sheet Lamination (Listová laminace)
SHS	Selective Heat Sintering (Selektivní tepelné sintrování)
SLA	Stereolithography (Stereolitografie)
SLS	Selective Laser Sintering (Selektivní spékání laserem)
TPU	Termoplastický polyuretan
VPP	Vat Photopolymerization (Nádržová fotopolymerizace)

Úvod

Recyklace plastového odpadu patří mezi aktuální témata. Stoupající objem výroby plastových produktů vede k potřebě hledat nové způsoby, jak efektivně využít plastový odpad. Jedním z možných řešení je jeho zpracování v rámci aditivní výroby. Popularita 3D tisku je na vzestupu, především metoda Fused Filament Fabrication (FFF), která díky své jednoduchosti patří mezi nejrozšířenější technologie 3D tisku jak v průmyslu, tak pro hobby aplikace (OECD, 2022; Cruz Sanchez a kol., 2020; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019; Shaqour a kol., 2020).

Jedním z nejčastěji používaných plastů, ze kterého jsou vyráběny nápojové obaly, je polyethylentereftalát (PET) (Soong, Sobkowicz a Xie, 2022). Snadná dostupnost PET lahví jej činí vhodným kandidátem pro recyklaci a následně k využití pro výrobu tiskového materiálu ve formě filamentu pro metodu FFF. Recyklovaný PET (rPET) tak může představovat levnější a ekologicky šetrnější alternativu ke komerčně dostupným tiskovým materiálům.

Cílem předložené diplomové práce je experimentálně ověřit možnost využití recyklovaného PET pro výrobu filamentu určeného k 3D tisku metodou FFF. V rámci práce jsou nejprve představeny základní polymery a jejich vlastnosti, technologie 3D tisku, princip výroby filamentu pomocí šnekové extruze a výroba filamentu z recyklovaného PET. Na tuto sekci navazuje experimentální část, v níž je popsán proces přípravy rPET materiálu, výroba vlastního filamentu, následný 3D tisk zkušebních vzorků. Vyhodnocení jejich mechanicko-fyzikálních vlastností je uvedeno v kapitole Výsledky a diskuse.

Výsledky práce by měly přispět k posouzení použitelnosti recyklovaného PET jako materiálu pro aditivní výrobu a rozšířit poznatky o možnostech využití recyklovaných polymerů v oblasti 3D tisku.

1 Teoretická část

Teoretická část diplomové práce se zaměřuje na základní vhled do problematiky 3D tisku s hlavním zaměřením na metodu FFF, která je použita v rámci experimentální části. Nejprve jsou popsány základní vlastnosti polymerů, které tvoří základní materiálovou bázi pro 3D technologii FFF. Závěrečná část kapitoly se věnuje principu výroby filamentu pomocí šnekové extruze a výrobou filamentu z rPET.

1.1 Polymery

Polymer je látka, která se skládá z monomerů. Molární hmotnost polymerů se běžně pohybuje mezi 10^3 a 10^6 g/mol. Polymerní látky se skládají z opakujících se strukturních jednotek. Polymery jsou rozsáhlou skupinou materiálů a nedílnou součástí moderního života (Namazi, 2017).

Polymery jsou v převážné většině aditivovány pro průmyslové využití, poté již hovoříme o plastech (Coleman, 2011). Plasty, vyráběné z molekul získaných z ropy, ropných derivátů a biologických zdrojů, jsou tvořeny syntetickými nebo polysyntetickými polymery a všeobecně se vyznačují nízkou hmotností, dostatečnou pevností a pružností (Anderson, Zagorski, Cross, 2024; Stahl, 2025).

Od roku 1950 dosáhla celosvětová produkce plastů zhruba 9 200 milionů tun. Z toho se odhaduje, že s 60 až 99 miliony tun plastového odpadu je špatně nakládáno. Od roku 1950 nebylo recyklováno 91 % plastového odpadu. V současné době 32 % plastů skončí v přírodě, 40 % je uloženo na skládkách, 14 % je spáleno a 14 % je recyklováno (Williams a Rangel-Buitrago, 2022).

1.1.1 Historie

Historie polymerů sahá do doby před mnoha miliony let, kdy se z jednoduchých plynných molekul začaly tvořit životodárné organické struktury. Historii polymerů lze rozdělit do tří období (Burford, 2019).

První doba (prehistorie až 40. léta 20. století) začala před mnoha tisíci lety, kdy bylo využíváno přírodních vláken, například vlny. Do tohoto období lze také zařadit kreativní využití kaučuku z kaučukovníku brazilského Aztéky k rekreačním účelům, což je datováno v 15. a 16. století. Využití polymeru ve formě kaučuku rozpuštěného v naftě je spojeno se jménem Charles Macintosh, který ho ve 20. letech 19. století používal k výrobě nepromokavých oděvů. Důležitým milníkem tohoto období je rok 1844, kdy si Charles Goodyear nechal patentovat technologii vulkanizace, na kterou přišel náhodou, když vystavil kaučuk rozlité síře na kamnech. Dalším důležitým milníkem je rok 1869, kdy došlo k patentování celuloidu, který byl původně vytvořen Johnem Hyattem jako náhražka kulečnickových koulí ze slonoviny. V roce 1907 byl vyvinut bakelit Leem Baekelandem, tento vynález bývá spojován se zrozením syntetického polymerního průmyslu, jelikož se jedná o první zcela syntetický polymer. Dalšími příklady objevených polymerů jsou polyvinylchlorid objevený v roce 1926, polystyren objevený v roce 1931, polychloropren objevený v roce 1932 nebo nylon objevený v roce 1935 (Burford, 2019).

Druhá doba (40. leta 20. století až 70 léta 20. století) je spojená s velkou celosvětovou expanzí průmyslové výroby, ke které docházelo od 40. do 70. let 20. století. Jedním z nejdůležitějších objevů byl v roce 1953 vysokohustotní polyethylen, za který v roce 1963 získal Karel Ziegler Nobelovu cenu. V 50. a 60. letech 20. století byly plasty vřele přijímány, jelikož tradiční materiály, jako keramika, sklo či kovy, byly ve srovnání s nimi těžké, křehké nebo náchylné ke korozi (Burford, 2019).

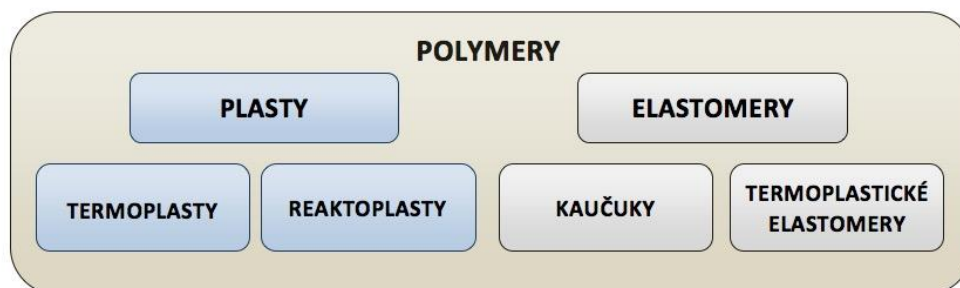
Třetí doba (Od 21. století, s počátky v pozdních 80. letech, do současnosti) je spjatá s enviromentálními výzvami, jelikož levné a neustále zdokonalované polymery v kombinaci s růstem populace a zvyšující se prosperitou vedly k nárustu objemu vyřazeného polymerního odpadu. To má za následek zhoršování postojů veřejnosti vůči výrobkům z plastu. V současné době se objevují nové technologie, jejichž účelem je snižování a recyklace plastového odpadu. Příkladem můžou být plně recyklovatelné PET lahve či tendence k používání tenčích obalů (Burford, 2019).

1.1.2 Rozdělení

Polymery lze rozdělit podle (CMU, c2025; Bhardwaj, Kori a Mishra, 2015; UNSW Sydney, 2025; Běhálek, 2015; Sciencedoze, 2021):

- původu – přírodní (např. celulóza, proteiny), syntetické (např. nylon, polyethylen),
- struktury – lineární (např. polyvinylchlorid, nylon), rozvětvené (např. glykogen, nízkohustotní polyethylen), zesíťované (např. bakelit, močovinoformaldehydová pryskyřice),
- teplotního chování – termoplasty (např. polyethylen, polypropylen), reaktoplasty (např. polyesterová pryskyřice, epoxidová pryskyřice), elastomery (např. přírodní kaučuk, butadienový kaučuk),
- složení – homopolymery (např. polyethylen), kopolymery (např. akrylonitrilbutadienstyren),
- přípravy – polymery připravené polymerací (např. polystyren, polyvinylchlorid), polykondenzací (např. polyamidy, polyestery) nebo polyadící (např. polyuretan, epoxidová pryskyřice).

Jako nejzákladnější rozdělení z hlediska zpracování polymerů lze považovat rozdělení dle teplotního chování (viz Obr. 1), podle kterého lze polymery dělit na elastomery, do kterých spadají kaučuky a termoplastické elastomery, a na plasty, do kterých patří termoplasty a reaktoplasty (Běhálek, 2015).



Obr. 1: Rozdělení polymerů dle teplotního chování

Zdroj: Běhálek (2015)

Termoplasty při zahřátí měknou a stávají se tvárnými, při ochlazení opět „ztvrdnou“. Termoplast lze opakovaně zahřívat (Performance Plastics, 2024; Strojař, 2025).

Reaktoplasty během výroby procházejí chemickou reakcí, která se označuje jako vytvrzování nebo zesíťování. Při této reakci získávají nevratně daný tvar a nelze je již znovu roztavit a přetvářet (Performance Plastics, 2024; Strojař, 2025).

Elastomery jsou charakteristické svou pružností za běžných podmínek, lze je výrazně deformovat a po odstranění zatížení jsou schopny se vrátit do původního tvaru (Performance Plastics, 2024; Strojař, 2025).

Hlavní rozdíly mezi termoplasty, reaktoplasty a elastomery lze shrnout do tří samostatných kategorií – tepelné vlastnosti, recyklovatelnost a využití (Performance Plastics, 2024).

Tepelné vlastnosti (Performance Plastics, 2024):

- termoplasty – při zahřívání měknou, lze je opakovaně přetvářet,
- reaktoplasty – při zahřátí a chemické reakci dochází k vytvrzení, reaktoplast trvale „ztvrdne“ a nelze jej opakovaně zahřívat a přetvářet,
- elastomery – za běžných (teplotních) podmínek jsou velmi pružné.

Recyklovatelnost (Performance Plastics, 2024):

- termoplasty – obecně recyklovatelné,
- reaktoplasty – velmi obtížně recyklovatelné,
- elastomery – některé typy elastomerů jsou recyklovatelné.

Využití (Performance Plastics, 2024):

- termoplasty – široké uplatnění v obalových materiálech, spotřebním zboží, automobilových dílech,
- reaktoplasty – vhodné pro aplikace vyžadující vysokou tepelnou a mechanickou odolnost, například v letecké technice nebo elektronice,
- elastomery – používají se pro těsnění, pneumatiky a pružné součástky.

1.2 3D tisk

Princip 3D tisku je založen na postupném nanášení materiálu vrstvu po vrstvě s ohledem na připravený model (Gibson a kol., 2021; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019).

Proces výroby pomocí 3D tisku se skládá z několika základních kroků. Nejprve je zapotřebí vytvořit 3D model, toho lze docílit pomocí computer-aided design (CAD) softwarů nebo pomocí 3D skenování. Vytvořený 3D model se následně převede do formátu .stl, který se zpracuje v softwaru zvaném slicer. Ve sliceru dochází k rozřezání virtuálního modelu na jednotlivé vrstvy a vytvoření G-kódu (geometrický kód), ve kterém jsou obsaženy instrukce pro tiskárnu nezbytné pro výrobu 3D objektu. Dále je nutné připravit tiskárnu k samotnému tisku, například doplnit materiál k tisknutí, poté následuje samotný 3D tisk. Po samotném 3D tisku je prováděn post-processing, který zahrnuje odlepení výtisku od tiskové podložky, odstranění přebytečného materiálu atp. (Gokhare, Raut a Shinde, 2017; U.S. Department of Energy, 2014)

1.2.1 Rozdělení technologie 3D tisku

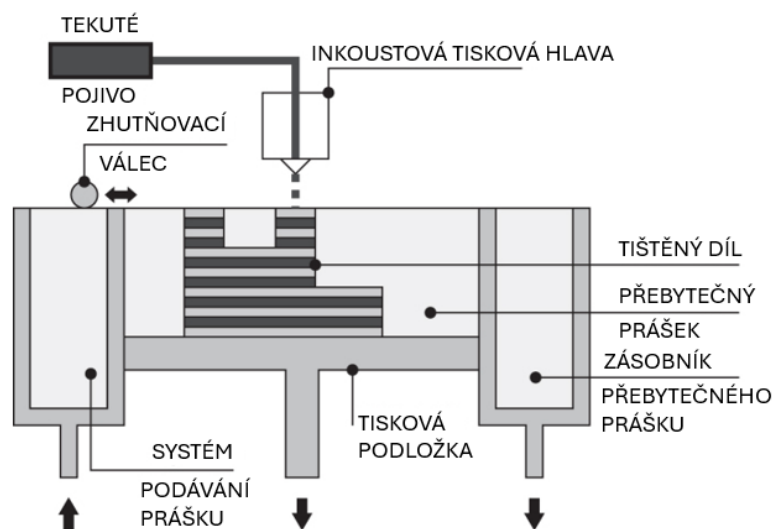
Podle normy American Society for Testing and Materials (ASTM) F2792 (ASTM International, 2012) se technologie 3D tisku dělí do sedmi kategorií, v následující tabulce (Tab. 1) jsou zaznamenány jednotlivé kategorie (Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019; Skopal, 2018; Koltsaki a Mavri, 2024).

Tab. 1: Rozdělení technologie 3D tisku

Název technologie	Zkratka	Český překlad
Binder jetting	BJT	Vazebné tryskání
Directed energy deposition	DED	Řízená energetická depozice
Material extrusion	MEX	Vytlačování materiálu
Material jetting	MJT	Tryskání materiálu
Powder bed fusion	PBF	Fúze práškového lůžka
Sheet lamination	SHL	Listová laminace
Vat photopolymerization	VPP	Nádržová fotopolymérisace

Zdroj: Vlastní zpracování dle Shahrubudin, Lee a Ramlan (2019); Skopal (2018); Koltsaki a Mavri (2024)

Binder jetting (BJT) je technologie, která byla vyvinutá počátkem 90. let. Princip technologie spočívá v nanášení pojiva na vrstvy prášku. Systém BJT je složen ze zásobníku pojiva, tiskové hlavy, trysky pro nanášení pojiva na stavební platformu, dávkovacího systému pro prášek a válce pro zhutnění a vyrovnaní vrstev. Technologie je vhodná k výrobě forem pro odlitky, slinutých výrobků nebo velkých výrobků z písku. Použitými materiály pro tisk mohou být kovy, písek, polymery, keramika nebo jejich kombinace. Předností technologie je její jednoduchost, rychlost, nízké náklady a možnost výroby velkých objektů (Koltsaki a Mavri, 2024; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019). Princip technologie je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 2).

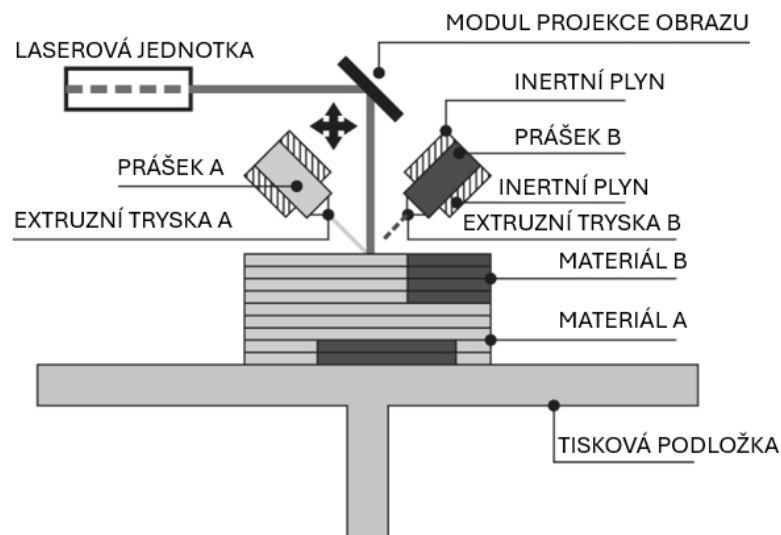


Obr. 2: Schéma BJT

Zdroj: Koltsaki a Mavri (2024)

Directed energy deposition (DED) je technologie vzniklá roku 1995 v Sandia National Laboratories. Jedná se o poměrně složitou technologii 3D tisku, která nachází uplatnění v opravách nebo při doplňování materiálů na již existující součásti. Mezi výhody této technologie se řadí schopnost poměrně přesně řídit strukturu zrn a tím dosahovat lepších kvalit výsledných produktů. Principem je technologie podobná extruzi materiálu, ale na rozdíl od ní se tryska může

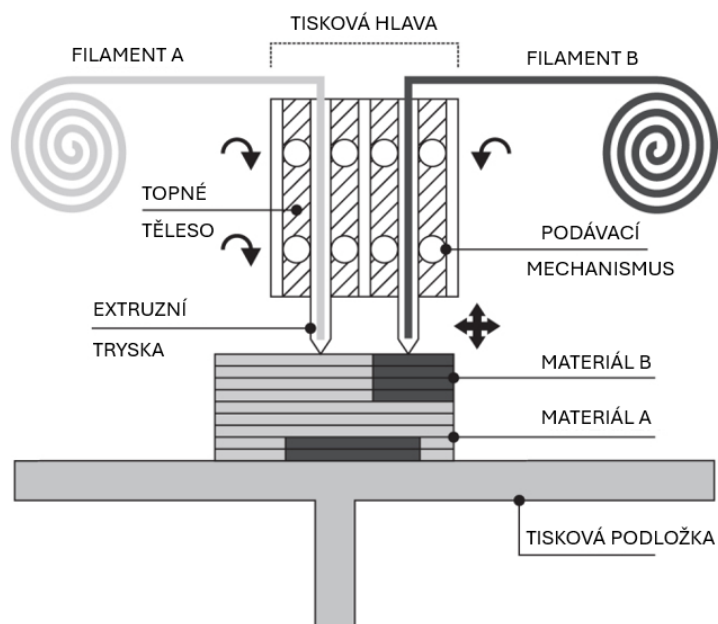
pohybovat ve více směrech. Podstatou DED technologie je natavování materiálu pomocí koncentrovaného zdroje energie. Materiály využívané touto technologií jsou buď ve formě prášku nebo drátu, využívanými materiály jsou polymery, keramika a kovy. Systém DED se skládá z jedné nebo více trysek připojených k příslušným tiskovým hlavám, zdroje energie (např. laser), projekčního modulu a výrobní platformy (tj. tiskové podložky). Technologie nachází uplatnění ve výrobě nástrojů, dopravním a energetickém průmyslu (Koltsaki a Mavri, 2024; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019). Princip technologie je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 3).



Obr. 3: Schéma DED

Zdroj: Koltsaki a Mavri (2024)

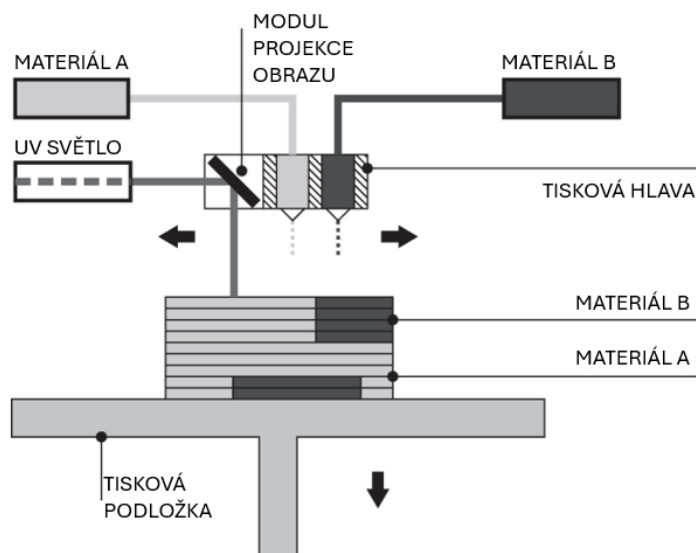
Material extrusion (MEX) je velmi rozšířená a levná technologie, která umožňuje výrobu předmětu i z více materiálů v různých barvách. Technologie byla vynalezena roku 1989 Scottem Crumpem a byla komercializována jeho společností Stratasys Ltd., která zavedla termín Fused Deposition Modeling (FDM). Princip FDM spočívá v postupném nahřívání polymerního vlákna, které se nazývá filament, a jeho postupného nanášení vrstvu po vrstvě na tiskovou podložku. MEX systém se skládá z extruderu a topného tělesa, které dohromady tvoří tiskovou hlavu, řídicího systému pro pohyb, jedné nebo více trysek, podávacího mechanismu s filamentem a tiskové podložky. Technologie MEX má široké uplatnění v mnoha odvětvích, jako příklad lze uvést letecký a automobilový průmysl, stavebnictví, potravinářství nebo umění a módu (Koltsaki a Mavri, 2024; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019). Princip technologie je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 4).



Obr. 4: Schéma MEX

Zdroj: Koltsaki a Mavri (2024)

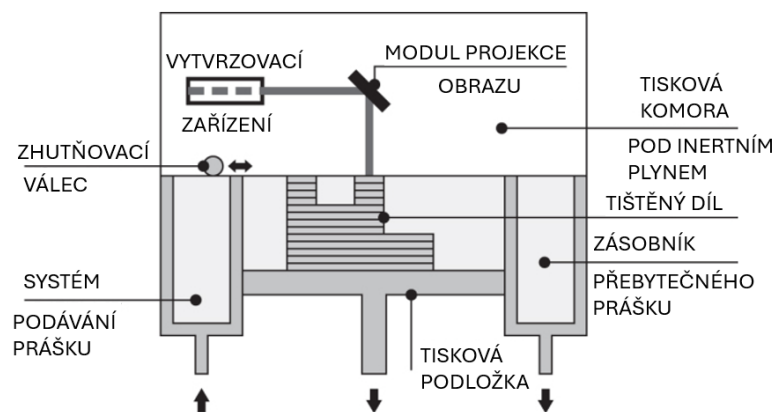
Material jetting (MJT) je technologie, která byla uvedena na trh v roce 1994 firmou Sanders Prototype (v současnosti Solidscape). Technologie se principiálně podobá klasické 2D inkoustové tiskárně. Podstata technologie MJT je v selektivním nanášení materiálu po kapkách, kdy materiál je působením UV zářením zpevňován. Systém MJT se skládá z jedné nebo více trysek napojených na příslušné tiskové hlavy, systému pro dávkování kapalného materiálu, zdroje energie a tiskové podložky. Existují dva základní typy MJT technologií – wax-feed a liquid-feed. Wax-feed používá materiály na bázi vosku, které se roztavené nanasou na podložku a po nanesení ztuhnou. V technologii liquid-feed jsou používány kapalné fotopolymery, které jsou po nanesení vytvrzovány UV zářením. U MJT lze také rozlišovat dva způsoby nanášení podle toho, v jaké formě je materiál nanášen. První způsob je tzv. continuous stream, kdy materiál vytéká z trysek jako souvislý proud. Druhý způsob je tzv. drop-on-demand, u kterého je materiál vystřikován z trysek po jednotlivých kapkách do požadovaných míst. Technologie MJT je vhodná pro tisk složitějších a detailnějších objektů s jemným povrchem (Koltsaki a Mavri, 2024; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019). Princip technologie je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 5).



Obr. 5: Schéma MJT

Zdroj: Koltsaki a Mavri (2024)

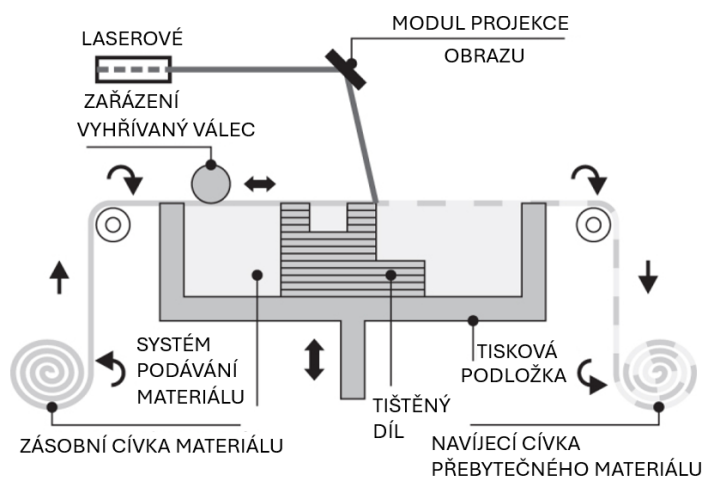
Powder bed fusion (PBF) je technologie, která používá laser nebo elektronový paprsek k natavování či slinování materiálu ve formě prášku. Jako materiály se používají kovy, keramika a polymery. Do kategorie PBF spadají tři metody – EBM (Electron Beam Melting), SLS (Selective Laser Sintering) a SHS (Selective Heat Sintering). Nejznámější z těchto metod je SLS vyvinutá 1987 Carlem Deckardem, který o rok později získal na tuto technologii patent. Každá z těchto metod využívá jiný zdroj energie, SLS využívá vysoce výkonný laser, EBM elektronový paprsek, SHS tepelnou tiskovou hlavu. PBF systémy se skládají z vytvrzovacího zařízení, projekčního modulu, tiskové podložky, systému pro dávkování prášku a válců pro hutnění vrstev. 3D tisk probíhá tak, že se nejprve rozprostře tenká vrstva prášku po tiskové ploše, přičemž je prášek předehřátý těsně pod teplotu tání. Následně je prášek roztaven působením tepla dle dané metody, tím dochází k lokálnímu spojení částic. Po dokončení vrstvy se tisková plocha posune o tloušťku jedné vrstvy dolů a proces se opakuje, dokud není výrobek dokončen. Po dokončení tisku dochází k chladicí fázi, kdy dochází k postupnému ochlazování výrobku tak, aby se zabránilo jeho deformacím či degradacím materiálu, ze kterého je vytvořen. Prášek, který nebyl spečený, funguje jako podpůrný materiál a lze jej opětovně použít pro další výrobu. Hotový výrobek je potřeba z nevyužitého prášku vyjmout a prášek z něj pomocí vyfoukání nebo oklepání odstranit (Koltsaki a Mavri, 2024; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019). Princip technologie je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 6).



Obr. 6: Schéma PBF

Zdroj: Koltsaki a Mavri (2024)

Sheet lamination (SHL) je technologie, která spočívá ve spojování listů materiálů dohromady k vytvoření výsledného objektu. Mezi přednosti technologie patří možnost barevného tisku, relativně nízká cena, snadná manipulovatelnost a možnost recyklace přebytečného materiálu. Počátek technologie nastal v roce 1991, kdy byla představena firmou Helisys, Inc. SHL systém je běžně složen z laserového zařízení, projekčního modulu, tiskové podložky, vyhřívaného válce a podávacího systému materiálu. Princip technologie spočívá ve vrstvení a spojování plátů papíru, plastu nebo kovu. Laser řeže tvar do hloubky odpovídající tloušťce vrstvy a vyhřívaný válec postupně spojuje jednotlivé vrstvy. Vrstvy lze spojovat pomocí nanesením pojiva, tepelným svařováním, mechanickým stlačením nebo svařováním pomocí ultrazvuku. Dle pořadí kroků lze rozdělit metody SHL na tzv. bond-then-form a form-then-bond. Bond-then-form znamená, že nejprve dochází ke spojení vrstev a následně až pak k vyřezání požadovaného tvaru. U metody form-then-bond je nejdříve list vyřezán do požadovaného tvaru a následně dochází ke spojení s předchozími vrstvami (Koltsaki a Mavri, 2024; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019). Princip technologie je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 7).

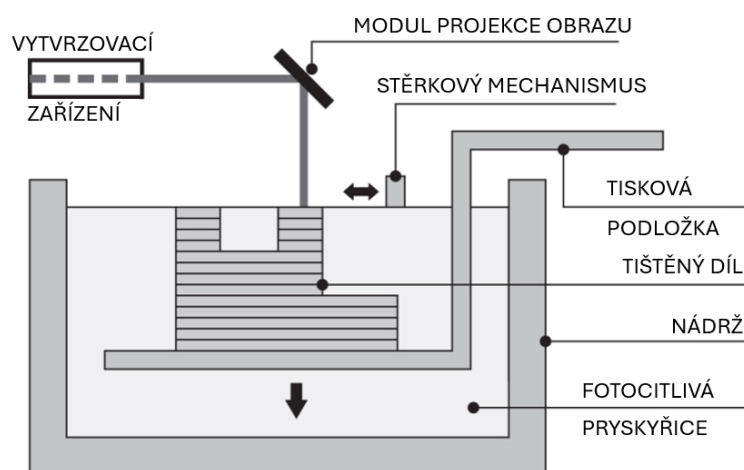


Obr. 7: Schéma SHL

Zdroj: Koltsaki a Mavri (2024)

Vat photopolymerization (VPP) pochází z roku 1986, kdy byla vyvinuta Charlesem Hullem. Jedná se o jednu z nejčastěji používaných technologií 3D tisku. Systém VPP se skládá z vytvrzovacího zařízení, projekčního modulu, tiskové podložky, nádoby s fotocitlivou pryskyřicí a stěrkového mechanismu. Technologie využívá řízeného světelného paprsku pomocí zrcadel, který

postupně vytvrzuje vrstvy pryskyřice. Po dokončení vytvrzení vrstvy následuje ponoření tiskové podložky o tloušťku jedné vrstvy a nanesení další tenké vrstvy pryskyřice pomocí stěrkového mechanismu. Po dokončení 3D tisku je možno použít dodatečné vytvrzení nebo tepelnou úpravu pro dosažení větší pevnosti či zlepšení požadovaných mechanických vlastností. Kromě UV záření lze pro vytvrzování použít další typy záření, například gama záření, rentgenové záření nebo elektronový paprsek. Technologie zahrnuje varianty jako je SLA (stereolithography), DLP (Digital Light Processing) nebo LCD (Liquid Crystal Display). Tyto technologie se mezi sebou liší podle světelných zdrojů, které jsou používány pro vytvrzování materiálu (Koltsaki a Mavri, 2024; Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019). Princip technologie je znázorněn na následujícím obrázku (Obr. 8).



Obr. 8: Schéma VPP

Zdroj: Koltsaki a Mavri (2024)

1.2.2 Materiály používané pro 3D tisk

Kovy a slitiny lze použít pro výrobu složitých dílů, které nacházejí uplatnění od leteckých komponent až po implantáty či náhrady lidských orgánů. Nejčastěji používanými kovovými materiály zpracovanými pomocí aditivních technologií jsou hliníkové slitiny (např. AlSi12, AlSi7Mg, AlSi10Mg), slitiny na bázi kobaltu nebo niklu (např. ASTM F75, CoCrWc, Inconel 625), slitiny titanu (např. Ti6Al4V, Ti6AlNb7, Ti6Al4V ELI) nebo korozivzdorné oceli (např. SS 316 L, SS 304, SS 440). Kobaltové slitiny jsou vhodné pro užití ve stomatologii, niklové slitiny v letectví, titanové slitiny v letectví a biomedicině, korozivzdorné oceli jsou vhodné pro výrobu nástrojů, strojů a strojních součástí, hliníkové slitiny nacházejí uplatnění v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu. Kovy a slitiny jsou natavovány buď ve formě prášku nebo drátu pomocí laseru nebo elektronového paprsku. Metodami využívajícími kovy a slitiny jsou BJT, DED, MJT, PBF a SHL. (Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019; Ranjan a kol., 2022; Lopez, 2023; Belmont Metals, 2019).

Kompozitní materiály jsou lehké, univerzální a umožňují přizpůsobit vlastnosti pro danou aplikaci. Jsou to materiály, které jsou složeny z více složek s odlišnými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Kompozity využívají přednosti kombinací materiálů pro dosažení lepších výsledných vlastností. Nejpoužívanějšími kompozitními materiály jsou polymery vyztužené buď uhlíkovými nebo skelnými vlákny. Mezi metody využívající kompozitní materiály patří například DED, PBF, SHL nebo MEX. Příkladem konkrétního kompozitního materiálu může být filament z kyseliny

polymléčné (PLA) nebo z akrylonitrilbutadienstyrenu (ABS) plněné uhlíkovými nebo skelnými vlákny. Kompozitní materiály nacházejí uplatnění v automobilovém průmyslu, letectví, medicíně a dalších konstrukčních aplikacích (Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019; Ranjan a kol., 2022; Kantaros a kol., 2023).

Polymery představují materiály, které mají nízkou hmotnost, obvykle snadnou zpracovatelnost a nízkou cenu. Na druhou stranu jsou jejich nedostatkem horší mechanické vlastnosti v porovnání s kovovými materiály. Polymery se používají pro výrobu jak prototypů, tak funkčních dílů se složitou geometrií. Mezi nejpoužívanější polymerní materiály patří PLA, ABS, polypropylen (PP) nebo polyethylen (PE). Polymery jsou vhodným materiálem pro biomedicínu, kde je možné je využít jako inertní materiály v lékařských pomůckách a implantátech. Konkrétním příkladem využití polymerů v biomedicíně je polyetherketonketon (PEKK), ze kterého se vyrábí implantáty lebečních kostí (Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019; Ranjan a kol., 2022; Gotro, 2013).

Keramika je materiál, který je tvrdý, pevný, odolný proti vysokým teplotám, odolný vůči korozi a opotřebení. Největší nevýhodou keramiky je její křehkost, proto keramika není vhodná pro nárazové nebo dynamické zatížení. Mezi běžně využívané konstrukční keramiky patří materiály na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) nebo oxidu zirkoničitého (ZrO_2). Konkrétními materiály jsou například Tethon 3D Komitsulite 99.8% Alumina resin nebo Tethon 3D 5Y Zirconia Resin. Keramika je vhodná pro stavebnictví, letectví, medicínu nebo i jadernou energetiku (Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019; Ranjan a kol., 2022; Zhang a kol., 2025; AT-Machining, 2023; Cotu, c2024).

Chytré materiály jsou skupinou látek, které dokáží v reakci na vnější podněty měnit svůj tvar, geometrii či jiné fyzikálně-mechanické vlastnosti. Vnějšími podněty mohou být např. teplo, světlo, voda, elektrický proud nebo působení chemických látek. Chytré materiály lze označit jako 4D tiskové materiály, jelikož jejich vlastnosti se v čase mění v závislosti na okolních podmínkách. Do této skupiny lze zařadit například slitiny s tvarovou pamětí nebo polymery s tvarovou pamětí. Slitiny s tvarovou pamětí nacházejí uplatnění v biomedicíně jako implantáty a v mikroeletromechanických systémech. Příkladem slitiny s tvarovou pamětí mohou být slitiny Cu-Zn-Al, Co-Ni-Al, Cu-Al-Ni, Ni-Mn-Ga, Ti-Cu nebo slitina niklu a titanu známá jako Nitinol. Polymery s tvarovou pamětí jsou díky 3D tisku poměrně snadně a rychle vyrobitelné. Nejběžnějšími polymery s tvarovou pamětí jsou PLA, ABS, polykarbonát (PC), polykaprolakton (PCL) nebo kopolymer ethylenvinylacetát (EVA). Tyto polymery se často kombinují například s jinými elastickými materiály (např. silikonový elastomer) nebo přidáním nanovláken či nanočástic (Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019; Ranjan a kol., 2022; Kubášová a kol., 2024; Ameen, Takhakh a Abdal-Hay, 2023).

Dalším speciálním typem materiálů s aplikací v 3D technologiích jsou biomateriály, materiály pro tisk potravin nebo stavební materiály (Shahrubudin, Lee a Ramlan, 2019; Ranjan a kol., 2022).

1.2.3 Technologie FDM/FFF

Technologie FDM a FFF spadá do kategorie MEX (Koltsaki a Mavri, 2024).

Tyto technologie se řadí mezi nejdostupnější a nejrozšířenější metody 3D tisku. FDM a FFF fungují na stejném principu, kdy filament vyrobený z termoplastu nebo termoplastického elastomeru se roztaví a je vytlačován skrz trysku na tiskovou podložku vrstvu po vrstvě, dokud nevznikne výsledný objekt. Rozdíl mezi těmito technologiemi je v tom, že FDM je ochranná známka zavedená roku 1989 společností Stratasys a FFF je obecnější termín, který popisuje stejnou metodu. Termín FFF byl vytvořen v roce 2005 projektem RepRap jako obecný termín, díky tomu může být volně použitelný jakýmkoliv výrobcem 3D tiskáren (Sculpteo, c2009-2025; UltiMaker, 2025; Autodesk, c2025).

FDM/FFF tiskárny můžeme dělit podle způsobu pohybu na šest hlavních typů (3DSourced, 2024):

- kartézské tiskárny,
- delta tiskárny,
- coreXY tiskárny,
- polární tiskárny,
- pásové tiskárny,
- SCARA tiskárny.

Kartézské tiskárny jsou nejběžnějším typem tiskáren. Princip činnosti je takový, že se tisková hlava nebo tisková podložka pohybuje ve směru osy X, Y a Z. Jednotlivé části se tak v prostoru pohybují lineárně. Mezi výhody těchto tiskáren patří jednoduchost, spolehlivost, dobrá dostupnost dílů a díky rozsáhlé uživatelské komunitě i dostupnost znalostí. Mezi další výhody patří i nízká pořizovací cena, konzistentní kvalita tisku v celé tiskové ploše, snadná obsluha a údržba. Naopak mezi nevýhody lze zařadit velký a těžký rám, relativně pomalý tisk, omezenou výšku tisku a možnou ztrátu přesnosti v čase kvůli opotřebení řemenů a lineárních ložisek (3DSourced, 2024; O'Connell, 2023; Locanam, c2024). Na následujícím obrázku (Obr. 9) je znázorněna kartézská tiskárna.



Obr. 9: Kartézská tiskárna

Zdroj: Locanam (c2024)

Delta tiskárny používají obvykle tři ramena uspořádaná do trojúhelníku (viz Obr. 10), na kterých je zavěšena tisková hlava. Pohyb tiskové hlavy je tak řízen rameny, které se koordinovaně pohybují nahoru a dolů. Výhodou těchto tiskáren je poměrně vysoká rychlost tisku a kvalita výtisků, dále pak díky štíhlé a vysoké konstrukci umožňují tisknout vyšší objekty. Nevýhodami jsou složitější kalibrace, ztráta přesnosti tisku na krajích tiskové plochy, složitější údržba a menší tisková plocha (3DSourced, 2024; O'Connell, 2023; Locanam, c2024).



Obr. 10: Delta tiskárna

Zdroj: Locanam (c2024)

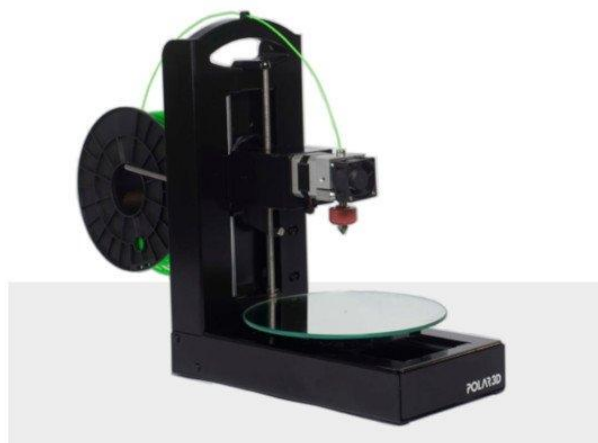
CoreXY tiskárny využívají složitého řemenového mechanismu, kdy dva motory současně a koordinovaně ovládají pohyb tiskové hlavy v rovině XY. Motory se běžně umísťují do různých rohů rámu tiskárny. Hladký a přesný pohyb i při vyšších rychlostech tisku je zajištěn systémem kladek a řemenů, kterým jsou motory propojeny. Pohyb v ose Z je vykonáván podložkou. Mezi výhody lze zařadit vysokou rychlost tisku, přesný a kvalitní tisk a nízké vibrace. Nevýhodami jsou náročnější údržba kvůli složitější konstrukci, náročná kalibrace a vyšší pořizovací cena (3DSourced, 2024; O'Connell, 2023; Locanam, c2024). CoreXY tiskárna je zobrazena na následujícím obrázku (Obr. 11).



Obr. 11: CoreXY tiskárna

Zdroj: O'Connell (2023)

Polární tiskárny jsou vhodné pro objekty, které mají kruhovou nebo spirálovou geometrii (viz Obr. 12), jelikož pracují na základě polárního souřadnicového systému, kde je poloha tiskové hlavy určena v závislosti na úhlu a vzdálenosti. Tyto tiskárny mají rotující kruhovou tiskovou podložku a rameno s tiskovou hlavou, které se pohybuje v ose Z. Výhodou je nižší opotřebení a údržba kvůli tomu, že polární tiskárny potřebují pouze dva motory. Dalšími výhodami jsou malé rozměry, vysoká efektivita při tisku kruhových tvarů, malá hlučnost při provozu a poměrně levné pořizovací náklady. Mezi nevýhody patří neefektivní tisknutí hranatých objektů, relativně pomalý tisk, nižší kvalita tisku a nekonzistentní kvalita tisku v důsledku nerovnoměrné rychlosti tisku, která je závislá na poloze (3DSourced, 2024; O'Connell, 2023; Locanam, c2024).



Obr. 12: Polární tiskárna

Zdroj: 3DSourced (2024)

Pásové tiskárny místo statické tiskové podložky používají pohyblivý pás (viz Obr. 13), který umožňuje nepřetržitě vyrábět více menších modelů nebo velmi dlouhé modely. Pásové tiskárny mohou tisknout převisy větší než 45°. Konstrukce pásových tiskáren je obvykle založena na principu konstrukce kartézských nebo coreXY tiskáren, přičemž rám bývá nakloněn pod úhlem 45°. Výhodou těchto tiskáren je tak možnost sériového tisku a možnost tisku složitých

tvarů s převisy. Mezi nevýhody patří nemožnost tisku vysokých modelů, kterou lze částečně redukovat tiskem objektu naležato. Další nevýhodou je to, že pásy nelze či lze jen velmi omezeně vyhřívat, což má za následek omezený výběr materiálu pro tisk. Tyto tiskárny jsou také náročnější na stavbu, údržbu, nastavení a vyžadují speciální slicery (3DSourced, 2024; O'Connell, 2023; Locanam, c2024).



Obr. 13: Pásová tiskárna
Locanam (c2024)

SCARA tiskárny (Selective Compliance Assembly Robotic Arm) využívají pro 3D tisk robotické rameno viz následující obrázek (Obr. 14). Tyto tiskárny nejsou fixovány na tiskovou podložku a lze je přemístit na pracovní místo. Uplatnění nacházejí ve stavebnictví například pro tisk domů. Díky robotickému ramenu umožňují tisk i složitějších geometrií. Výhodou SCARA tiskáren je jejich flexibilita a možnost tisku pod různými úhly, jsou poměrně rychlé a vhodné pro průmyslový tisk. Nevýhodou je jejich vysoká pořizovací cena, náročná obsluha a údržba (3DSourced, 2024; O'Connell, 2023; Locanam, c2024).



Obr. 14: SCARA tiskárna
Zdroj: 3DSourced (2024)

1.2.4 Komponenty FDM/FFF tiskáren

Jako základní komponenty FDM/FFF tiskáren lze považovat (Techietory, 2024):

- rám,
- tiskovou podložku,
- extrudér,
- hot end,
- chladicí systém,
- krokové motory,
- řemeny a kladky,
- řídící desku,
- napájecí zdroj,
- senzory a kalibrační zařízení.

Rám je důležitý pro stabilitu 3D tiskárny během tisku, větší tuhost rámu vede k menším vibracím při tisku, což přispívá k lepší kvalitě povrchů modelů. K rámu jsou uchyceny všechny mechanické i elektronické komponenty (Techietory, 2024; RankRed, 2025).

Tisková podložka slouží k přilnutí modelu během tisku. Tisková podložka je buď vyhřívaná, nebo nevyhřívaná. Vyhřívané podložky jsou vhodné pro tisk materiálů, u kterých bez použití vyhřívané podložky dochází ke kroucení a špatné přilnavosti první vrstvy. Materiály, ze kterých se tiskové podložky vyrábějí, jsou nejčastěji sklo, hliník nebo tzv. BuildTak (Techietory, 2024; RankRed, 2025).

Extrudér lze rozdělit na dvě hlavní části, první je studená a druhá horká (cold end a hot end). Studená část slouží k přivedení filamentu do hot endu za pomoci krokového motoru, ozubeného kolečka a přítlačného mechanismu. Běžně se pro usměrnění filamentu k trysce používá PTFE trubička. Horká část slouží k roztavení filamentu a následnému vytlačení skrz trysku. Nejběžněji se používají trysky s vnitřním průměrem o velikosti 0,4 mm. V závislosti na umístění motoru se rozlišují dva hlavní typy extruderů na přímý (direct) a nepřímý (bowden). Pokud se motor nachází přímo nad hot endem, jedná se o přímý extruder. Přímý extruder umožňuje lepší kontrolu nad tokem materiálu. Pokud je mezi motorem a hot endem dlouhá PTFE trubička, skrz kterou je veden filament, jedná se o nepřímý extrudér. Díky tomu, že se motor nachází mimo tiskovou hlavu, je tisková hlava lehčí a lze používat vyšší rychlosti tisku než u nepřímého extruderu (Techietory, 2024; RankRed, 2025).

Hot end je určen pro tavení filamentu, skládá se z heater blocku, termistoru a trysky. Roztavený materiál je protlačován skrz trysku (AzureFilm, c2025; Techietory, 2024).

Chladicí systém představuje ventilátor, který slouží k rychlému ochlazení vytlačeného filamentu skrz trysku (Techietory, 2024).

Krokové motory jsou nezbytné pro zajištění pohybu tiskové hlavy a tiskové podložky. Přesnost jejich řízení ovlivňuje kvalitu vytisknutého modelu. Posun tiskové hlavy je umožněn díky řemenům a závitovým tyčím, se kterými jsou krokové motory propojeny (Techietory, 2024; RankRed, 2025).

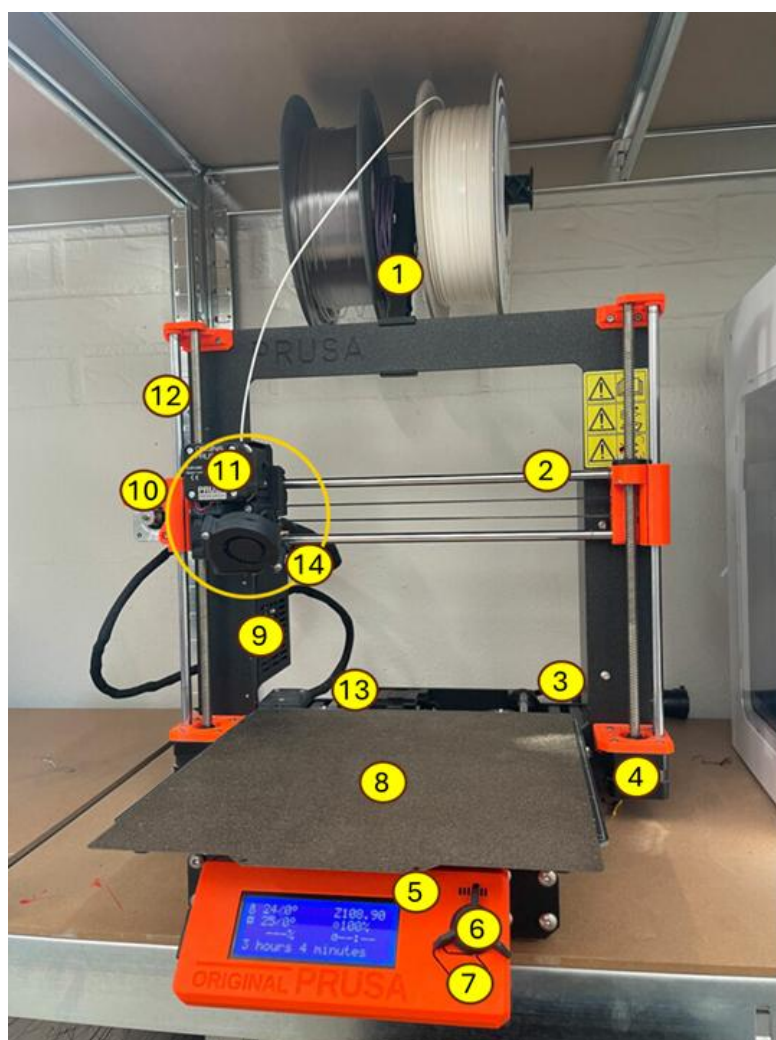
Řemeny a kladky přenášejí pohyb z krokových motorů na tiskovou hlavu a tiskovou podložku. Správné napnutí řemenů je důležité pro přesný pohyb a zabránění prokluzu během tisku (Techietory, 2024).

Řídící deska je nezbytná pro řízení všech elektrických součástí. Řídící deska na základě informací obsažených v G-kódu řídí elektronické součásti tak, aby došlo k vytvoření požadovaného 3D výtisku (Techietory, 2024; RankRed, 2025).

Napájecí zdroj je připevněn buď přímo na rám tiskárny, nebo umístěn samostatně. Napájecí zdroj převádí střídavý proud na stejnosměrný a snižuje napětí ze sítě na hodnotu 12–24 V v závislosti na požadavcích dané tiskárny (Techietory, 2024; RankRed, 2025).

Senzory a kalibrační zařízení jsou důležité pro správnou funkci tiskárny a zahrnují různé senzory jako jsou například koncové spínače, termistory nebo senzory pro automatické vyrovnávání tiskové plochy (Techietory, 2024).

Pro znázornění komponent 3D tiskárny lze využít následující obrázek (Obr. 15).

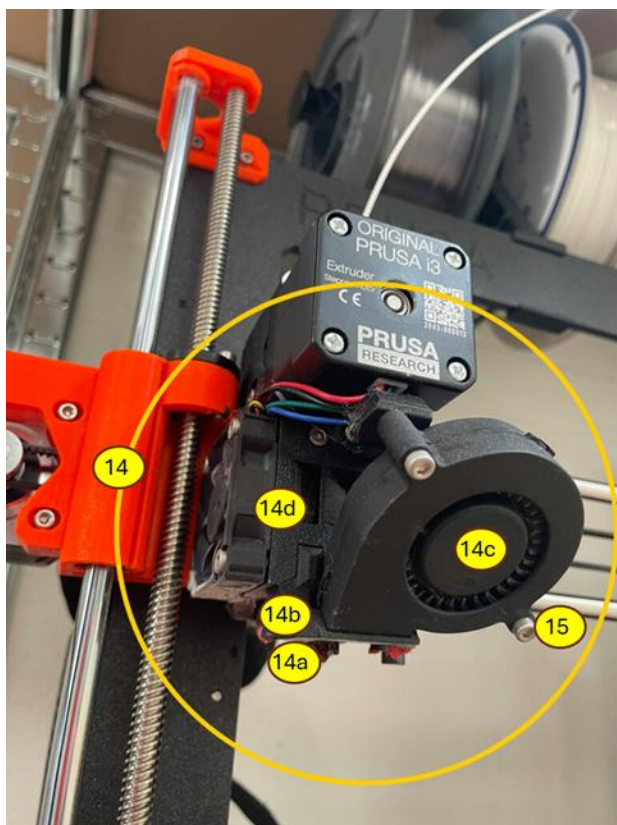


1. Držák filamentu
2. Osa X
3. Napájecí kabel
4. Motor osy Z
5. Ovladač
6. Hlavní ovládací tlačítko
7. Resetovací tlačítko
8. Tisková podložka
9. Řídící jednotka
10. Motor osy X
11. Motor tiskové hlavy
12. Osa Z
13. Osa Y
14. Hot end

Obr. 15: Komponenty 3D tiskárny

Zdroj: REALvisionOnline (2025)

Na dalším obrázku (Obr. 16) je znázorněn detail hot endu.



- 14 a. Tryska
- 14 b. Heater block
- 14 c. Chladicí ventilátor
- 14 d. Extrudér
- 15 Kalibrační senzor

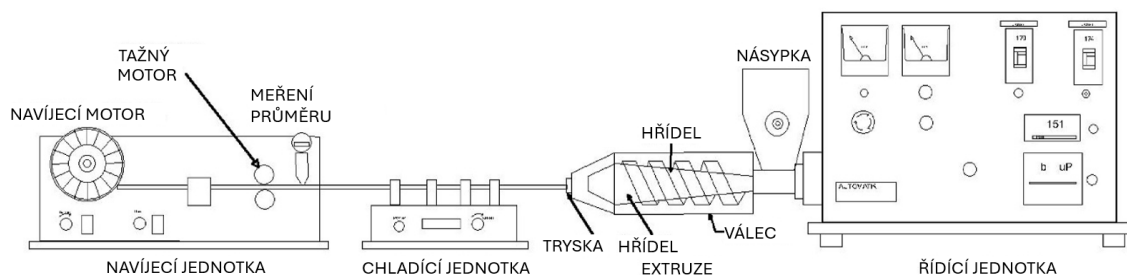
Obr. 16: Detail hot endu

Zdroj: REALvisionOnline (2025)

1.3 Výroba filamentu pro FFF 3D tisk

Pro výrobu filamentu se používá nejčastěji jednošneková nebo dvoušneková extruze, kde je použit vstupní materiál ve formě prášku nebo granulí. Nejčastějším vstupním materiálem s uplatněním pro 3D tisk jsou termoplasty – např. PLA, ABS nebo nylon. (Sapkota, Ghimire a Adanur, 2024).

Šnek u šnekové extruze je rozdělen do tří hlavních částí – podávací zóna, přechodová zóna a dávkovací zóna. Podávací zóna slouží k dávkování vstupního materiálu a nachází se nejbližší násypce. Přechodová zóna je určena pro roztavení, míchání a posunutí materiálu dopředu. V dávkovací zóně dochází ke stlačení materiálu a následnému vytlačení roztaveného polymeru skrz tryšku. Rozměry těchto částí závisí na druhu zpracovávaného polymeru. Součástí systému pro extruzi mohou být odvětrávací zóna nebo sekundární násypka, která slouží pro přidávání aditiv, například barev nebo změkčovadel. Jednošnekové extrudéry jsou dále vybaveny řídicí jednotkou pro regulaci teploty a tlaku, chladícím systémem a navíjecím zařízením. Princip jednošnekové extruze je znázorněn na dalším obrázku (Obr. 17) (Sapkota, Ghimire a Adanur, 2024).

**Obr. 17: Jednošneková extruze***Zdroj: Sapkota, Ghimire a Adanur (2024)*

Pro zpracování více polymerů najednou nebo kombinace s aditivy se používá dvoušneková extruze, jelikož jednošneková extruze nedokáže promíchat polymerní směs tak, aby byla dostatečně homogenní. Dvoušnekové extrudery jsou proto efektivnější při přípravě směsí z různých polymerů i s přidáním dalších aditiv, kterými mohou být antistatické látky, spojovací činidla, maziva, retardéry hoření, změkčovadla, pigmenty a stabilizátory. Šneky u dvoušnekové extruze mají různé konstrukce podle toho, jak mezi sebou interagují. Výroba filamentu s jednotným průměrem je u dvoušnekové extruze náročná, proto je vhodná spíše k mísení materiálů a vytváření homogenních směsí. Tyto směsi se následně zpracovávají do formy malých pelet, které je poté možné zpracovat v jednošnekovém extrudéru, který z těchto pelet vytlačí filament s jednotným průměrem, který již lze použít pro 3D tisk (Sapkota, Ghimire a Adanur, 2024).

1.4 Výroba filamentu z recyklovaného PET ve formě drtiny

Výroba filamentu z recyklovaného PET (rPET) je možností, jak dosáhnout udržitelné výroby pomocí 3D tisku a snížit ekologickou zátěž. Zároveň má v sobě výroba filamentu z recyklovaného PET potenciál ke snížení výrobních nákladů (3devo, 2024; JLC3DP, 2025).

Recyklovaný PET je vhodný pro tisk funkčních dílů, jako jsou například držáky nebo úložné boxy, které nemají tenké stěny. Zároveň je díky své odolnosti vůči vlhkosti vhodný pro tisk voděodolných objektů pro venkovní použití. Recyklovaný PET není vhodný pro tisk tenkostěnných a složitých modelů, jelikož jeho nedostatkem je horší soudržnost vrstev. Také není vhodný pro tisk malých objektů s vysokým detailem a součástí namáhaných na ohyb (Sustainable Design Studio, 2025).

Výrobu filamentu lze shrnout do následujících pěti hlavních kroků (JLC3DP, 2025):

1. sběr čistého PET,
2. drcení plastu,
3. sušení drtiny,
4. extruze filamentu,
5. navinutí a skladování.

1.4.1 Příprava PET plastu na drcení

Dle 3devo (2024) je nutné před samotným drcením odstranit z lahví zbytky nečistot a přebytečné části. Toho lze docílit pomocí následujícího postupu:

1. odšroubování víčka a odříznutí bezpečnostního kroužku,
2. odstranění etikety a zbytku lepidla,
3. vymytí vnitřku lahve,
4. vizuální kontrola lahví, zda jsou odstraněny všechny nečistoty,
5. schnutí lahví,
6. zmenšení lahví.

1.4.2 Drcení

3devo (2024) udává, že cílem drcení je získat části menší než 4 mm. Jako vhodné zařízení pro drcení označuje GP20 plastic shredder (3devo, Nizozemsko).

1.4.3 Sušení drtiny

Dle 3devo (2024) je vhodné drtinu před použitím vysušit, jako vhodné zařízení jmenuje Airid Polymer Dryer (3devo, Nizozemsko). Případně lze k sušení použít i běžnou troubu. Vhodná teplota k sušení drtiny je 140 °C a doba sušení je 5 hodin. Po vysušení je doporučeno drtinu okamžitě použít k extruzi, aby nedošlo k nasátí vlhkosti.

1.4.4 Extruze filamentu

Obecně vhodná teplota k extruzi je 270 °C. Jelikož je každá PET lahev vyrobená z jiné šarže, je nezbytné přizpůsobit podmínky extruze, jako je teplota extruze, rychlost otáčení šneku extruderu a rychlost ventilátoru tak, aby vznikl filament bez vzduchových bublin a s konstantním průměrem. Po navinutí filamentu na cívku je doporučeno ho ihned použít nebo jej uložit do vzduchotěsného prostředí (3devo, 2024).

1.4.5 Vybrané studie zabývající se výrobou filamentu z recyklovaného PET ve formě drtiny

Studie Çava a Aslan (2023) se zabývala výrobou filamentů z čistého rPET a rPET s přídavkem směsných aditiv PLA a termoplastického polyuretanu (TPU) s následným 3D tiskem vzorků pomocí metody FFF. Vzorky byly podrobeny zkoušce tahem, zkoušce ohybem a zkoušce houževnatosti. Studie uvádí následující postup při výrobě filamentu:

1. sběr PET lahví s následným umytím pomocí vody a acetonu,
2. sušení PET lahví při teplotě 140 °C po dobu 4 až 5 hodin,
3. drcení PET lahví na průměrnou velikost částí 4 mm s následným sušením pod teplotou skelného přechodu,
4. obarvení a homogenizace nadrcených částic pomocí dvoušnekového extruzního systému s teplotou extruze 240 °C pro vstupní zónu a 270 °C pro výstupní zónu,
5. granulace vzniklého materiálu na granule o průměrné velikosti 2 mm,

6. vytvoření směsi z granulí z rPET a z TPU a PLA s výsledným složením v poměru 80 % rPET, 10 % TPU, 10 % PLA,
7. homogenizace směsi pomocí dvoušnekového extruderu a drcení vzniklého materiálu,
8. sušení drcené směsi při teplotě 100 °C,
9. výroba filamentu s průměrem 1,75 mm pomocí jednošnekové extruze s nastavenou teplotou 255 °C pro vstupní zónu a 265 °C pro výstupní zónu.

Výsledky studie Çava a Aslan (2023) jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 2).

Tab. 2: Výsledky studie Çava a Aslan

Vlastnost	Materiál	
	rPET	směs rPET, TPU a PLA
Tahové napětí [MPa]	54 ± 4	31 ± 2
Ohybové napětí [MPa]	43 ± 1	35 ± 1
Rázová houževnatost [kJ/m ²]	8,2	11,2

Zdroj: Vlastní zpracování dle Çava a Aslan (2023)

Další studií, která se zabývala výrobou filamentu z recyklovaných PET lahví, je studie kolektivu Zander, Gillan a Lambeth (2018). Cílem studie bylo vyrobit filament pro metodu FFF ze 100% recyklovaného PET bez použití aditiv. Ve studii byla také provedena termická analýza materiálu a vytištěné vzorky byly podrobeny tahové zkoušce. Postup při výrobě filamentu byl v této studii následující:

1. odstranění etiket PET lahví, opláchnutí lahví mýdlem a vodou s následným opláchnutím ethanolem,
2. sušení PET lahví při pokojové teplotě,
3. nařezání vysušených PET lahví tak, aby mohly být dále rozřezány pomocí skartovačky papíru s označením Compucessory CCS60075 (S.P. Richards Co., USA),
4. sušení nadrcených částí ve vakuu přes noc při teplotě 120 °C,
5. extruze nadrcených částí pomocí zařízení Thermo Scientific Process 11 Parallel Twin-Screw Extruder (Thermo Fisher Scientific Inc., USA) s osmi teplotně řízenými zónami, teplota přívodního otvoru byla nastavena na 200 °C, další přilehlá zóna na 240 °C, dalších pět po sobě jdoucích zón bylo nastaveno na 260 °C a poslední zóna byla nastavena na 240 °C, cílový průměr filamentu byl 2,5 až 3 mm,
6. vyrobený filament byl následně nasekán na pelety pomocí zařízení Varicut Pelletizer (Thermo Fisher Scientific Inc., USA) a znovu extrudován pro získání jednotného průměru.

Studie Zander, Gillan a Lambeth (2018) zjistila, že teplota tání filamentu se pohybovala od 250,6 °C do 252,3 °C a že tahové napětí vytištěných vzorků bylo 35,1 ± 8 MPa.

2 Experimentální část

Experimentální část je zaměřena na výrobu filamentu z plastových PET lahví s následným 3D tiskem vzorků a jejich testováním. Cílem experimentální části je prověřit možnost výroby plastového filamentu pro 3D tisk tak, aby řešení mohlo být rozšířeno mezi hobby uživatele. Výroba vlastního filamentu z PET lahví, představuje možnost, jak ušetřit náklady za komerční filament a zároveň snížit ekologickou zátěž.

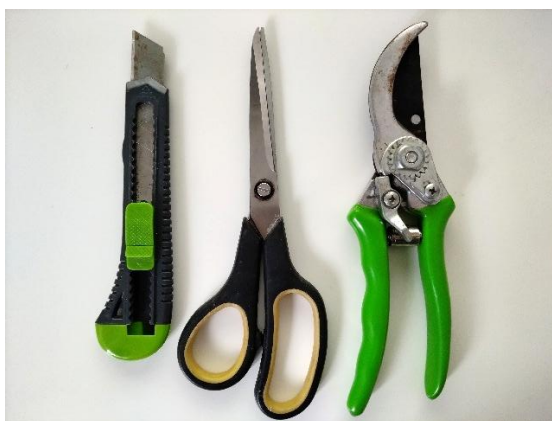
Celkem byly vyrobeny dva typy filamentů. Nejprve byl vyroben filament z různobarevných PET lahví a poté pouze z čirých PET lahví. Filament z různobarevných PET lahví byl použit k výrobě vzorků pro tahovou zkoušku a ohybovou zkoušku. Filament z čirých PET lahví byl použit pouze k výrobě vzorků pro tahovou zkoušku. Důvodem byla nízká kvalita vytištěných vzorků z tohoto filamentu. Kromě toho nedošlo k samotnému zlepšení výroby filamentu a procesu 3D tisku s použitím čirých PET lahví jako vstupní surovinou.

2.1 Příprava materiálu pro 3D tisk vzorků

Pro výrobu filamentu byly použity plastové PET lahve, které byly nejprve opláchnuty vodou a sušeny, poté drceny, a nakonec extrudovány do podoby filamentu pro 3D tisk o předpokládaném průměru 1,75 mm.

2.1.1 Použitá zařízení a nástroje

Pro rozdělení PET lahví na menší části byly použity obyčejné kuchyňské nůžky, zalamovací nůž a zahradní nůžky viz následující obrázek (Obr. 18).



Obr. 18: Zalamovací nůž, kuchyňské a zahradní nůžky

Zdroj: Vlastní (2025)

Pro drcení plastového odpadu bylo využito zařízení Felfil Shredder (Felfil, Itálie).

K získávání jemnější drtiny, bylo použito obyčejné kuchyňské síto (Obr. 19).



Obr. 19: Kuchyňské síto

Zdroj: Vlastní (2025)

V první fázi experimentu bylo využíváno zařízení Felfil Evo Extruder (Felfil, Itálie) pro výrobu filamentu z nadrcených PET lahví. Jako vhodnější zařízení pro výrobu filamentu se ukázalo být zařízení Wellzoom desktop filament extruder (Wellzoom, Čína).

Pro navíjení filamentu bylo zpočátku využíváno zařízení Felfil Spooler (Felfil, Itálie). Jako efektivnější se ukázalo k tahání filamentu z trysky extruderu a navíjení filamentu využívat dvojici zařízení od firmy Wellzoom, která jsou součástí produktu Wellzoom desktop filament extruder. Původní sestava zařízení pro výrobu filamentu je znázorněna na Obr. 20, výsledná sestava je znázorněna na Obr. 21.



Obr. 20: Původní sestava pro výrobu filamentu

Zdroj: Felfil (2025)



Obr. 21: Výsledná sestava pro výrobu filamentu

Zdroj: Vlastní (2025)

Pomocným zařízením potřebným pro výrobu filamentu byl větrák s vodícími oky, který je součástí produktu Felfil Extrusion System, který obsahuje také výše zmiňovaný Felfil Shredder, Felfil Evo Extruder a Felfil Spooler.

Pro analýzu velikosti drtin PET odpadu byl použit digitální mikroskop Keyence VHX 6000 (Keyence, Belgie) s nastaveným zvětšením 20x viz kapitola 2.4.4.

Pro termickou analýzu vzorků materiálů bylo použito zařízení SDT Q600 (TA Instruments, USA) viz kapitola 2.4.1.

Pro stanovení hmotnostního toku taveniny vyrobeného filamentu bylo použito zařízení LMI Dynisco (Dynisco Instruments, USA) viz kapitola 2.4.2.

Dalšími nezbytnými pomůckami byly kombinované kleště a pinzeta, které byly používány pro navádění filamentu do ok větráku a navíjecího zařízení. Kombinované kleště byly dále využívány pro zastřihávání filamentu.

2.1.2 Zpracování plastového odpadu

Jako plastový odpad byly použity PET lahve, které bylo nutno opláchnout, vysušit a rozřezat na menší části. Postup zpracování je popsán v následujících krocích.

1. Rozřezání PET lahve před opláchnutím

Rozřezání lahve umožňuje lepší schnutí po opláchnutí. Nejprve je rozstříhnuto hrdlo z jedné strany a poté z druhé protilehlé strany (viz Obr. 22).



Obr. 22: Rozstříhnutí hrdla

Zdroj: Vlastní (2025)

Po rozstříhnutí hrdla jsou vzniklé řezy zalamovacím nožem protaženy až ke spodku PET lahve (viz Obr. 23).



Obr. 23: Prodloužení řezů po rozstřihnutí

Zdroj: Vlastní (2025)

Následně je zalamovacím nožem oddělena spodní část PET lahve, tím vzniknou tři samostatné části PET lahve (viz Obr. 24).



Obr. 24: Oddělení spodní části

Zdroj: Vlastní (2025)

Po rozdělení na tři části je odříznutá část s přilepenou etiketou, tato část již není dále zpracovávána (viz Obr. 25).



Obr. 25: Odříznutí etikety

Zdroj: Vlastní (2025)

2. Opláchnutí

Nařezané PET lahve jsou opláchnuty ve vaně pro odstranění zbytků tekutin a nečistot (viz Obr. 26).



Obr. 26: Oplachování PET lahví

Zdroj: Vlastní (2025)

3. Sušení

Opláchnuté lahve jsou sušeny při pokojové teplotě alespoň 48 hodin (viz Obr. 27).



Obr. 27: Sušení PET lahví

Zdroj: Vlastní (2025)

4. Rozřezání na menší kusy před drcením

Aby bylo možné drtit jednotlivé části PET lahví, je zapotřebí je nastříhat na kusy o rozměrech cca 5x3 cm (viz Obr. 28). Měkčí části je možno rozstříhat kuchyňskými nůžkami.



Obr. 28: Rozstříhané proužky PET lahve k drcení

Zdroj: Vlastní (2025)

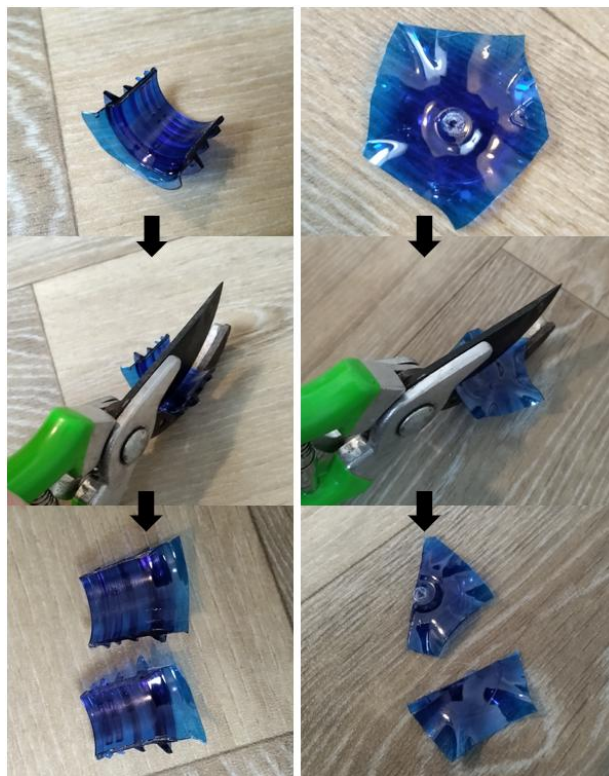
Spodní část lahve je ořezána zalamovacím nožem tak, aby zůstala pouze pevnější část spodku lahve. Měkčí část spodní části lahve je rozstříhána na menší části vhodné k drcení (viz Obr. 29).



Obr. 29: Rozstříhaná spodní část PET lahve

Zdroj: Vlastní (2025)

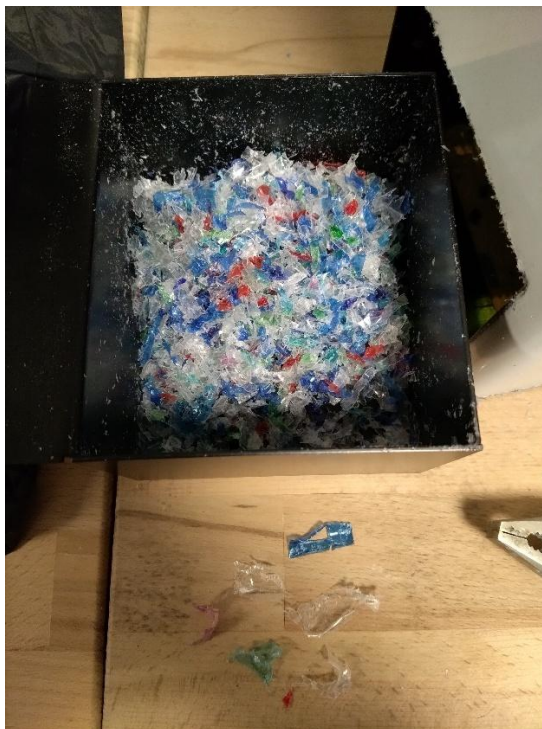
Volitelně lze zahradními nůžkami hrdlo láhve a tvrdší spodek PET lahve rozdělit na dvě další části (viz Obr. 30). Tím je docíleno rychlejšího rozdrcení těchto částí.



Obr. 30: Volitelné zmenšení tvrdších částí PET lahve
Zdroj: Vlastní (2025)

2.1.3 Drcení plastového odpadu

Nařezané PET lahve bylo nutné několikrát rozdrtit na menší části, aby je bylo možné použít jako vstupní materiál do extruderu. Po prvním cyklu drcení byl plastový odpad stále příliš velký, proto byl drcen celkem čtyřkrát. Po čtvrtém drcení bylo použito sítko k oddělení menších částí, které již bylo možné použít pro samotnou extruzi. Materiál, který nepropadl skrz sítko, byl znovu drcen a znovu oddělován pomocí síta. Tento cyklus byl opakován celkem dvanáctkrát a zbylý odpad již nebyl použit. Na dalším obrázku (Obr. 31) je vidět v kádince drtiče celkem čtyřkrát nadrcený plastový odpad z PET lahve, ve spodní části obrázku jsou vidět poměrně velké kusy odpadu, které pocházejí právě ze čtyřkrát nadrceného odpadu.



Obr. 31: Čtyřikrát nadrcený plastový odpad z PET lahve

Zdroj: Vlastní (2025)

Na dalším obrázku (Obr. 32) jsou vidět nerozpůlená hrdla lahve a nedostatečně zmenšené spodní části PET lahví, které bylo v takovémto stavu obtížné drtit.



Obr. 32: Nedostatečně zmenšené části PET lahve

Zdroj: Vlastní (2025)

2.1.4 Extruze, výroba filamentu

Nadrcený a sítím oddělený plastový odpad byl použit jako vstupní materiál extruderu. První pokusy probíhaly na zařízení od firmy Felfil, ale vzhledem k menšímu prostoru mezi závity šneku a menší teplotní komoře pouze s jedním teplotním pásmem bylo pro výrobu zvoleno zařízení od firmy Wellzoom. Jako optimální zvolená teplota pro extruzi se ukázalo být 275 °C pro první teplotní pásmo extruderu a 265 °C pro druhé pásmo.

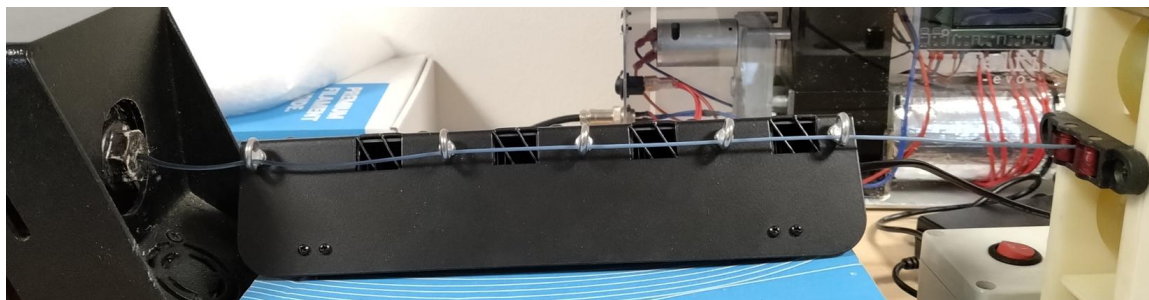
Teplota 275 °C v prvním pásmu byla zvolena, aby byl odpad dostatečně roztaven. V druhém teplotním pásmu byla zvolena teplota 265 °C, aby bylo možné roztavený odpad protlačit skrz trysku extruderu a zároveň aby se nově vzniklý filament z odpadu stačil dostatečně rychle ochladit. Pokud byly voleny nižší teploty, odpad se v extruderu zasekával a nešel protlačit skrz trysku. Pokud byly voleny vyšší teploty, byl roztavený odpad méně viskózní což znemožňovalo jeho navedení do ok větráku a následné navíjení. Na dalším obrázku (Obr. 33) je vidět filament, který vznikl při menších teplotách, než bylo 275 °C pro první a 265 °C pro druhé pásmo. Tento filament obsahoval neroztavené částice odpadu a byl velmi křehký.



Obr. 33: Filament vzniklý při nižších teplotách

Zdroj: Vlastní (2025)

Na další obrázku (Obr. 34) je vidět vznikající filament při teplotě 275 °C v prvním teplotním pásmu a 265 °C v druhém pásmu.

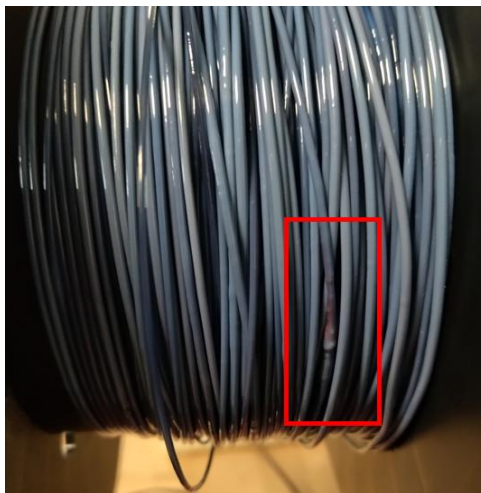


Obr. 34: Vznikající filament při optimální teplotě

Zdroj: Vlastní (2025)

Mezi další nezbytné kroky při výrobě filamentu patřilo vypodložení větráku tak, aby jeho oka byla ve stejné výšce jako tryska extruderu. Dále byl větrák umístěn co nejbližší samotné trysce extruderu.

Během extruze samotného filamentu docházelo ke kolísání průtoku materiálu skrz trysku i při konstantně nastavené teplotě a rychlosti otáčení šneku. I z tohoto důvodu se ukázal být navíjecí systém od firmy Wellzoom efektivnější, neboť umožňuje analogově nastavovat rychlost navíjení a tím i rychleji a přesněji reagovat na kolísající rychlost průtoku materiálu skrz trysku. Nicméně kolísající rychlost průtoku skrz trysku měla vliv na samotný průměr filamentu. Dalším problémem byla homogenita samotného filamentu, kdy filament obsahoval nečistoty ve formě nedostatečně roztaveného odpadu z PET lahve, viz další obrázek (Obr. 35).



Obr. 35: Nečistota obsažená ve filamentu

Zdroj: Vlastní (2025)

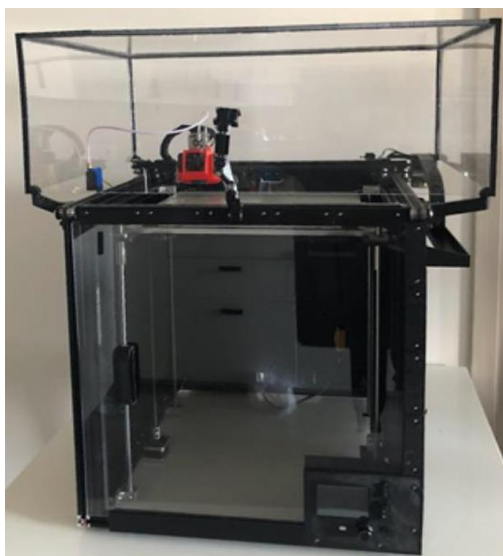
2.2 3D tisk zkušebních vzorků

Kapitola se zabývá výrobou vzorků pro mechanické testování.

2.2.1 Použitá zařízení

Pro testovací tisk byla použita tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ (Prusa Research a.s., Česká republika). Jako slicer pro tuto tiskárnu byl zvolen PrusaSlicer.

Z důvodu závady na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ (Prusa Research a.s., Česká republika) byla použita pro vytištění zkušebních vzorků pro ohybovou zkoušku a tahovou zkoušku tiskárna InfinityForge (viz Obr. 36), která byla sestavena v rámci závěrečné práce Kunášek (2025). Jako slicer byl pro tuto tiskárnu zvolen UltiMaker Cura. Pro tvorbu 3D modelů byl zvolen software Autodesk Fusion.



Obr. 36: 3D tiskárna InfinityForge

Zdroj: Kunášek (2025)

2.2.2 Postup při 3D tisku vzorků

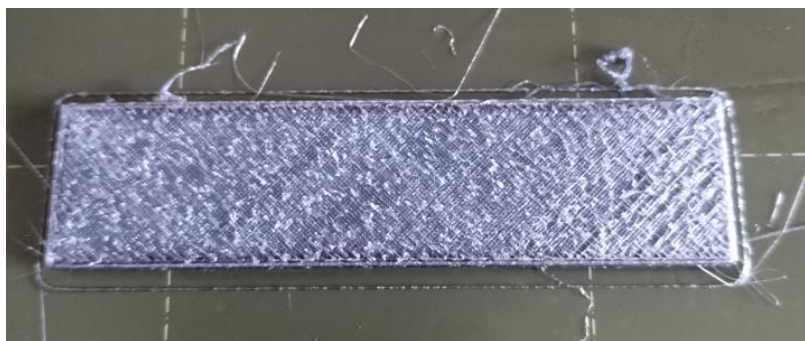
Pro první testovací tisk byly zvoleny podmínky viz následující tabulka (Tab. 3).

Tab. 3: Podmínky prvního testovacího tisku

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
250	90	80	100	100

Zdroj: Vlastní (2025)

Výsledek testu nebyl uspokojivý, viz následující obrázek (Obr. 37).



Obr. 37: První testovací výtisk

Zdroj: Vlastní (2025)

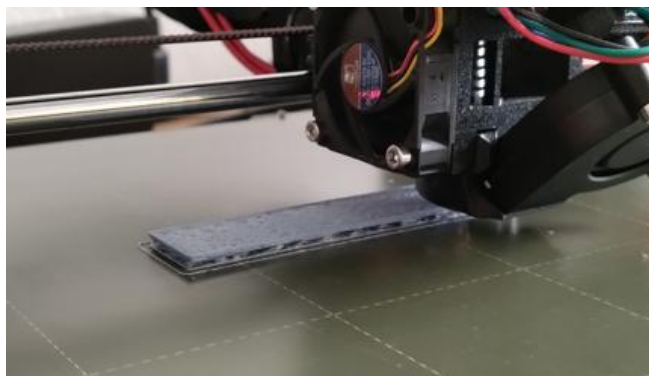
Pro druhý testovací tisk byly zvoleny parametry viz následující tabulka (Tab. 4).

Tab. 4: Druhý testovací tisk

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
260	90	80	100	100

Zdroj: Vlastní (2025)

Vzhledem ke špatné kvalitě výtisku byl tisk předčasně ukončen. Špatná kvalita tisku je vidět na následujícím obrázku (Obr. 38).



Obr. 38: Druhý testovací výtisk – nedokončen

Zdroj: Vlastní (2025)

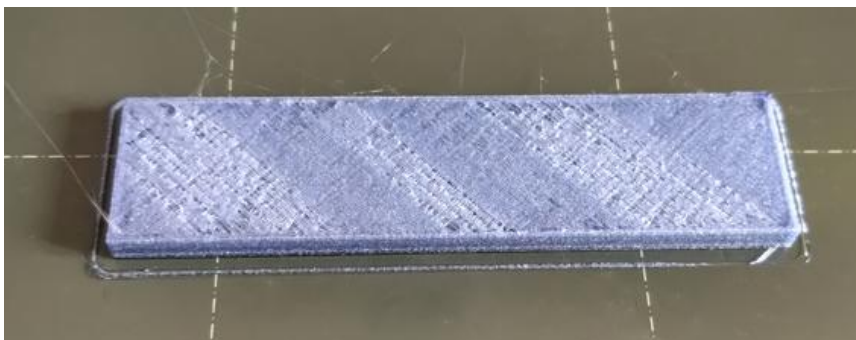
Třetí testovací tisk byl proveden s parametry viz následující tabulka (Tab. 5).

Tab. 5: Třetí testovací tisk

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
265	85	80	100	100

Zdroj: Vlastní (2025)

Při tomto tisku došlo ke zlepšení, ale kvalita tisku stále nebyla uspokojivá viz následující obrázek (Obr. 39).



Obr. 39: Třetí testovací výtisk

Zdroj: Vlastní (2025)

Podmínky čtvrtého testovacího tisku jsou zaznamenány v následující tabulce (Tab. 6).

Tab. 6: Čtvrtý testovací tisk

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
265	85	45	100	100

Zdroj: Vlastní (2025)

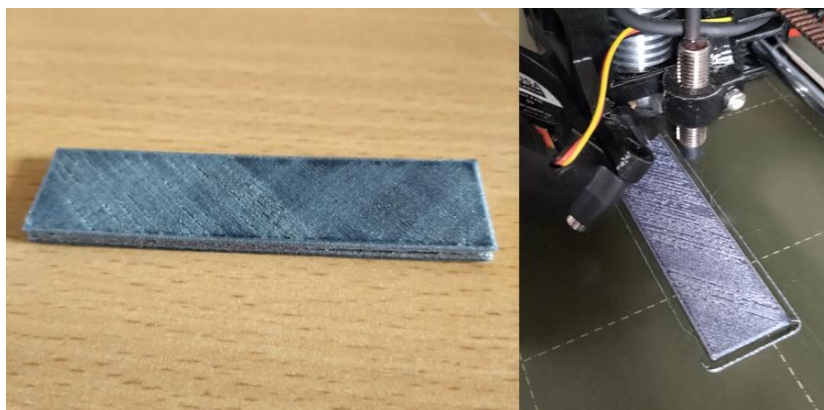
Během tohoto tisku došlo k zaseknutí filamentu v extruderu, proto tisk nebyl dokončen. Část nedokončeného výtisku a zaseklý filament je vidět na následujícím obrázku (Obr. 40).



Obr. 40: Čtvrtý testovací tisk – nedokončený

Zdroj: Vlastní (2025)

Test byl následně opakován, výsledek testu nebyl uspokojivý, protože filament v extruderu prokluzoval, a to mělo za následek snížení hustoty výplně. Výsledný výtisk a chybějící vlákna ve výplni jsou zobrazeny v následujícím obrázku (Obr. 41).



Obr. 41: Opakování čtvrtého testovacího tisku

Zdroj: Vlastní (2025)

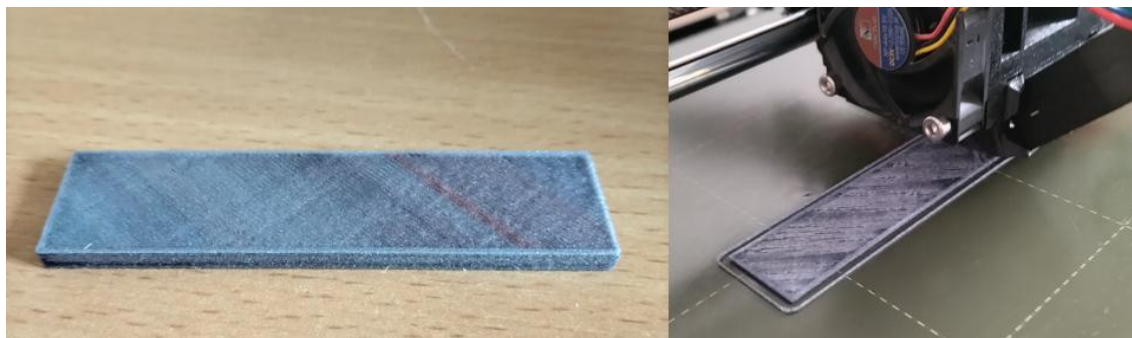
Pátý testovací tisk byl prováděn při podmínkách viz následující tabulka (Tab. 7).

Tab. 7: Pátý testovací tisk

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
275	85	45	100	100

Zdroj: Vlastní (2025)

Během tohoto testu opět docházelo k prokluzu filamentu v extruderu, kvalita výtisku dle vizuální kontroly byla lepší než u předchozího výtisku. Výsledný výtisk a chybějící vlákna ve výplni, které zapříčinil prokluz filamentu v extruderu, jsou zobrazeny v následujícím obrázku (Obr. 42).



Obr. 42: Pátý testovací tisk

Zdroj: Vlastní (2025)

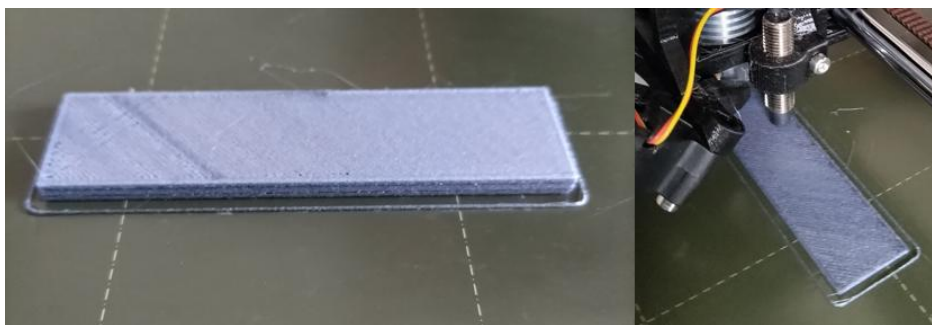
Parametry šestého testovacího tisku jsou znázorněny v následující tabulce (Tab. 8).

Tab. 8: Šestý testovací tisk

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
275	85	35	100	100

Zdroj: Vlastní (2025)

Během tisku opět docházelo k prokluzu filamentu, vizuálně je výsledek tisku srovnatelný s předchozím výtiskem. Výtisk z toho tisku je vidět na následujícím obrázku (Obr. 43).



Obr. 43: Šestý testovací tisk

Zdroj: Vlastní (2025)

Předchozí výtisky měly rozměry vzorku určeného pro ohyb, proto byl dodatečně po šestém testu vytisknut model vzorku pro tahovou zkoušku. Model se nepodařilo vytisknout, kvůli špatné kvalitě filamentu, který byl pro tento model použit. Nedokončený výtisk je vidět v následujícím obrázku (Obr. 44).



Obr. 44: Nedokončený výtisk modelu pro tahovou zkoušku

Zdroj: Vlastní (2025)

U dalšího sedmého testovacího tisku byl upraven násobič extruze na hodnotu 1,1 (Flow 110 %), ostatní parametry byly stejné jako u předchozího testu viz následující tabulka (Tab. 9).

Tab. 9: Sedmý testovací tisk

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
275	85	35	110	100

Zdroj: Vlastní (2025)

Při tisku opět docházelo k prokluzování filamentu. Na dalším obrázku (Obr. 45) je vidět výsledný výtisk a chybějící vlákna ve vnitřní struktuře, což bylo způsobeno prokluzováním filamentu.



Obr. 45: Sedmý testovací tisk

Zdroj: Vlastní (2025)

U osmého testovacího tisku byla snížena rychlost tisku, ostatní parametry byly stejné jako u předchozího testu viz následující tabulka (Tab. 10).

Tab. 10: Osmý testovací tisk

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
275	85	20	110	100

Zdroj: Vlastní (2025)

Opět docházelo k prokluzování filamentu. Výsledný výtisk a chybějící vlákna během tisku jsou zaznamenána na dalším obrázku (Obr. 46).

**Obr. 46: Osmý testovací tisk***Zdroj: Vlastní (2025)*

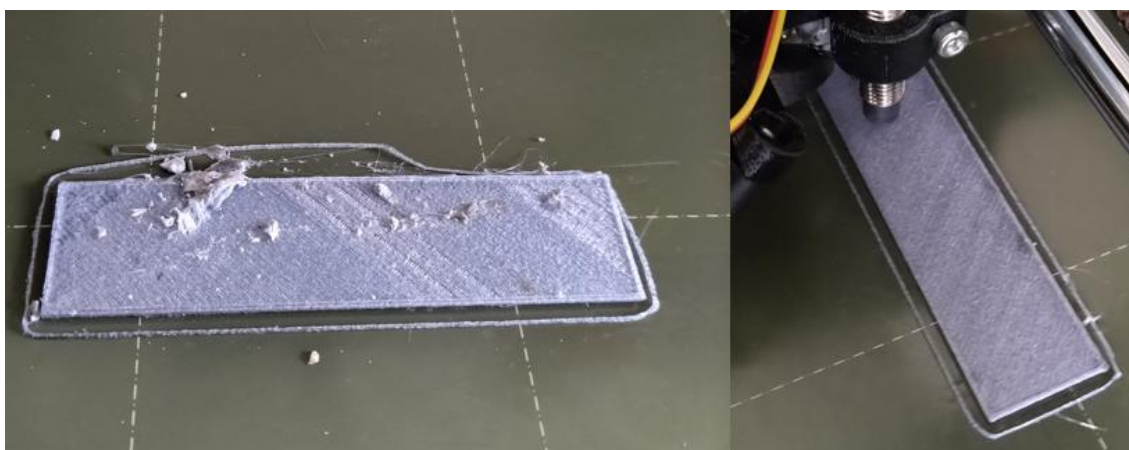
Nejlepší výsledky byly dosaženy při teplotě trysky mezi 265 °C a 275 °C a při rychlosti tisku mezi 35 mm/s a 45 mm/s, proto byl proveden další testovací tisk za účelem potvrdit vhodnost těchto parametrů pro tisk zkušebních vzorků pro ohybovou a tahovou zkoušku. Parametry devátého testovacího tisku jsou zaznamenány v následující tabulce (Tab. 11).

Tab. 11: Devátý testovací tisk

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
270	80	40	100	100

Zdroj: Vlastní (2025)

Tisk se nepodařilo dokončit kvůli znečištění hot endu. Nedokončený výtisk je zobrazen na dalším obrázku (Obr. 47).

**Obr. 47: Nedokončený devátý testovací tisk***Zdroj: Vlastní (2025)*

Po vyčištění hot endu nebylo možné pokračovat v tisku na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ z důvodu závady senzoru osy Z. Proto pro výtisk samotných zkušebních vzorků pro ohybovou

a tahovou zkoušku byla použita tiskárna 3D tiskárna InfinityForge. Pro tisk vzorků byla použita teplota trysky 270 °C a rychlost tisku 40 mm/s. Podmínky tisku jsou znázorněny v následující tabulce (Tab. 12).

Tab. 12: Tiskové parametry pro tisk vzorků

Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [mm/s]	Flow [%]	Výplň [%]
270	70	40	100	100

Zdroj: Vlastní (2025)

2.3 Výroba filamentu z „čirých“ PET lahví

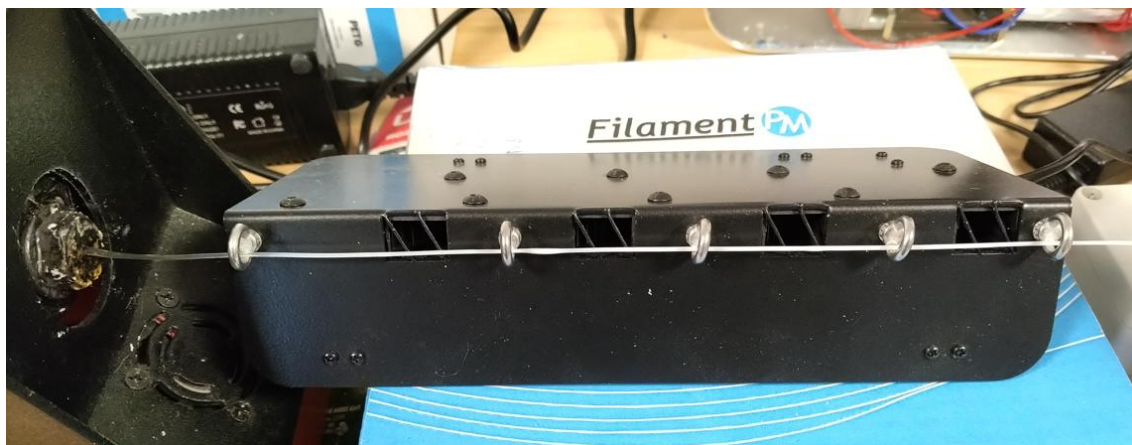
Jelikož výroba filamentu z různých druhů PET lahví byla obtížná, byl experiment zopakován pouze s „čirými“ PET lahvemi, za účelem získání lepší homogenity filamentu a jeho snadnější výroby. Použitými PET lahvemi byly především lahve od pitných vod, viz následující obrázek (Obr. 48).



Obr. 48: „Čiré“ PET lahve

Zdroj: Vlastní (2025)

Zpracování, drcení, extruze, 3D tisk vzorků a metody testování vzorků byly stejné jako u předchozího experimentu. Na následujícím obrázku (Obr. 49) lze vidět extruzi filamentu z „čirých“ PET lahví.



Obr. 49: Extruze filamentu z „čirého“ PET odpadu

Zdroj: Vlastní (2025)

Tento experiment neprokázal, že by výroba filamentu z tohoto druhu PET lahví byla snazší. Stejně jako u předchozího experimentu docházelo k nerovnoměrné rychlosti extruze filamentu a při 3D tisku vzorků k prokluzu filamentu v extruderu. Vzhledem ke špatné kvalitě vytištěných vzorků pro zkoušku tahem a tomu, že nedošlo ke zlepšení výroby filamentu a procesu 3D tisku, nebyly dále vytištěny vzorky pro zkoušku ohybem.

2.4 Metody testování vstupních materiálů a připravených vzorků

Kapitola se zabývá metodami použitými pro hodnocení vlastností vytištěných vzorků.

2.4.1 Termická analýza

Pomocí přístroje SDT Q600 (TA Instruments, USA) byly charakterizovány s ohledem na teplotní charakteristiky připravené materiály (drtiny a filamenty) v teplotním rozsahu 25-500 °C pod inertní atmosférou dusíku.

2.4.2 Měření hmotnostního indexu toku taveniny

Měření bylo provedeno pomocí výtlačného plastometru LMI Dynisco (Dynisco Instruments, USA) při zátěži 2,16 kg a teplotě 285 °C. Měřeným materiálem byl vyrobený filament z PET odpadu. Měření bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 1133-1 (Česká agentura pro standardizaci, 2022).

2.4.3 Rozměrová analýza

Rozměrová analýza byla provedena s cílem zhodnocení rozměrů vytištěných vzorků s ohledem na výkresovou dokumentaci. U vzorků určených pro tahovou zkoušku byla měřena tloušťka a šířka, u vzorků určených pro ohybovou zkoušku byla měřena tloušťka a délka. Rozměry byly u každého vzorku měřeny ve třech různých místech a následně byl vypočten z těchto měření průměr. Pro měření rozměrů bylo použito digitální posuvné měřítko SOMET 0-150/0,01 mm (SOMET, Česká republika).

2.4.4 Mikroskopie

Pro detailnější zobrazení povrchu vytištěných vzorků byl použit digitální mikroskop Keyence VHX 6000 (Keyence, Belgie) s nastaveným zvětšením 50x. Dále byla pomocí digitálního optického mikroskopu zhodnocena připravená drť plastového odpadu s nastaveným zvětšením 20x.

2.4.5 Měření drsnosti povrchu

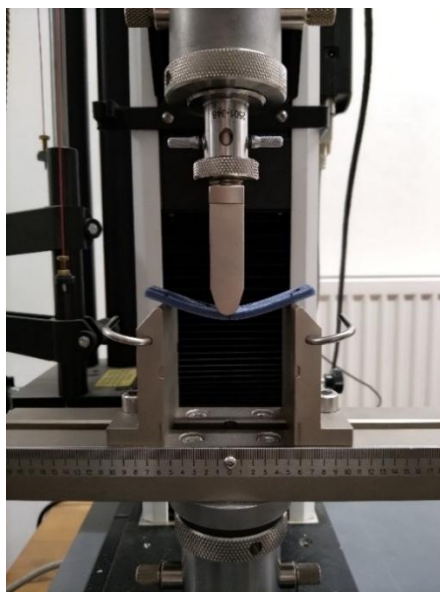
K měření drsnosti povrchu byl použit drsnoměr Insize ISR-C300 (INSIZE, Čína), přičemž měřenými parametry byla střední aritmetická odchylka drsnosti (R_a) a střední hloubka drsnosti (R_z). Měření bylo provedeno na pěti vzorcích určených pro zkoušku ohybem dle normy ČSN EN ISO 21920-2 (Česká agentura pro standardizaci, 2023), přičemž každý vzorek byl změřen na pěti odlišných místech.

2.4.6 Zkouška tahem

Testování bylo provedeno na pěti vzorcích „psích kostí“ dle výkresu viz příloha A.1. Původní výkres s nezmenšenými rozměry „psích kostí“ je k nahlédnutí v příloze A.2. K měření bylo využito zařízení Instron 3345 (Instron, USA) vybaveno siloměrem 5 kN. Rychlost posuvu příčnicku během testování byla 1 mm/min, deformace byla snímána posuvem příčnicku. Testování bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 527-2 (Česká agentura pro standardizaci, 2012).

2.4.7 Zkouška tříbodovým ohybem

Měření bylo provedeno na pěti vzorcích. Rozměry vzorků jsou k dispozici v příloze A.3. K měření bylo využito zařízení Instron 3345 (Instron, USA) se siloměrem 5 kN, rychlost posuvu příčnicku během ohybové zkoušky byla 1 mm/min, deformace byla snímána posuvem příčnicku. Testování bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 178 (Česká agentura pro standardizaci, 2019). Na následujícím obrázku (Obr. 50) je znázorněn deformovaný vzorek v průběhu zkoušky.



Obr. 50: Zkouška ohybem

Zdroj: Vlastní (2025)

3 Výsledky a diskuse

Kapitola navazuje na experimentální část a zhodnocuje zjištěné výsledky, dále se zabývá porovnáním s jinými řešeními využívající PET lahve k 3D tisku a možnostmi optimalizace procesu výroby filamentu.

3.1 Výsledky testování vstupních materiálů a filamentů

Kapitola obsahuje výsledky testování vstupních materiálů a filamentů.

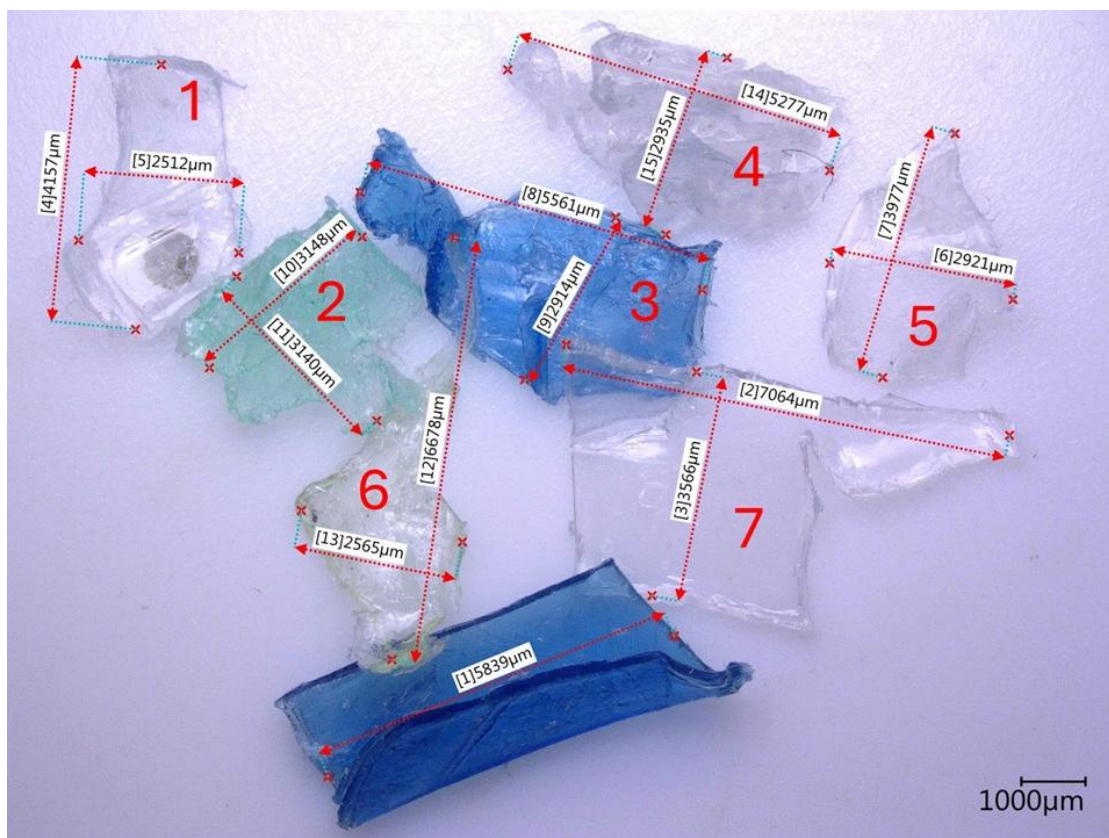
3.1.1 Analýza velikosti drtin PET odpadu

Velikosti drtin prošlých skrz síto jsou zaznamenány na Obr. 51 a v následující tabulce (Tab. 13). Maximální délka drtin se pohybovala kolem 7 mm a maximální šířka kolem 3,5 mm. Z obrázku je také patrné, že velikosti a tvary drtin jsou odlišné, to může vést k nerovnoměrnému tavení a zároveň ke kolísání tlaku a průtoku v extruderu.

Tab. 13: Velikost drtin propadlých skrz síto

Číslo drtiny	Délka [mm]	Šířka [mm]
1	4,16	2,51
2	3,15	3,14
3	5,56	2,91
4	5,28	2,94
5	3,98	2,92
6	6,68	2,57
7	7,06	3,57
Průměr	5,12	2,94
Směrodatná odchylka	1,45	0,36

Zdroj: Vlastní (2025)



Obr. 51: Velikost drtin propadlých skrz síto (20x zvětšeno)

Zdroj: Vlastní (2025)

3.1.2 Termická analýza drtin a vyrobeného filamentu

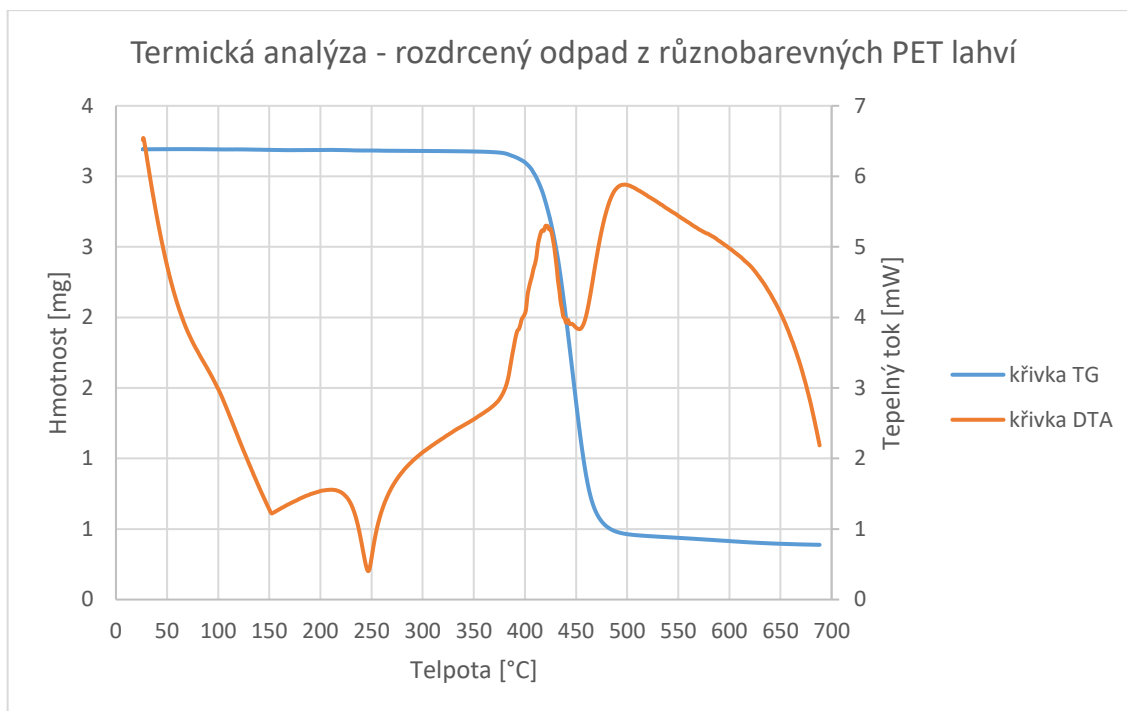
Pro zjištění teploty tání plastového odpadu a vyrobeného filamentu byla provedena termická analýza.

Pro tání pozorované látky je charakteristický endotermický efekt (viditelný na křivce DTA) při současném zachování hmotnosti (viditelném na křivce TG) pozorované látky (Štarha a Trávníček, 2011).

Běhálek (2015) uvádí, že teplota tání se pro PET typicky pohybuje v rozmezí 250 °C až 260 °C. Prodejce filamentu CREAMELT (c2018) uvádí, že filament CREAMELT® rPET fifty vyrobený z recyklovaného PET má teplotu tání také v rozmezí 250 °C až 260 °C. Studie Ganapathi, Abdelwahab a Rabnawaz (2024) uvádí, že hodnota teploty tání pro panenský PET je 244 ± 1 °C a pro tzv. bottle grade PET (PET-B) – láhvvý typ PET je teplota tání $244 \pm 1,4$ °C.

Na základě výše uvedených informací lze konstatovat, že zjištěné teploty tání jak u nadrcených odpadů, tak u vyrobených filamentů odpovídají běžným teplotám tání pro PET.

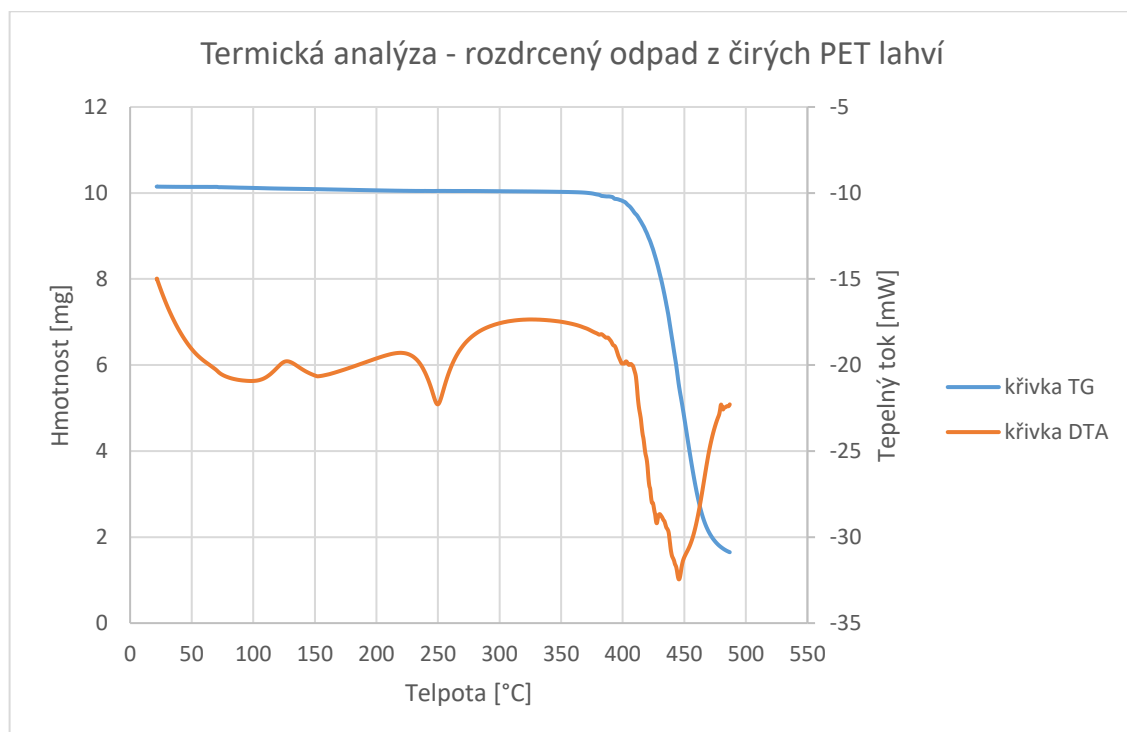
Průběh termické analýzy rozdrčeného odpadu z různobarevných PET lahví je zaznamenán na následujícím obrázku (Obr. 52). Z obrázku je patrné, že teplota tavení rozdrčeného odpadu se pohybuje kolem 250 °C.



Obr. 52: Termická analýza – rozdrčený odpad z různobarevných PET lahví

Zdroj: Vlastní (2025)

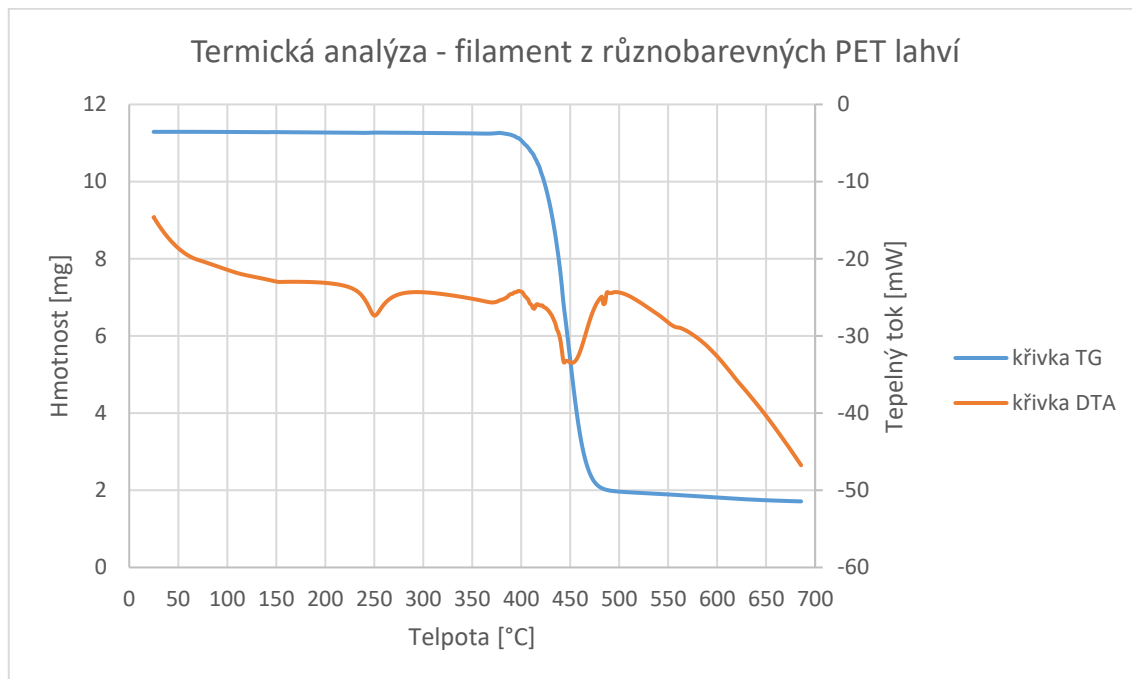
Na dalším obrázku (Obr. 53) je zaznamenán průběh termické analýzy rozdrčeného odpadu z čirých PET lahví. Teplota tavení rozdrčeného odpadu z čirých PET lahví se také pohybuje kolem 250 °C.



Obr. 53: Termická analýza – rozdrčený odpad z čirých PET lahví

Zdroj: Vlastní (2025)

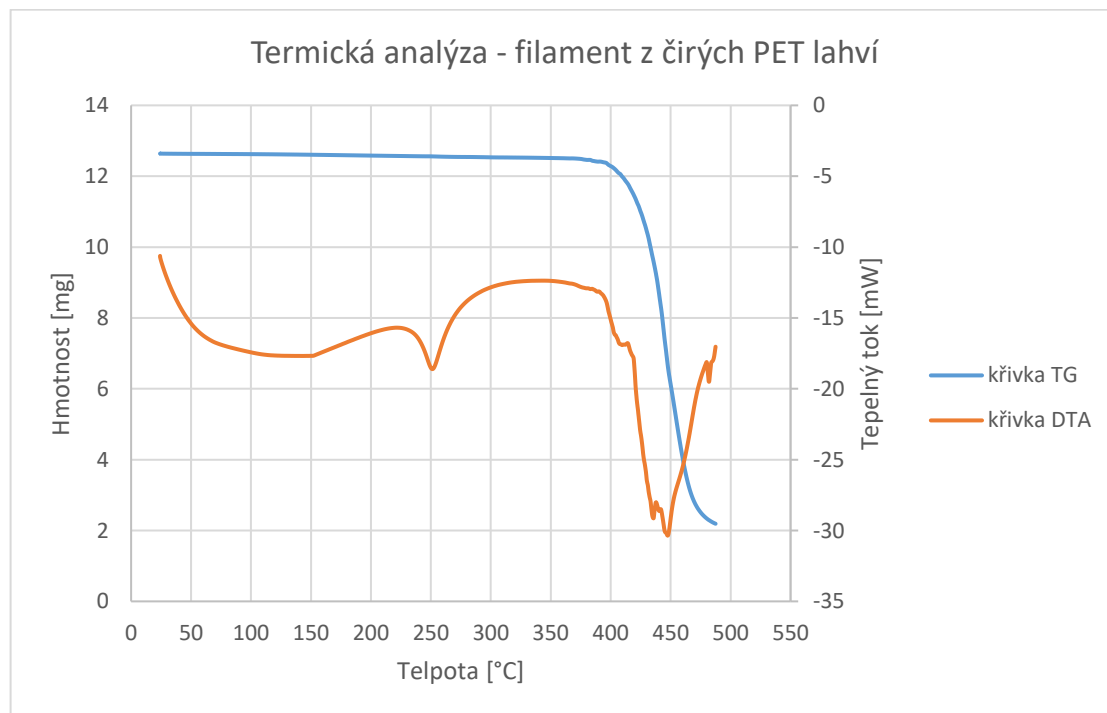
Dále byla provedena termická analýza vzniklého filamentu z různobarevných PET lahví, průběh analýzy je vidět na dalším obrázku (Obr. 54). Z obrázku je patrné, že teplota tavení filamentu se pohybuje opět okolo 250 °C.



Obr. 54: Termická analýza – filament z různobarevných PET lahví

Zdroj: Vlastní (2025)

Na dalším obrázku (Obr. 55) je znázorněn průběh termické analýzy pro filament vyrobený z čirých PET lahví, teplota tavení filamentu se opět pohybuje okolo 250 °C.



Obr. 55: Termická analýza – filament z čirých PET lahví

Zdroj: Vlastní (2025)

3.1.3 Měření hmotnostního indexu toku taveniny

V následující tabulce (Tab. 14) jsou zaznamenány výsledky z měření hmotnostního indexu toku taveniny filamentu vyrobeného z různobarevných PET lahví a filamentu vyrobeného z čirých PET lahví. Průměr hmotnostního indexu toku taveniny pro filament z různobarevných PET lahví je 75,6 g/10 min, rozptyl od 58,8 g/10 min do 86,4 g/10 min indikuje nehomogenní kvalitu materiálu. Průměr hmotnostního indexu toku taveniny pro filament z čirých PET lahví je 88,8 g/10 min, rozptyl od 69,6 do 100,8 g/10 min vypovídá o rozdílném předchozím zpracování materiálu.

Tab. 14: Naměřené hodnoty hmotnostního indexu toku taveniny

Hmotnostní index toku taveniny [g/10 min]	
Filament z různobarevných PET	Filament z čirých PET
75,6 ± 14,7	88,8 ± 16,8

Zdroj: Vlastní (2025)

Studie Alzahrani (2017) uvádí, že v rámci ní byla naměřená průměrná hodnota hmotnostního indexu toku taveniny 90,56 g/10 min, tato hodnota je porovnatelná s průměrnou hodnotou hmotnostního indexu toku taveniny pro filament vyrobený z čirých PET lahví.

Dle Alzahrani (2017) se hmotnostní index toku taveniny pohybuje pro běžné termoplasty využívané v rámci metody FFF od 5 g/10 min do 30 g/10 min. V porovnání s těmito materiály má vlastní PET filament výrazně vyšší hodnotu hmotnostního indexu toku taveniny.

Mechanická recyklace polymerů může přispívat ke snižování molekulové hmotnosti v důsledku degradace, a to má za následek zvýšení indexu toku taveniny. Index toku taveniny recyklované PET lahve je pětikrát větší než rozemleté části PET lahve po použití spotřebitelem. Hodnota indexu toku taveniny má vliv na zpracovatelnost plastu. Hodnota indexu toku taveniny má vliv na pevnost v tahu, pevnost v ohybu, pevnost ve střihu, houževnatost a výsledné prodloužení. Nižší hodnota indexu toku taveniny vede ke zvýšení těchto uvedených vlastností. Snižování hodnoty indexu toku taveniny, a tím i zvýšení molekulové hmotnosti lze dosáhnout pomocí přidání vhodného aditiva (SpecialChem, 2025).

Studie Mikula a kol. (2020) uvádí, že mechanické vlastnosti recyklovaného PET materiálu lze zlepšit přidáním bio-karbonu. Přidáním bio-karbonu se zvýšila pevnost materiálu v tahu o 32 % a zvýšení modulu pružnosti přibližně o 60 %.

3.2 Vyhodnocení testování připravených vzorků

Kapitola obsahuje výsledky zjištěné pomocí zvolených metod testování a jejich následnou interpretaci.

3.2.1 Rozměrová analýza

Rozměrová analýza byla provedena pro zhodnocení odchylek od výkresové dokumentace.

Následující tabulka (Tab. 15) zaznamenává naměřené výsledky rozměrů vzorků pro tahovou zkoušku vyrobených z filamentu z různobarevných PET lahví.

Tab. 15: Naměřené rozměry vzorků z různobarevného PET pro zkoušku tahem

Vzorek	Průměrná tloušťka [mm]	Odchylka od výkresu – tloušťka [%]	Průměrná šířka [mm]	Odchylka od výkresu – šířka [%]
1	2,00	0,00	5,23	4,53
2	1,97	-1,67	5,47	9,33
3	2,27	13,50	5,35	6,93
4	1,98	-1,00	5,25	4,93
5	2,37	18,67	5,65	13,07
Celkový průměr	2,12	5,90	5,39	7,76

Zdroj: Vlastní (2025)

Zhodnocení tloušťky vzorků z různobarevného PET pro zkoušku tahem: Největší odchylka byla zaznamenána u vzorku číslo 5 a to +0,37 mm. Průměrná absolutní odchylka je 0,14 mm. Kromě vzorků číslo 3 a 5 mají vzorky tloušťku blízkou nominální hodnotě rozměru virtuálního modelu. Vyšší odchylka u vzorku 3 a 5 poukazuje na možnou nestabilitu procesu 3D tisku nebo na nepravidelný tok materiálu, který může být způsobený kvůli nedostatečné homogenitě vyrobeného filamentu.

Zhodnocení šířky vzorků z různobarevného PET pro zkoušku tahem: Největší odchylka byla opět zaznamenána u vzorku číslo 5 s hodnotou +0,65 mm. Průměrná absolutní odchylka je 0,39 mm. Šířka všech vzorků je větší než nominální hodnota virtuálního modelu, značný rozdíl v tloušťce je patrný u vzorků číslo 3 a 5.

V následující tabulce (Tab. 16) jsou zaznamenány výsledky měření vzorků určených pro zkoušku ohybem vyrobených z různobarevných PET lahví.

Tab. 16: Naměřené rozměry vzorků z různobarevného PET pro zkoušku ohybem

Vzorek	Průměrná tloušťka [mm]	Odchylka od výkresu – tloušťka [%]	Průměrná délka [mm]	Odchylka od výkresu – délka [%]
1	3,95	-1,25	80,07	0,08
2	3,92	-1,92	80,10	0,13
3	3,98	-0,50	80,07	0,08
4	3,99	-0,25	80,26	0,32
5	3,94	-1,58	79,92	-0,10
Celkový průměr	3,96	-1,10	80,08	0,10

Zdroj: Vlastní (2025)

Zhodnocení tloušťky vzorků z různobarevného PET pro zkoušku ohybem: Největší odchylka byla zaznamenána u vzorku číslo 2 s hodnotou -0,08 mm. Průměrná absolutní odchylka je 0,04 mm. Tloušťky vzorků jsou konzistentní a jen mírně pod nominální hodnotou virtuálního modelu.

Zhodnocení délky vzorků z různobarevného PET pro zkoušku ohybem: Největší odchylka byla zaznamenána u vzorku číslo 4 a to +0,26 mm. Průměrná absolutní odchylka je 0,12 mm. Výsledky jsou poměrně konzistentní.

V následující tabulce (Tab. 17) jsou zaznamenány výsledky měření vzorků pro tahovou zkoušku, které jsou vyrobeny z filamentu z čirých PET lahví.

Tab. 17: Naměřené rozměry vzorků z čirého PET pro zkoušku tahem

Vzorek	Průměrná tloušťka [mm]	Odchylka od výkresu – tloušťka [%]	Průměrná šířka [mm]	Odchylka od výkresu – šířka [%]
1	2,16	7,83	5,07	1,40
2	2,00	0,00	5,30	6,07
3	1,82	-9,00	5,12	2,33
4	2,01	0,67	5,08	1,60
5	2,04	1,83	5,10	2,00
Celkový průměr	2,01	0,27	5,13	2,68

Zdroj: Vlastní (2025)

Zhodnocení tloušťky vzorků z čirého PET pro zkoušku tahem: Největší odchylka v tloušťce byla změřena u vzorku číslo 3 s hodnotou -0,18 mm, průměrná absolutní odchylka je 0,08 mm. Rozdíl naměřených tloušťek oproti nominální hodnotě virtuálního modelu je do $\pm 0,18$ mm.

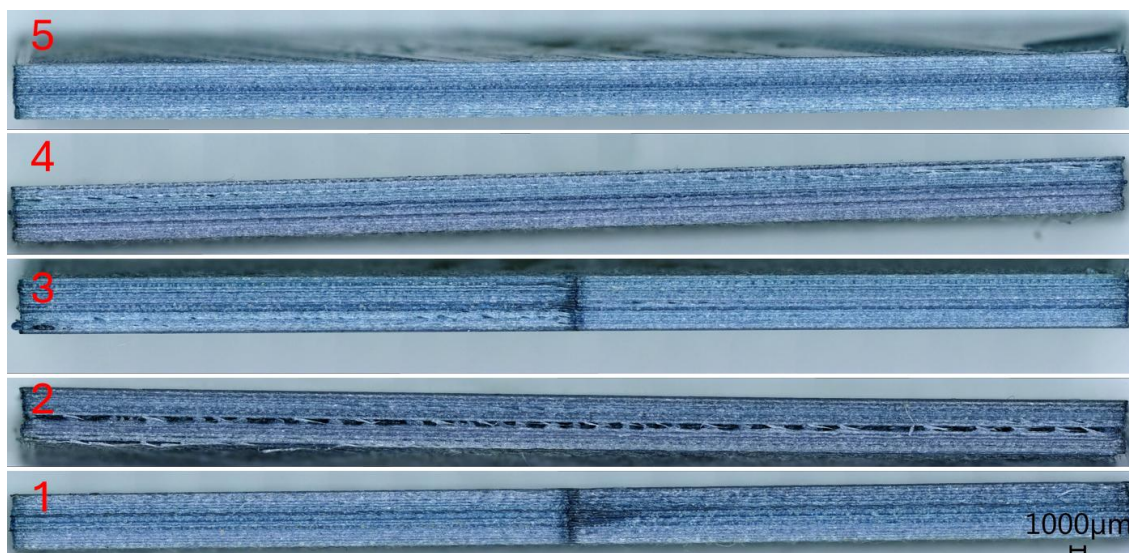
Zhodnocení šířky vzorků z čirého PET pro zkoušku tahem: Největší odchylka v šířce byla naměřena u vzorku číslo 2 s hodnotou +0,3 mm. Průměrná absolutní odchylka je 0,13 mm. Šířka všech vzorků byla větší než nominální šířka virtuálního modelu, výsledky měření lze označit za poměrně konzistentní.

Hranice tolerance pro 3D tisk jsou u metody FFF typicky $\pm 0,5$ % rozměru s absolutní dolní hranicí $\pm 0,15$ mm až $\pm 0,5$ mm (Sevens a Mroncz, 2025; SINTERIT, c2025).

Všechny naměřené rozměry se většinou pohybují v rozmezí odchylek, které jsou pro technologii FFF běžné. Před samotným 3D tiskem bylo nutné vyrobený filament vizuálně zkontrolovat a rozdělit na části, které měly dostatečně rovnoměrný průměr pro zpracování. Tento fakt mohl společně s neúplnou homogenitou ovlivnit plynulost extruze a tím i rozměrovou přesnost jednotlivých vrstev.

3.2.2 Mikroskopie

Na dalším obrázku (Obr. 56) je zaznamenaná struktura jednotlivých vytištěných vzorků pro ohyb z filamentu z různobarevných PET lahví. Rozdíly ve struktuře jednotlivých vzorků jsou dány kolísavou kvalitou filamentu.

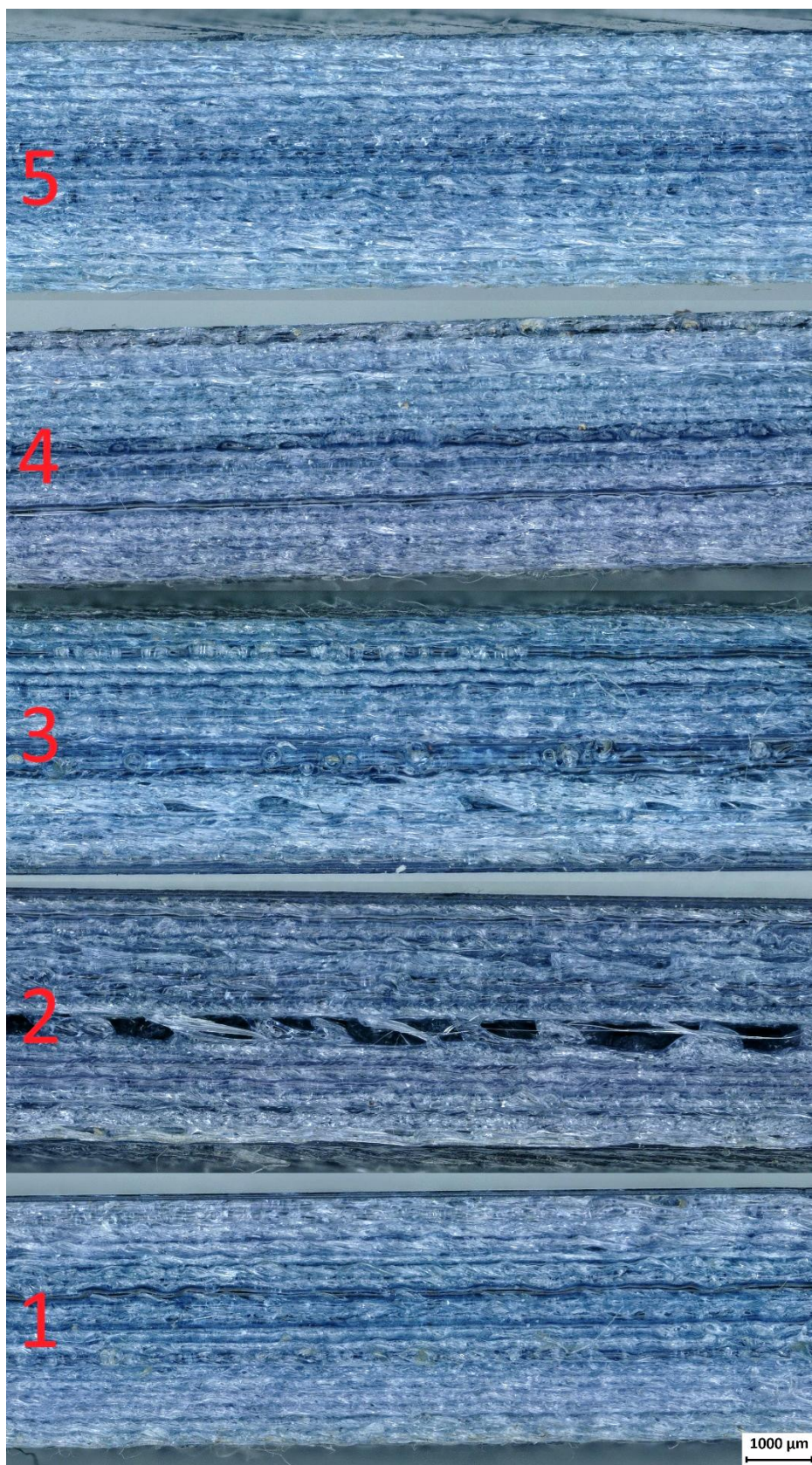


Obr. 56: Vzorky pro ohybovou zkoušku (50x zvětšeno)

Zdroj: Vlastní (2025)

Na předchozím obrázku (Obr. 56) lze pozorovat vrstvenou strukturu, která je charakteristická pro technologii FFF. Z obrázku je patrný rozdíl v barevném odstínu jednotlivých vrstev, odstín přechází od světle modré až tmavě modrou. To může být způsobeno změnami v průtoku taveniny během tisku, která může souviset s nehomogenním složením recyklovaného materiálu a také s nejednotným průměrem filamentu. U vzorku č. 2 je patrné, že v cca polovině celkové tloušťky vzorku došlo k výraznému kolísání až přerušení toku materiálu při extruzi. To lze opět přisuzovat nepravidelnosti ve filamentu. U všech vzorků lze také pozorovat, že vrstvy na konci dráhy na sebe zcela přesně nenavazují, to může být způsobeno mechanickými vlivy tiskárny.

Detail boční struktury vzorků pro ohýb z filamentu z různobarevných PET lahví je znázorněn na dalším obrázku (Obr. 57).



Obr. 57: Detail boční struktury vzorků pro ohybovou zkoušku (50x zvětšeno)

Zdroj: Vlastní (2025)

Obrázek detailu boční struktury vzorků (Obr. 57) potvrzuje poznatky získané z rozměrové analýzy, kde především u vzorků určených pro tahovou zkoušku byla naměřena větší šířka oproti

nominální tloušťce virtuálního modelu. To je způsobeno zvlněním jednotlivých vrstev a částečným roztečením materiálu do stran. Tento jev může být způsoben kolísající extruzí kvůli nerovnoměrnému průměru filamentu, kde přebytky roztaveného materiálu mohou vést ke zvětšení reálného rozměru. Na snímku lze dále spatřit jemná vlákénka (pravděpodobně jde o tzv. stringing) a světle hnědé skvrny. Tyto skvrny lze vysvětlit kontaminací nebo přepálenými zbytky materiálu.

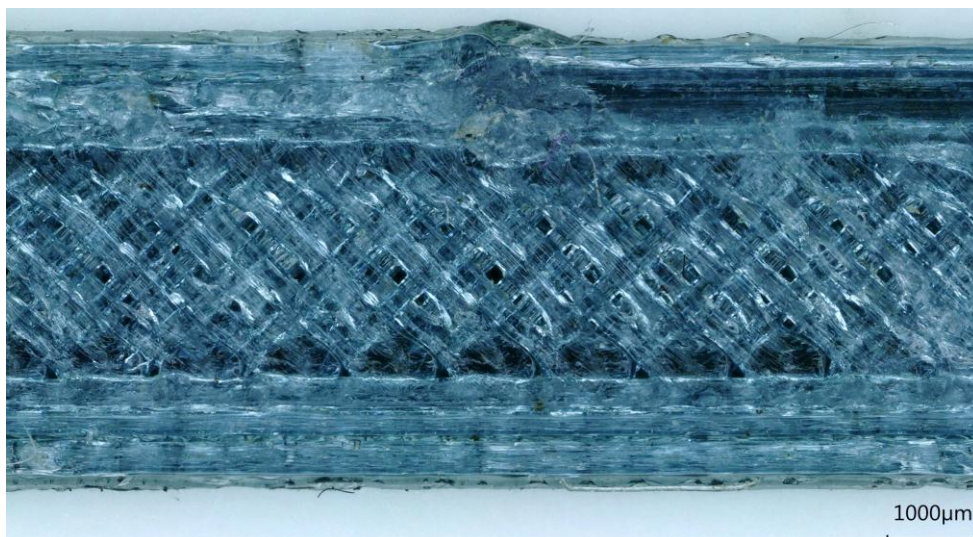
Rozdílnou strukturu vzorků pro tahovou zkoušku z filamentu z různobarevných PET lahví lze pozorovat na dalším obrázku (Obr. 58). V některých oblastech jsou viditelná jednotlivá tisková vlákna, zatímco v jiných oblastech jsou vrstvy plně slinuté do kompaktního celku. Opět lze pozorovat rozdíly v modrém odstínu vzorků.



Obr. 58: Struktura vzorků pro tahovou zkoušku (50x zvětšeno)

Zdroj: Vlastní (2025)

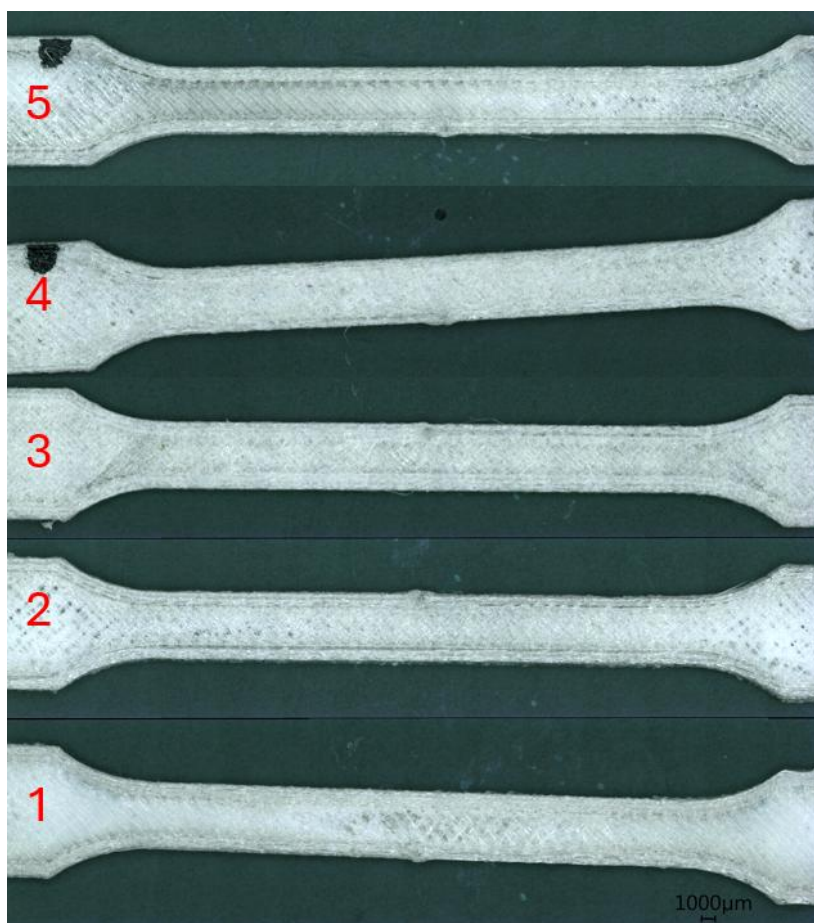
Detailnější pohled na strukturu vzorku č. 1 určeného pro tahovou zkoušku z filamentu z různobarevných PET lahví je zachycen na následujícím obrázku (Obr. 59). V tomto obrázku jsou viditelná jednotlivá tisková vlákna.



Obr. 59: Detail struktury vzorku pro tahovou zkoušku (50x zvětšeno)

Zdroj: Vlastní (2025)

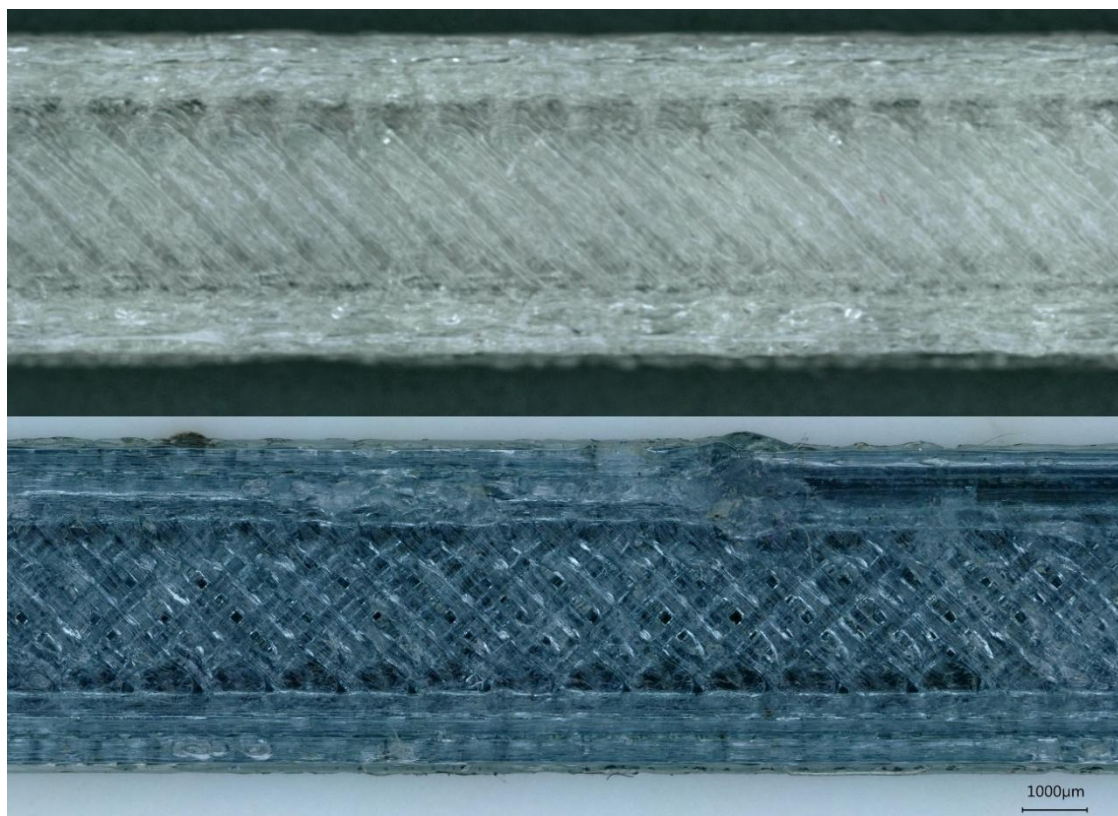
Na dalším obrázku (Obr. 60) jsou zobrazeny vytištěné vzorky z filamentu z čirých PET lahví. Opět lze pozorovat rozdílnou strukturu vzorků. Celkově je výplň vzorků horší než u předchozích vzorků pro tahovou zkoušku, ve struktuře lze pozorovat i chybějící tisková vlákna. Nejlepší struktura byla zaznamenána u vzorku č. 5.



Obr. 60: Struktura vzorků z „čirého“ PET pro tahovou zkoušku (50x zvětšeno)

Zdroj: Vlastní (2025)

Na dalším obrázku (Obr. 61) je nahoře zachycena struktura vzorku č. 5 pro tahovou zkoušku vyrobeného z filamentu z čirých PET lahví, dole je struktura vzorku č. 1 pro tahovou zkoušku z filamentu z různobarevných PET lahví. U vzorku č. 5 lze pozorovat plně slinutá vlákna v kompaktní celek. Vzorek č. 5 z tohoto obrázku měl v rámci tahové zkoušky naměřenou nejvyšší pevnost tahu v rámci vzorků vyrobených z čirých PET lahví. Vzorek č. 1 měl naopak nejmenší naměřenou hodnotu v rámci vzorků vyrobených z různobarevných PET lahví. I přesto vzorek č. 1 dosáhl vyšší pevnosti v tahu než vzorek č. 5, což lze pozorovat v kapitole 3.2.4.



Obr. 61: Porovnání struktury vzorků pro tahovou zkoušku (50x zvětšeno)

Zdroj: Vlastní (2025)

3.2.3 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo provedeno na pěti vzorcích určených pro ohybovou zkoušku vyrobených z filamentu z různobarevných PET lahví, každý vzorek byl změřen na pěti různých místech. Výsledky jsou znázorněny v následující tabulce (Tab. 18).

Tab. 18: Průměrné hodnoty drsnosti povrchu

Průměrné hodnoty drsnosti povrchu	
Ra [μm]	Rz [μm]
$7,48 \pm 1,57$	$37,64 \pm 6,05$

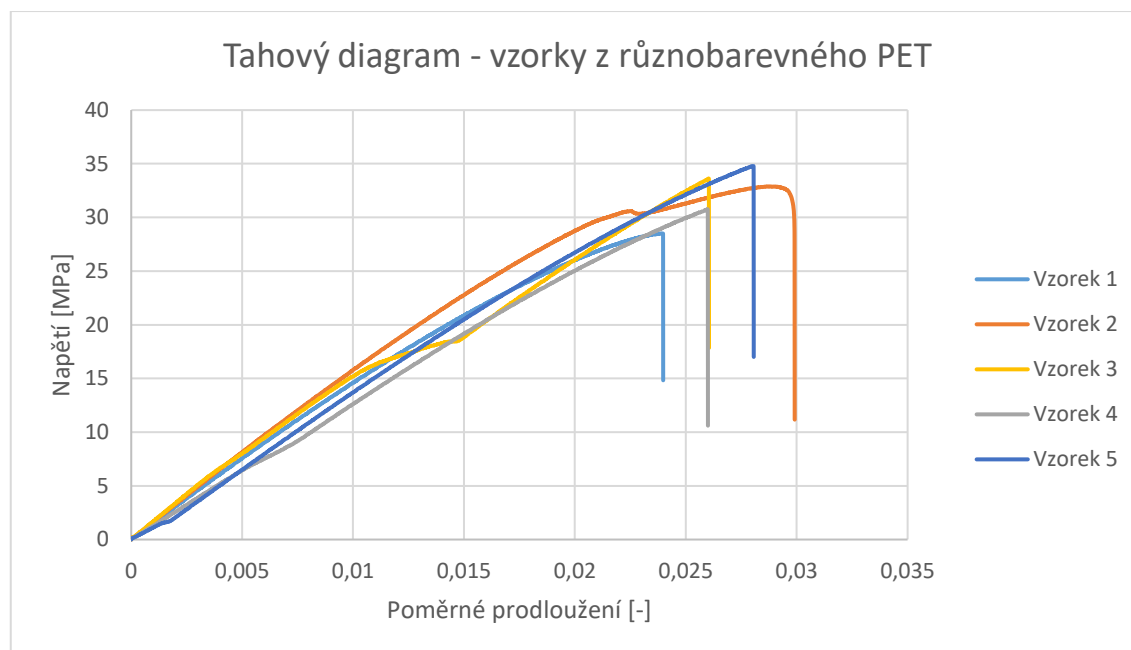
Zdroj: Vlastní (2025)

Rozsah naměřených hodnot Ra se pohyboval od 4,95 μm do 8,96 μm, průměr naměřených hodnot Ra je 7,48 μm. Rozsah naměřených hodnot Rz byl od 27,15 μm do 42,03 μm, průměr hodnot Rz je 37,64 μm.

Podle studií Lozrt a kol. (2023) a Buj-Corral, Sánchez-Casas a Luis-Pérez (2021) se drsnosti v rámci FFF metody pohybují od R_a 5 μm až 15 μm , dále od R_z 30 μm až 80 μm . Naměřené hodnoty tak odpovídají běžné kvalitě FFF výtisků.

3.2.4 Zkouška tahem

Na následujícím obrázku (Obr. 62) jsou zaznamenány průběhy zkoušky tahem pro jednotlivé vzorky vyrobené z filamentu z různobarevných PET lahví.



Obr. 62: Tahový diagram – vzorky z různobarevného PET

Zdroj: Vlastní (2025)

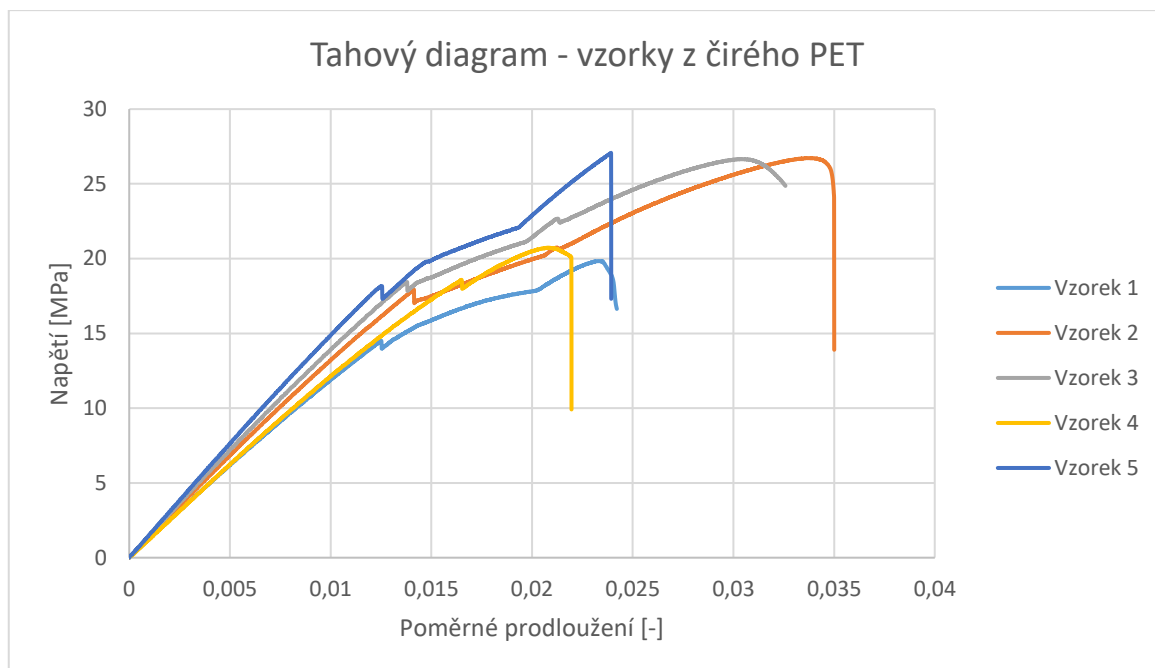
V následující tabulce (Tab. 19) jsou zaznamenány výsledky zkoušky tahem. Naměřené hodnoty pevnosti v tahu se pohybovaly od 28,50 MPa do 34,78 MPa.

Tab. 19: Výsledky zkoušky tahem pro vzorky z různobarevného PET

Vzorek	Protažení [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Youngův modul pružnosti [MPa]
Průměr	2,67	32,11	1651,55
Směrodatná odchylka	0,19	2,49	111,13

Zdroj: Vlastní (2025)

Na následujícím obrázku (Obr. 63) jsou zaznamenány průběhy zkoušky tahem pro jednotlivé vzorky vyrobené z filamentu z čirých PET lahví.

**Obr. 63: Tahový diagram vzorků z čirého PET***Zdroj: Vlastní (2025)*

V následující tabulce (Tab. 20) jsou zaznamenány výsledky zkoušky tahem pro vzorky vyrobené z filamentu z čirých PET lahví. Tyto vzorky vykazovaly nižší průměrnou pevnost v tahu (24,20 MPa) v porovnání se vzorky vyrobenými z filamentu z různobarevných PET lahví. To je v souladu s pozorovanou nižší strukturální kvalitou těchto vzorků v rámci provedené mikroskopie.

Tab. 20: Výsledky zkoušky tahem pro vzorky z čirého PET

Vzorek	Protažení [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Youngův modul pružnosti [MPa]
Průměr	2,69	24,20	1384,66
Směrodatná odchylka	0,54	3,60	142,69

Zdroj: Vlastní (2025)

Následující tabulka (Tab. 21) obsahuje porovnání s jinými studiemi, které se zabývaly měřením pevnosti v tahu u vzorků vyrobených z rPET.

Tab. 21: Porovnání naměřených tahových napětí

Zdroj	Tahové napětí [MPa]
Vlastní – rPET	32,1 ± 2,5
Vlastní – čirý rPET	24,2 ± 3,6
Çava a Aslan (2023)	54 ± 4
Zander, Gillan a Lambeth (2018)	35,1 ± 8
Kunášek (2025)	31,9 ± 2,4

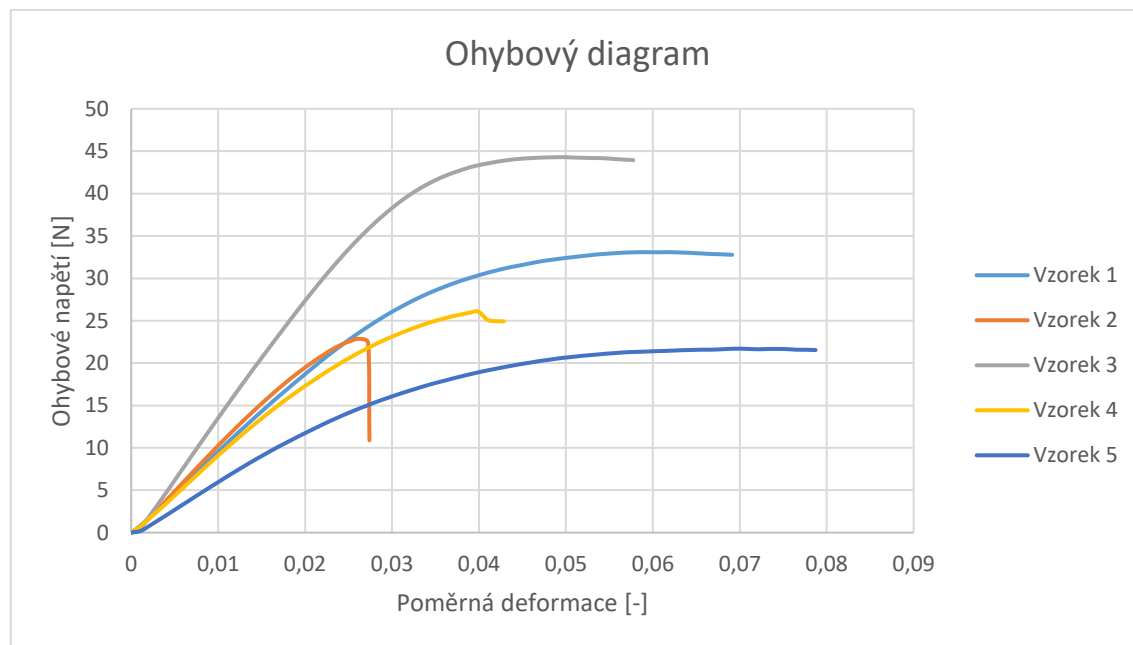
Zdroj: Çava a Aslan (2023); Zander, Gillan a Lambeth (2018); Kunášek (2025)

Výsledky pro vlastní rPET vyrobený z filamentu z různobarevných PET lahví jsou porovnatelné s výsledky studie kolektivu Zander, Gillan a Lambeth (2018) a diplomové práce Kunášek (2025). Studie Çava a Aslan (2023) dosahovala výrazně vyšších hodnot pevností v tahu. Výsledky pro vlastní čirý rPET se nachází pod spodní hranicí intervalu výsledků porovnávaných studií.

Výsledky tahového napětí vzorků vyrobených z filamentu z různobarevných PET lahví lze označit za přijatelné, výsledky vzorků z filamentu z čirých PET lahví za nedostatečné.

3.2.5 Zkouška tříbodovým ohybem

Na následujícím obrázku (Obr. 64) jsou zaznamenány průběhy zkoušky ohybem pro jednotlivé vzorky vyrobené z filamentu z různobarevných PET lahví.



Obr. 64: Ohybový diagram

Zdroj: Vlastní (2025)

V následující tabulce (Tab. 22) jsou zaznamenány výsledky zkoušky ohybem. Naměřené hodnoty pevnosti v ohybu se pohybovaly v rozmezí od 21,70 MPa do 44,30 MPa. Průměrná hodnota pevnosti v ohybu je 29,61 MPa. Vyšší směrodatná odchylka jak pro pevnost v ohybu, tak i průhyb značí nerovnoměrnost vnitřní struktury vzorků, která byla pozorována v rámci mikroskopie. Jako příčinu tohoto jevu lze opět označit kolísající průměr a nedostatečnou homogenitu filamentu, které vedou k nekonzistentnímu toku materiálu při tisku.

Tab. 22: Výsledky zkoušky ohybem

Vzorek	Poměrný průhyb [%]	Ohybové napětí [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Průměr	4,94	29,61	1023,14
Směrodatná odchylka	1,73	9,33	296,58

Zdroj: Vlastní (2025)

Následující tabulka (Tab. 23) obsahuje porovnání s jinými studiemi, které se zabývaly měřením pevnosti v ohybu u vzorků vyrobených z rPET. Studie Çava a Aslan (2023) uvádí hodnotu bez směrodatné odchylky.

Tab. 23: Porovnání naměřených ohybových napětí

Zdroj	Ohybové napětí [MPa]
Vlastní – rPET	29,6 ± 9,33
Çava a Aslan (2023)	28,5
Rashwan a kol. (2023)	43,4±0,7

Zdroj: Çava a Aslan (2023); Rashwan a kol. (2023)

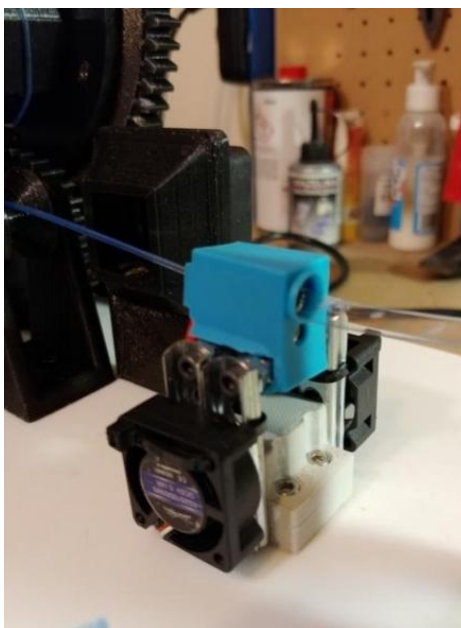
Výsledky naměřených ohybových napětí jsou porovnatelné se studií Çava a Aslan (2023), nejvyšší naměřené ohybové napětí je porovnatelné s průměrnými hodnotami studie Rashwan a kol. (2023). Vzhledem k vysoké variabilitě naměřených hodnot lze výsledky označit za částečně přijatelné s potenciálem pro zlepšení, které by mohlo nastat po optimalizaci procesu výroby filamentu a tiskových parametrů.

3.3 Porovnání s jinými existujícími řešeními využívající PET lahve k 3D tisku

V kapitole jsou představeny řešení využívající k výrobě filamentu pásek PET lahve a přímý 3D tisk. U těchto řešení jsou dále shrnuty jejich výhody a nevýhody oproti představenému řešení v této práci.

3.3.1 Výroba filamentu z pásku PET lahve

Jiný přístup výroby filamentu z PET lahví představuje diplomová práce Kunášek (2025). Diplomová práce se zabývá výrobou zařízení, které umožňuje vyrábět filament z PET lahví, aniž by musely být PET lahve rozdrčeny na menší části. Princip tohoto zařízení spočívá v rozříznutí PET lahve na pásek, který je protahován skrz zahřátou trysku, odkud je materiál vytlačován ve formě filamentu. Následně je vyrobený filament navíjen na cívku. Na dalším obrázku (Obr. 65) je vidět pásek z PET lahve přetvářený na filament pomocí trysky.

**Obr. 65: Filament vyrobený z pásku PET lahve**

Zdroj: Tylman a Dzierzek (2020)

Rozdílný postup při výrobě má za následek i jiný výsledný tvar filamentu, který lze vidět na následujícím obrázku (Obr. 66). Takto vyrobený filament má nepravidelný dutý profil a při 3D tisku je nutné zvýšit průtok materiálu skrz trysku. Kunášek (2025) uvádí použitou hodnotu pro průtok 135 %.



Obr. 66: Tvar profilu filamentu vyrobeného z pásku PET lahve

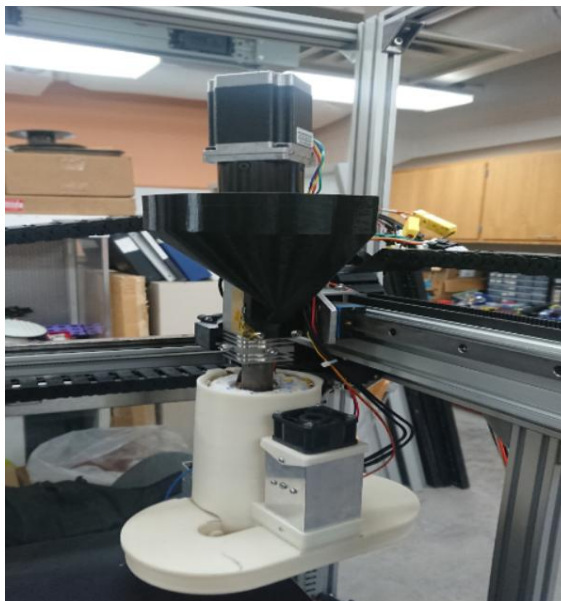
Zdroj: CNC Kitchen (2022)

Mezi největší výhody lze považovat u tohoto řešení snadnost výrobního postupu, menší časovou náročnost na výrobu, větší homogenitu materiálu s menšími degradacemi vlivem tepelného zpracování, menší pořizovací náklady a menší náklady spojené s menší energetickou náročností na výrobu filamentu.

Mezi nevýhody patří nemožnost použití celé lahve pro výrobu filamentu, závislost výsledné délky vyrobeného filamentu je závislá na velikosti PET lahve a případná nemožnost modifikovat filament příměsemi.

3.3.2 Přímý 3D tisk

Dalším možným přístupem je přímý 3D tisk, u kterého odpadá nutnost výroby samotného filamentu. Princip této metody spočívá v tom, že nadrcené PET lahve jsou skrz extrudér rovnou nanášeny na tiskovou podložku. Na dalším obrázku (Obr. 67) je vidět násypka s extrudérem, které jsou touto metodou využívány (Little a kol., 2020).



Obr. 67: Násypka s extruderem pro přímý 3D tisk

Zdroj: Little a kol. (2020)

Studie Little a kol. (2020) uvádí, že rychlost tisku byla 10 mm/s a dosažená pevnost v tahu vytištěných vzorků byla $20,35 \pm 0,187$ MPa. Dále tato studie uvádí, že docházelo k nerovnoměrné extruzi, což se projevilo na nerovnoměrné struktuře vzorků viz následující obrázek (Obr. 68).



Obr. 68: Struktura vzorků vytištěných přímým 3D tiskem

Zdroj: Little a kol. (2020)

Celkově lze konstatovat, že výhodou této metody je vynechání kroku výroby filamentu a s tím spojená nižší degradace materiálu vlivem tepelného zpracování. Nevýhodami je nižší tisková rychlost a menší pevnost výtisků.

3.4 Možnosti optimalizace stávajícího řešení

Výroba filamentu z použitých PET lahví metodou extruze představenou v této práci je časově náročná a bez dalších optimalizací velmi neefektivní, odhadem až 90 % vyrobeného filamentu nelze použít pro samotný 3D tisk. Hlavním nedostatkem filamentu je jeho kolísavý průměr způsobený nestabilní extruzí. Kapitola se věnuje možnostem, které by mohly vést k celkově vyšší efektivitě celého výrobního procesu.

3.4.1 Zvýšení efektivity drcení PET odpadu

Zařízení Felfil Shredder se ukázalo jako neefektivní, kdy PET odpad bylo nutné opakovaně drtit, aby jej bylo možno použít jako vstupní materiál pro extruzi. Ke zvýšení efektivity drcení PET odpadu by mohl přispět drtič, který by umožňoval jemněji nadrtit PET odpad.

3.4.2 Zlepšení extruze filamentu

Připravený PET odpad je vhodné před extruzí vysušit. Studie Alzahrani (2017) zmiňuje, že nevysušený rPET měl vůči vysušenému rPETu o 400 % vyšší hodnotu indexu toku taveniny.

Studie Bustos Seibert a kol. (2022) doporučuje PET materiál sušit okolo 120 °C až 150 °C po dobu 4 hodin. Vzhledem ke schopnosti materiálu PET dobře absorbovat vlhkost dále studie doporučuje zpracovat materiál ihned po sušení.

Dalším možným zlepšením je použití vhodného aditiva během extruze, například bio-karbonu, který je zmiňovaný v kapitole 3.1.3.

Vhodným zlepšením by bylo použití automatického systému, který by reguloval rychlost extruze nebo navíjení filamentu tak, aby byl zajištěn konstantní průměr vyrobeného filamentu. Příkladem zařízení, který tento způsob regulace obsahuje, je 3devo Filament Maker ONE Precision 450 (3devo, Nizozemsko). Výrobce uvádí, že toto zařízení je schopno vyrábět filament s přesností 0,05 mm (GLOBAL 3D, c2025).

Závěr

Diplomová práce se zabývala výrobou recyklovaného filamentu z PET lahví a jeho následným použitím pro samotný 3D tisk vzorků k testování fyzikálně-mechanických vlastností pomocí technologie FFF.

Výsledky práce prokázaly, že je možné vyrobit recyklovaný filament, jehož výrobní surovinou jsou rozdrčené PET lahve a který lze dále zpracovat technologií FFF. Nejobtížnější částí experimentu bylo vyrobit filament s konstantní velikostí průměru, vhodného pro zpracování 3D tiskem. Celková nehomogenita filamentu velmi ztěžovala samotný 3D tisk vzorků, proto byly v práci navrženy další podněty pro optimalizaci výrobního procesu.

U tištěných vzorků byla zjištěna průměrná pevnost v tahu 32,11 MPa pro vzorky vyrobené z filamentu z různobarevné drtiny. U vzorků vyrobených z filamentu z čirých PET lahví byla průměrná pevnost v tahu 24,20 MPa. Dále byla zjištěná průměrná pevnost v ohybu pro vzorky z filamentu z různobarevné drtiny, která činila 29,61 MPa.

Celkově lze konstatovat, že recyklovaný filament z PET představuje perspektivní surovinu pro technologii FFF, pokud dojde k dalším optimalizacím vedoucích ke snazší výrobě filamentu a zároveň zlepšení jeho vlastností.

Seznam použité literatury

- 3D Metal Printing: Alloys and Powder Types and Specs.* Online. Belmont Metals. 06/12/2019. Dostupné z: <https://www.belmontmetals.com/alloys-and-powder-specs-for-3d-printing/>. [cit. 2025-10-29].
- 3D Printer Parts: Comprehensive List Of 3D Printing Components.* Online. RankRed. 2025. Dostupné z: <https://www.rankred.com/3d-printer-parts/>. [cit. 2025-09-20].
- 3D printer parts: Essential components and functions.* Online. AzureFilm. C2025. Dostupné z: <https://azurefilm.com/2023/10/28/3d-printer-parts-essential-components-and-functions/>. [cit. 2025-09-20].
- 3D printing Technology: FDM vs. FFF.* Online. Sculpteo. C2009-2025. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-technologies-and-processes/fdm-vs-fff/>. [cit. 2025-09-20].
- 3devo Filament Maker ONE Precision 450.* Online. GLOBAL 3D. C2025. Dostupné z: <https://global3d.pl/en/3devo-extruders/1000-3devo-filament-maker-precision-450.html>. [cit. 2025-11-06].
- ALZAHIRANI, Mohammed. *Modification of Recycled Poly(ethylene terephthalate) for FDM 3D-Printing Applications.* Online, Master's thesis. Waterloo: University of Waterloo, 2017. Dostupné z: <https://dspacemainprd01.lib.uwaterloo.ca/server/api/core/bitstreams/3984f837-f46e-42a1-8639-a9fa5313f550/content>. [cit. 2025-10-18].
- AMEEN, Ahmed A.; TAKHAKH, Ayad M. a ABDAL-HAY, Abdalla. An overview of the latest research on the impact of 3D printing parameters on shape memory polymers. Online. *European Polymer Journal*. 2023, vol. 194, s. 112145. ISSN 0014-3057. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2023.112145>. [cit. 2025-10-29].
- Anatomy of a 3D printer: Understanding the essential components of FDM machines.* Online. REALvisionOnline. 2025. Dostupné z: <https://realvisiononline.com/blog/anatomy-of-a-3d-printer-understanding-the-essential-components-of-fdm-machines>. [cit. 2025-09-20].
- ANDERSON, Elisabeth; ZAGORSKI, Joe a CROSS, Kyleigh. *Real-time Science – What's plastic?* Online. Michigan State University. 2024. Dostupné z: <https://cris.msu.edu/news/real-time-science/real-time-science-whats-plastic/>. [cit. 2025-09-20].
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM F2792 – Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- Autodesk Fusion for FFF and FDM 3D printing.* Online. Autodesk. C2025. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/solutions/fff-fdm-3d-printing-software>. [cit. 2025-09-20].
- BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné také z: <https://etul.publi.cz/?book=180-polymery>.

- BHARDWAJ, Anjana; KORI, M.L. a MISHRA, Vibha Devi. POLYMER: CLASSIFICATION, METHODS, PROPERTIES, AND THEIR CHARACTERIZATION. Online. *World Journal of Pharmaceutical Research*. 2015, roč. 4, č. 3, s. 1766-1786. Dostupné z: https://www.wisdomlib.org/uploads/journals/wjpr/volume-4,-march-issue-3_2398.pdf. [cit. 2025-09-19].
- BUJ-CORRAL, Irene; SÁNCHEZ-CASAS, Xavier a LUIS-PÉREZ, Carmelo J. Analysis of AM Parameters on Surface Roughness Obtained in PLA Parts Printed with FFF Technology. Online. *Polymers*. 2021, vol. 13, no. 14, s. 2384. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym13142384>. [cit. 2025-10-16].
- BURFORD, Robert. Polymers: a historical perspective. Online. *Journal & Proceedings of the Royal Society of New South Wales*. 2019, roč. 152, č. 2, s. 242-250. ISSN 0035-9173/19/020242-09. Dostupné z: <https://www.royalsoc.org.au/wp-content/uploads/2019/10/152-2-06Burford.pdf>. [cit. 2025-09-19].
- BUSTOS SEIBERT, Maximilian; MAZZEI CAPOTE, Gerardo Andres; GRUBER, Maximilian; VOLK, Wolfram a OSSWALD, Tim A. Manufacturing of a PET Filament from Recycled Material for Material Extrusion (MEX). Online. *Recycling*. 2022, vol. 7, no. 5, s. 69. ISSN 2313-4321. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/recycling7050069>. [cit. 2025-10-21].
- ÇAVA, Kutay a ASLAN, Mustafa. INVESTIGATING PRINTABILITY AND MECHANICAL PERFORMANCE OF 3D PRINTED RECYCLED PET WITH PLA AND TPU HYBRID ADDITIVES. Online. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. 2023, roč. 7, č. 2, s. 252-258. ISSN 2602-3350. Dostupné z: <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1324777>. [cit. 2025-10-17].
- COLEMAN, Ernest A. Plastics Additives. Online. In: *Applied Plastics Engineering Handbook*. Elsevier, 2011, s. 419-428. ISBN 9781437735147. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-3514-7.10023-6>. [cit. 2025-10-12].
- Components of a Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printer*. Online. Techietory. 2024. Dostupné z: <https://techietory.com/3d-printing/components-of-a-fused-deposition-modeling-fdm-3d-printer/>. [cit. 2025-09-20].
- Cotu. Online. © 2024. Dostupné z: <https://shop.cotu.eu/en/>. [cit. 2025-10-29].
- CREAMELT® rPET fifty. Online. CREAMELT. C2018. Dostupné z: <https://creamelt.com/wp/materials/rpet/?v=762ed6822054>. [cit. 2025-10-31].
- CRUZ SANCHEZ, Fabio A.; BOUDAUD, Hakim; CAMARGO, Mauricio a PEARCE, Joshua M. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 264, s. 121602. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121602>. [cit. 2025-11-10].
- ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 1133-1, *Plasty – Stanovení hmotnostního (MFR) a objemového (MVR) indexu toku taveniny termoplastů – Část 1: Standardní metoda (ISO 1133-1:2022)*. 2022.
- ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 178, *Plasty – Stanovení ohybových vlastností (ISO 178:2019)*. 2019.

- ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 21920-2, *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. 2023.
- ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN ISO 527-2, *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty (ISO 527-2:2012)*. 2012.
- Different Types of FDM 3D Printers*. Online. Locanam. C2024. Dostupné z: <https://www.locanam.com/types-of-fdm-3d-printers>. [cit. 2025-09-20].
- FDM vs FFF: Understanding 3D Printing Technologies*. Online. UltiMaker. 2025. Dostupné z: <https://ultimaker.com/learn/fdm-vs-fff-understanding-3d-printing-technologies/>. [cit. 2025-09-20].
- Felfil Shredder+*. Online. Felfil. 2025. Dostupné z: <https://felfil.com/shop/felfil-shredder/?v=9c049173fad5>. [cit. 2025-11-12].
- Filament Maker: rPET Print Settings*. Online. Sustainable Design Studio. 2025. Dostupné z: <https://www.sustainabledesign.studio/filamentmaker-printsettings>. [cit. 2025-09-20].
- GANAPATHI, Anurag; ABDELWAHAB, Mohamed A a RABNAWAZ, Muhammad. Achieving bottle-grade poly(ethylene terephthalate)-like properties from blends of bottle-grade and thermoform-grade poly(ethylene terephthalate). Online. *Polymer International*. 2024, vol. 73, no. 8, s. 625-630. ISSN 0959-8103. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/pi.6633>. [cit. 2025-10-31].
- GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent a KHORASANI, Mahyar. Additive Manufacturing Technologies. Online. 2021. ISBN 9783030561260. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>. [cit. 2025-09-19].
- GOTRO, Jeffrey. *3D Printing of Medical Implants Is on the Way*. Online. Polymer Innovation Blog. 2013. Dostupné z: <https://polymerinnovationblog.com/3d-printing-of-medical-implants-is-on-the-way/>. [cit. 2025-11-10].
- How 3D Printers Work*. Online. U.S. Department of Energy. 2014. Dostupné z: <https://www.energy.gov/articles/how-3d-printers-work>. [cit. 2025-09-19].
- HOW STRONG is PET Bottle Filament?* Online. CNC Kitchen. 2022. Dostupné z: <https://www.cnckitchen.com/blog/how-strong-is-pet-bottle-filament>. [cit. 2025-10-19].
- How to Recycle PET Plastic into 3D Printing Filament*. Online. 3devo. 2024. Dostupné z: https://www.3devo.com/blog/recycle-pet-into-3d-printing-filament?fbclid=IwY2xjawM15C9leHRuA2FlbQlXmABicmlkETfHNUVWZjF2R0hXSUwyMGNPAR7jIQkXmGLi0xpIrbiz3PbII9BPHGH3PeLyLKhtOud8idNiLL9ggqjmkg-W5Q_aem_f8pWxOoojCd1ra3QxdDBcA. [cit. 2025-09-20].
- How to Use Recycled PET Plastic as 3D Print Filament*. Online. JLC3DP. 2025. Dostupné z: https://jlc3dp.com/blog/how-to-use-recycled-pet-plastic-as-3d-print-filament?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAYnJpZBExYTVFVmYxdkdIV0IMMjBjTwEeuOf7NS2ivvgh0r1aff8nfKzIq2ErGuA2sprOM3G42rYK1WQYKYt6QDFp6zk_aem_MypKs58FYhBjs8rj6xUYyA. [cit. 2025-09-20].

- KANTAROS, Antreas; SOULIS, Evangelos; PETRESCU, Florian Ion Tiberiu a GANETSOS, Theodore. Advanced Composite Materials Utilized in FDM/FFF 3D Printing Manufacturing Processes: The Case of Filled Filaments. Online. *Materials*. 2023, vol. 16, no. 18, s. 6210. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma16186210>. [cit. 2025-11-10].
- KOLTSAKI, Maria a MAVRI, Maria. A Comprehensive Overview of Additive Manufacturing Processes Through a Time-Based Classification Model. Online. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2024, vol. 11, no. 1, s. 363-382. ISSN 2329-7662. Dostupné z: <https://doi.org/10.1089/3dp.2022.0167>. [cit. 2025-09-19].
- KUBÁŠOVÁ, Kristýna; DRÁTOVSKÁ, Veronika; LOSERTO VÁ, Monika; SALVETR, Pavel; KOPELNT, Michal et al. A Review on Additive Manufacturing Methods for NiTi Shape Memory Alloy Production. Online. *Materials*. 2024, vol. 17, no. 6, s. 1248. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma17061248>. [cit. 2025-10-29].
- KUNÁŠEK, Stanislav. *Návrh a výroba zařízení na recyklaci PET lahví pro výrobu filamentů pro 3D tisk*. Online, Diplomová práce, vedoucí Lucie Zárybnická. Jihlava: Vysoká škola polytechnická Jihlava, 2025. Dostupné z: <https://is.vspj.cz/bp/get-bp/student/78303/thema/11205>. [cit. 2025-10-02].
- LITTLE, Helen A.; TANI KELLA, Nagendra G.; J. REICH, Matthew; FIEDLER, Matthew J.; SNABES, Samantha L. et al. Towards Distributed Recycling with Additive Manufacturing of PET Flake Feedstocks. Online. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 19, s. 4273. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13194273>. [cit. 2025-11-06].
- LOPEZ, Abdiel. *What Types of Materials Are Used in 3D Printing*. Online. ADDITEC. 2023. Dostupné z: <https://additec3d.com/types-of-materials-are-used-in-3d-printing/>. [cit. 2025-09-19].
- LOZRT, Jaroslav; VOTAVA, Jiří; HENZL, Radovan; KUMBÁR, Vojtěch; DOSTÁL, Petr et al. Analysis of the Changes in the Mechanical Properties of the 3D Printed Polymer rPET-G with Different Types of Post-Processing Treatments. Online. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 16, s. 9234. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app13169234>. [cit. 2025-10-16].
- Melt Flow Index of Polymers*. Online. SpecialChem. 2025. Dostupné z: <https://www.specialchem.com/plastics/guide/melt-flow-index>. [cit. 2025-10-21].
- MIKULA, Katarzyna; SKRZYPCZAK, Dawid; IZYDORCZYK, Grzegorz; WARCHOŁ, Jolanta; MOUSTAKAS, Konstantinos et al. 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. Online. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020, vol. 28, no. 10, s. 12321-12333. ISSN 0944-1344. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>. [cit. 2025-10-21].
- NAMAZI, Hassan. Polymers in our daily life. Online. *BioImpacts*. 2017, vol. 7, no. 2, s. 73-74. ISSN 2228-5660. Dostupné z: <https://doi.org/10.15171/bi.2017.09>. [cit. 2025-09-17].
- Natural vs Synthetic Polymers*. Online. Carnegie Mellon University. C2025. Dostupné z: <https://www.cmu.edu/gelfand/k12-educational-resources/polymers/natural-synthetic-polymers/index.html>. [cit. 2025-09-19].

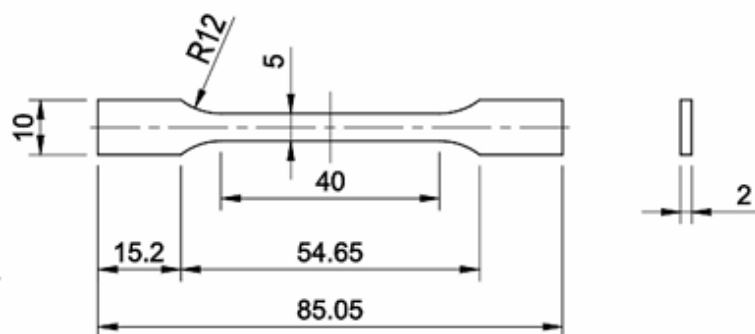
- O'CONNELL, Jackson. *The Types of FDM 3D Printers: Cartesian, CoreXY & More*. Online. All3DP. 2023. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cartesian-3d-printer-delta-scara-belt-corexy-polar/>. [cit. 2025-09-20].
- OECD. Global Plastics Outlook. Online. *OECD Publishing eBooks*. 2022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>. [cit. 2025-11-10].
- PLASTY. Online. Strojař. 2025. Dostupné z: https://www.strojar.com/upload/plasty_104.pdf. [cit. 2025-09-19].
- Polymer Chemistry: 5 Types of Classification of Polymers*. Online. Sciencedoze. 2021. Dostupné z: <https://www.sciencedoze.com/2021/05/5-types-of-classification-of-polymers.html>. [cit. 2025-11-10].
- Polymer types*. Online. UNSW Sydney. 2025. Dostupné z: <https://www.unsw.edu.au/science/our-schools/materials/engage-with-us/high-school-students-and-teachers/online-tutorials/polymers/structure-and-form/polymer-types>. [cit. 2025-09-19].
- Polymers Vs Plastics What Is The Difference*. Online. Stahl. 2025. Dostupné z: <https://www.stahl.com/beyond-chemistry-from-a-to-z/polymers-vs-plastics-what-is-the-difference>. [cit. 2025-09-19].
- RANJAN, Rajeev; KUMAR, Deepak; KUNDU, Manoj a CHANDRA MOI, Subhash. A critical review on Classification of materials used in 3D printing process. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2022, vol. 61, s. 43-49. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.308>. [cit. 2025-09-19].
- RASHWAN, Ola; KORONEOS, Zachary; TOWNSEND, Trent G.; CAPUTO, Matthew P.; BYLONE, Robert J. et al. Extrusion and characterization of recycled polyethylene terephthalate (rPET) filaments compounded with chain extender and impact modifiers for material-extrusion additive manufacturing. Online. *Scientific Reports*. 2023, vol. 13, no. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41744-8>. [cit. 2025-10-18].
- SAPKOTA, Ashok; GHIMIRE, Shree Kaji a ADANUR, Sabit. A review on fused deposition modeling (FDM)-based additive manufacturing (AM) methods, materials and applications for flexible fabric structures. Online. *Journal of Industrial Textiles*. 2024, vol. 54. ISSN 1528-0837. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/15280837241282110>. [cit. 2025-09-20].
- SEVENS, Ryan a MRONCZ, Nikolaus. *3D Printing Tolerances: What to Expect from Each Process*. Online. Xometry Pro. 15 April 2025. Dostupné z: <https://xometry.pro/en/articles/3d-printing-tolerances/>. [cit. 2025-10-14].
- SHAH RUBUDIN, N.; LEE, T.C. a RAMLAN, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Online. *Procedia Manufacturing*. 2019, vol. 35, s. 1286-1296. ISSN 2351-9789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>. [cit. 2025-09-19].
- SHAQOUR, Bahaa; SAMARO, Aseel; VERLEIJE, Bart; BEYERS, Koen; VERVAET, Chris et al. Production of Drug Delivery Systems Using Fused Filament Fabrication: A Systematic Review. Online. *Pharmaceutics*. 2020, vol. 12, no. 6, s. 517-517. ISSN 1999-4923. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12060517>. [cit. 2025-11-10].

- SKOPAL, Jaroslav. *VYUŽITÍ TECHNICKÝCH NOREM V ADITIVNÍ VÝROBĚ*. Online. Agentura ČAS, 2018. Dostupné z: <https://agenturacas.gov.cz/sites/default/files/public/download/PRTN/Normy%20v%20aditivn%C3%AD%20v%C3%BDrob%C4%9B.pdf>. [cit. 2025-09-19].
- SOONG, Ya-Hue Valerie; SOBKOWICZ, Margaret J. a XIE, Dongming. Recent Advances in Biological Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Wastes. Online. *Bioengineering*. 2022, vol. 9, no. 3, s. 98. ISSN 2306-5354. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/bioengineering9030098>. [cit. 2025-11-10].
- ŠTARHA, Pavel a TRÁVNÍČEK, Zdeněk. *Termická analýza*. Online. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011. Dostupné z: https://www.prf.upol.cz/fileadmin/userdata/PrF/katedry/afc/Studijni_materialy/Termicka_analyza.pdf. [cit. 2025-10-01].
- The 6 Main Types of FDM 3D Printer Explained*. Online. 3DSourced. 2024. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/3d-printers/types-of-fdm-3d-printer-cartesian-delta/>. [cit. 2025-09-20].
- Thermoplastics, Elastomers and Thermosets*. Online. Performance Plastics. 2024. Dostupné z: <https://performanceplastics.com/blog/thermoplastics-elastomers-and-thermosets-what-material-is-best-for-my-project/>. [cit. 2025-09-19].
- Tolerances for 3D printing*. Online. SINTERIT. C2025. Dostupné z: <https://sinterit.com/3d-printing-guide/design-for-3d-printing/tolerances-3d-printing/>. [cit. 2025-10-14].
- TYLMAN, Igor a DZIERŻEK, Kazimierz. Filament for a 3D Printer from Pet Bottles- Simple Machine. Online. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2020, s. 1386-1392. Dostupné z: <https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392>. [cit. 2025-10-19].
- VINOD G. GOKHARE; DADARAO N. RAUT a SHINDE, Digvijay. A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing. Online. *International Journal of Engineering Research and*. 2017, vol. 6, no. 6. ISSN 2278-0181. [cit. 2025-09-19].
- Why You Should Consider 3D Printing Ceramic for Your Next Projects*. Online. AT-Machining. 2023. Dostupné z: <https://at-machining.com/3d-printing-ceramic/>. [cit. 2025-10-29].
- WILLIAMS, Allan T. a RANGEL-BUITRAGO, Nelson. The past, present, and future of plastic pollution. Online. *Marine Pollution Bulletin*. 2022, vol. 176, s. 113429. ISSN 0025-326X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113429>. [cit. 2025-09-20].
- ZANDER, Nicole E.; GILLAN, Margaret a LAMBETH, Robert H. Recycled polyethylene terephthalate as a new FFF feedstock material. Online. *Additive Manufacturing*. 2018, vol. 21, s. 174-182. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.007>. [cit. 2025-10-17].
- ZHANG, Feng; ZHOU, Shixiang; YOU, Huaying; ZHANG, Gang; YANG, Jiquan et al. 3D printing of ceramic matrix composites: Strengthening and toughening strategies. Online. *Composites Part B: Engineering*. 2025, vol. 297, s. 112335. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112335>. [cit. 2025-09-19].

Přílohy

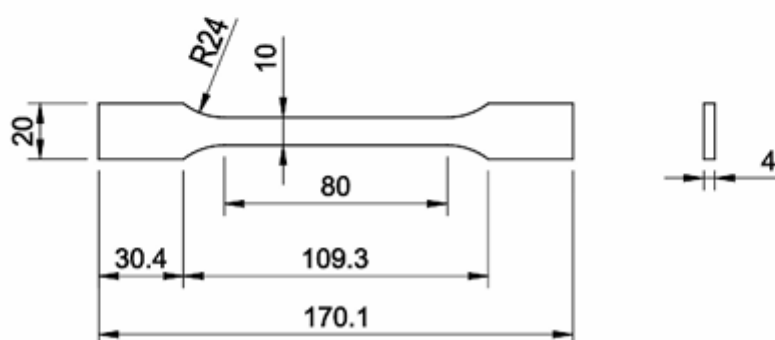
Přílohy A Výkresová dokumentace

Příloha A.1 Výkres vzorku pro tahovou zkoušku („Psí kost“)



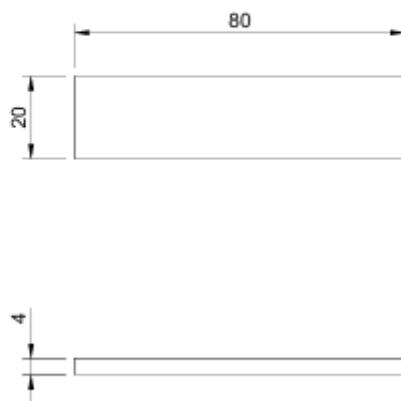
Dept.	Technical reference	Created by Vít Kružík 30.10.2025	Approved by
		Document type Výrobní výkres	Document status
		Title Psí kost 50 %	DWG No.
		Rev.	Date of issue Sheet 1/1

Příloha A.2 Výkres vzorku pro tahovou zkoušku – původní rozměry („Psí kost“)



Dept.	Technical reference	Created by Vít Kružík	18.11.2025	Approved by
		Document type	Výrobní výkres	Document status
		Title	Psí kost	DWG No.
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/1

Příloha A.3 Výkres vzorku pro ohybovou zkoušku



Dept.	Technical reference	Created by Vít Kružík	02.10.2025	Approved by
		Document type Výrobní výkres		Document status
		Title Ohyb		DWG No.
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/1