



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Elektrické parametry kompozitních materiálů pro 3D tisk metodou FDM

Dielectric properties of composite materials for FDM 3D printing

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Tichý

Kristián Solar

2020



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Solar** Jméno: **Kristián** Osobní číslo: **474739**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektrické parametry kompozitních materiálů pro 3D tisk metodou FDM

Název bakalářské práce anglicky:

Dielectric properties of composite materials for FDM 3D printing

Pokyny pro vypracování:

- [1] Seznamte se s technologií FDM 3D tisku
- [2] Navrhněte experimenty pro změnění elektrických izolačních vlastností kompozitních materiálů, používaných pro 3D tisk metodou FDM
- [3] Experimentálně vyhodnoťte vhodnost použití vybraných kompozitních materiálů v elektrotechnickém průmyslu a porovnejte s výtiskem vrstveným z více druhů materiálů
- [4] Ekonomicky zhodnoťte použití kompozitních strun pro 3D tisk metodou FDM v elektrotechnickém průmyslu s ohledem na elektrickou pevnost.

Seznam doporučené literatury:

- [1] CANESSA, Enrique, Carlo FONDA a Marco ZENNARO. LOW-COST 3D PRINTING FOR SCIENCE, EDUCATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT. 1. Science Dissemination Unit: ICTP, 2013. ISBN 92-95003-48-9
- [2] Veverka, A.: Technika vysokých napětí, SNTL, 1978.
- [3] T. Tichý, O. Šefl, P. Veselý and T. Čápal, 'Application Possibilities of Fused Filament Fabrication Technology for High-Voltage and Medium-Voltage Insulation Systems,' 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Wrocław, Poland, 2019, pp. 1-6.
doi: 10.1109/ISSE.2019.8810300

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Tichý, katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **13.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Tomáš Tichý
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Tomáši Tichému za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Poděkování též patří Ing. Michaele Makešové za pomoc a připomínky k ekonomické části této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá elektrickými parametry pro různé materiály, zejména kompozitními, pro 3D tiskovou metodu FDM a jejich ekonomickým zhodnocením. Nejprve jsou popsány hlavní kategorie 3D tisku s bližším zaměřením na FDM technologii. Dále autor čtenáře seznamuje s materiály pro 3D tisk, které jsou rozděleny do skupin podle jejich složení a využití. Z těchto materiálů jich je poté pár vybráno a vysokonapětově testováno v laboratoři. Výsledkem je elektrická pevnost pro každý materiál zvláště. Pro tyto materiály je poté v ekonomické části provedena kalkulace nákladů na jeden kus výrobku v závislosti na změřené elektrické pevnosti a citlivostní analýza. Výsledkem by mělo být technickoekonomické zhodnocení pro každý materiál, tudíž výsledná cena za určitý výrobek o předem zvolené elektrické pevnosti.

Abstract

This bachelor thesis deals with electrical parameters for various materials, especially composites, for the 3D printing method FDM and their economic evaluation. First, the main categories of 3D printing are described with a closer focus on FDM technology. Furthermore, the author introduces the reader to the materials for 3D printing, which are divided into groups according to their composition and use. A few of these materials are then selected and tested for high voltage in the laboratory. The result is electrical strength for each material separately. For these materials, the economic part then calculates the cost per piece of product depending on the measured electrical strength and sensitivity analysis. The result should be a technical and economic evaluation for each material, hence the final price for a certain product with a pre-selected electrical strength.

Klíčová slova

3D tisk, elektrická pevnost, kompozitní materiály, napěťové zkoušky, mechanické vlastnosti, provozní náklady, investiční náklady, kalkulace celkových nákladů na výrobu, ekonomické zhodnocení výroby

Keywords

3D printing, electrical strength, composite materials, voltage tests, mechanical properties, operating costs, investment costs, calculation of product costs, economic evaluation of production

Obsah

Úvod.....	15
1 Technologie 3D tisku	16
1.1 SLA.....	16
1.2 SLS/DMLS	17
1.3 FDM/FFF.....	17
2 Materiály pro FDM 3D tisk	19
2.1 Klasické materiály	19
2.1.1 PET (PETG, PETT).....	19
2.1.2 PLA	20
2.1.3 ABS	20
2.1.4 ASA.....	20
2.1.5 Polypropylen (PP)	21
2.1.6 Nylon.....	21
2.1.7 PC	21
2.2 Podpůrné materiály.....	21
2.2.1 PVA.....	21
2.2.2 HIPS	22
2.3 Kompozitní materiály	23
2.3.1 Laybrick	23
2.3.2 Vodivá vlákna	23
2.3.3 PLA vyztužená uhlíkovými vlákny.....	24
2.4 Elektrické pevnosti vybraných materiálů	24
3 Vysokonapět'ové experimenty	25
3.1 Norma IEEE Std 930™-2004.....	25
3.1.1 Charakteristika Weibullova rozdělení	25
3.1.2 Parametr β	26
3.1.3 Parametr α	26
3.1.4 Správnost přizpůsobení	27
3.2 Elektrická pevnost	27
3.2.1 Čistě elektrický průraz	27
3.2.2 Tepelný průraz.....	28
3.2.3 Elektromechanický průraz.....	28
3.3 Měření kompozitu PET/ABS.....	29

3.3.1	Vyhodnocení v programu Microsoft Excel	30
3.3.2	Vyhodnocení v programu Wolfram Mathematica	31
3.3.3	Zhodnocení měření kompozitu PET/ABS.....	32
3.3.4	Měření kompozitu PET/ABS oproti sandwich struktuře PET a ABS.....	33
3.3.5	Vyhodnocení sandwich struktury PET a ABS	34
3.3.6	Celkové zhodnocení	35
3.4	Měření polykarbonátu.....	36
3.4.1	Vyhodnocení elektrických pevností PC	38
3.5	Celkové zhodnocení vysokonapěťových experimentů.....	39
3.6	Sledování vlivu výplně výtisku na elektrickou pevnost	41
4	Ekonomické zhodnocení kompozitních strun pro 3D tisk	43
4.1	Náklady.....	44
4.1.1	Investiční náklady	44
4.1.2	Kritéria ekonomické efektivity	44
4.1.3	Investiční náklady na 3D tiskárnu.....	47
4.1.4	Neinvestiční náklady	47
4.1.5	Náklady na údržbu tiskárny.....	47
4.1.6	Náklady na materiál	48
4.1.7	Náklady na mzdy.....	49
4.1.8	Náklady na energii	49
4.2	Kalkulace nákladů pro zvolený výrobek	50
4.2.1	Parametry pro tisk krabiček.....	51
4.2.2	Celkové tiskové náklady	54
4.3	Zhodnocení celkových nákladů pro zvolený výrobek pro různé materiály.....	56
5	Závěr	60
6	Seznam grafů, tabulek, obrázků a rovnic.....	61
7	Seznam příloh	63
	Zdroje	64

Úvod

Po velkých objevech jako byl parní stroj či vzestup celosvětových sítí se ve vědeckém a technickém oboru objevuje i pojem 3D tisk. Je znám již od 80. let minulého století, kdy se američtí vědci pokusili vynalézt rychlou a efektivní metodu pro výrobu produktů a prototypů pomocí UV lampy a vytvrzení pryskyřice. To se nakonec povedlo a díky patentu s názvem technologie stereolitografie se začal 3D tisk dále rozvíjet. S nástupem nového století byl ale vzestup největší, kdy trvalo jen několik let, aby se technologie rozšířili do podoby, kterou dnes zná skoro každý. V posledních letech je ale kladen důraz na materiály a pokus o jejich rozvoj v podobě nových klasických materiálů nebo speciálních kompozitních materiálů. Díky tomuto rozvoji je již 3D technologie dostupná i technickým nadšencům, kteří si mohou tiskárnu pořídit domů. V poslední době se v České republice o 3D tisku mluví hlavně díky období koronaviru, jelikož byly díky 3D tisku vyráběny ochranné štíty a masky, které nebylo možno v této těžké době obstarat. [1]

Zpočátku se používali pouze dostupné a ozkoušené materiály. S postupem času se ale rozvíjeli a dnes se dá tisknout mnoha materiálů například z plastu, kovu (hliník, měď, ocel, titan), betonu, skla nebo jak již bylo zmíněno z kompozitů. Kompozitní materiály jsou charakterizovány sloučením dvou či více materiálů do sebe v určitém poměru, kdy jeden z materiálů vytváří výrobku pevnost a druhý slouží jako pojivo. Díky tomuto sloučení dostává nový materiál úplně odlišné vlastnosti oproti předchozím. Existují ale výjimky, jako například materiál ABS (viz dále). [2]

Asi největší využití 3D tisku je pro testovací výrobky, zvané prototypy. Prototyp je experimentální primární výrobek, který slouží pro testování ať už fyzikálních či mechanických vlastností, tak i pro výpočet a zjištění ekonomické rentability pro jeho následnou výrobu. Lze díky tomu předejít, nebo alespoň predikovat, jestli je investice do nějakého projektu výnosná, či nikoliv. Další využití je pro výrobu speciálních výrobků, které se od velkovýroby liší. Nežli měnit celou výrobku kvůli pár výrobkům a tratit desetitisíce až statisíce, je možno si je vytisknout na 3D tiskárně ušetřit. [3]

V této práci se autor mimo jiné zabývá testováním kompozitního materiálu PET/ABS v poměru 2:1, který bude tištěn při dvou teplotách a poté vysokonapěťovou zkouškou ověřována jeho elektrická pevnost. Tato pevnost se poté porovná s výtisky ze samotných materiálů PET a ABS a vyhodnotí se, zda má tento materiál lepší či horší vlastnosti. Dále je ekonomicky zhodnotí, což provede citlivostní analýzou pro nákladovou funkci výroby na jeden kus a porovná jej s velkovýrobou. Dodatečně lze materiál také zhodnotit dle jeho tisknutelnost a vhodnější teploty pro tisk.

1 Technologie 3D tisku

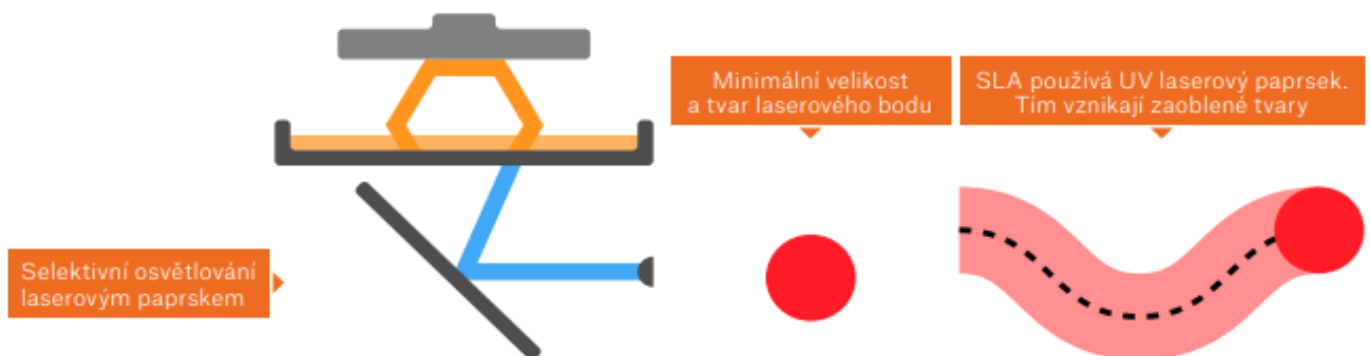
3D tisk je aditivní automatizovaný proces, který je založen na postupném nanášení roztaveného termoplastu na rozežřátou desku, či fotopolymeru vytvrzovaným UV zářením. Jednoduše řečeno, výrobek vzniká tenkým nanášením vrstev na sebe. Opakem aditivní výroby je výroba subtraktivní. Což je soustružení, vrtání a frézování, kdy se materiál postupně ubírá. Princip 3D tisku spočívá v tom, že je nejprve v počítači digitální model horizontálně rozřezán na jednotlivé tenké vrstvy. Tyto vrstvy se poté různými technologiemi nanášejí na sebe, dokud nevznikne požadovaný výrobek či prototyp. Pro výstavbu složitějších výrobků, je třeba myslet i na armatury, které budou objekt držet, aby se nezborčil. Po dokončení tisku, se podpěry odstraní. V současné době se dají podpěry tisknout z jiného materiálu, který je například rozložitelný ve vodě, tím se odstranění poměrně zjednoduší. Klasická 2D tiskárna pracuje pouze s osami x a y. [3]

Na rozdíl od ní přidává 3D tiskárna i třetí prostorový rozměr, která nám určí, v jaké výšce se konkrétní bod nachází. V současné době neexistuje univerzální technologie 3D tisku, která by byla vhodná pro všechna použití, a proto je důležité rozmyslet si, co budeme tisknout, s jakým materiálem a co od výsledku požadujeme. Rozdělujeme je tedy do třech hlavních kategorií. [4]

1.1 SLA

SLA neboli stereolitografie je technologie, kterou si nechal patentovat Charles W. Hull v 80. letech minulého století. Její princip je založen na využití UV laseru a tekutého fotopolymeru, který je umístěn v kádí, do které se noří podložka. Laser postupně po jednotlivých vrstvách vytvrzuje jednotlivé body tekutého fotopolymeru. Body, které laser osvítil vytvrdnou, a tak vzniknou postupným klesáním podložky všechny vrstvy tisknutého objektu. Tento tisk je v porovnání s FDM/FFM (viz dále) detailnější, ale zpravidla trvá déle, má větší pořizovací i provozní náklady na materiál a menší tiskovou plochu. Její výhodou je využití pro výrobu prototypů a rozměrných dílů s dobrými fyzikálními vlastnostmi, které se vyznačují hladkým povrchem a jemnými detaily, které čítají od 50 do 500 mikronů dle typu tiskárny. [5] Tento typ tisku se využívá především ve šperkařství a medicíně. [3] [6]

Existují tři SLA procesy, které se liší způsobem osvětlení a vytvrzováním fotopolymeru. První je tzv. osvit pomocí UV laserového paprsku (SLA – Laser). Doba tisku je přímoúměrná velikosti tisknuté plochy, což znamená, čím větší plocha bude, tím delší bude doba tisku. Tento typ pracuje na principu paprsku směřovaném mezi dvě zrcadla a postupně se vykresluje tisknutá vrstva. [3]



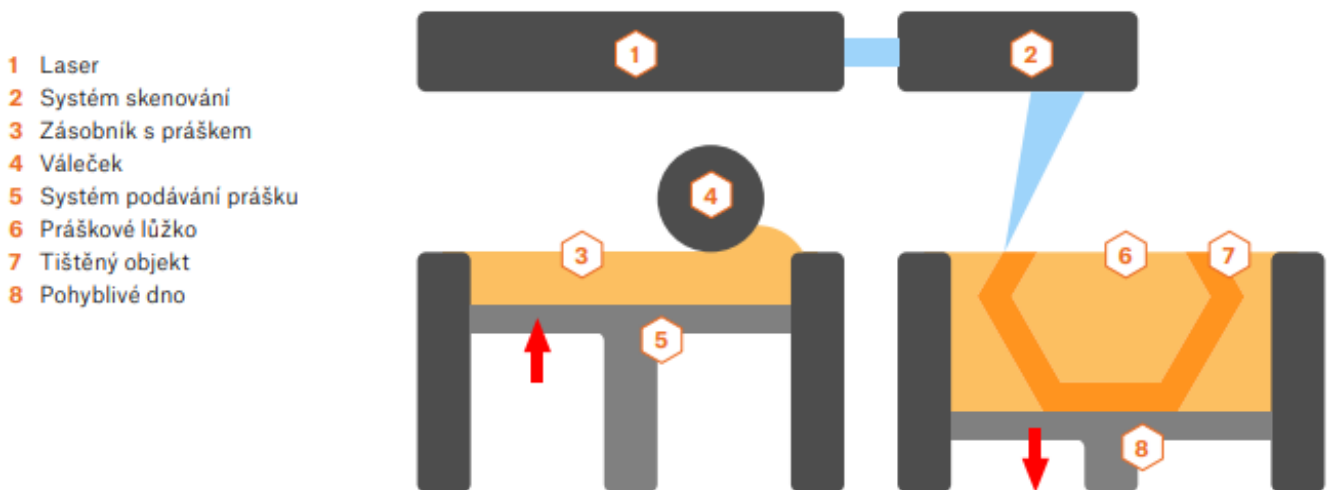
Obrázek 1 - Metoda SLA-Laser [7]

Druhá je osvit pomocí projektoru a třetí pomocí LCD displeje. Oba tyto procesy osvětlují celou tiskovou vrstvu najednou a dochází k vytvrzení pryskyřice. Jsou ale komplikovanější a pro účel této práce není nutné je probírat úplně dopodrobna. Pro vyhlazování hran se používá tzv. antialiasing, který se používá nejen u 3D tisku, ale také u 3D počítačových her pro zkvalitnění obrazu. Spočívá v odstranění ostrých hran, díky zprůměrování barev okolních pixelů. [6]

1.2 SLS/DMLS

Další technologií 3D tisku je SLS neboli Selective Laser Sintering, případně Direct Metal Laser Sintering pro DMLS. SLS metoda je založena na principu válcového nanášení jemného prášku, který je poté v místech konečného výtisku spékán. Výhodou tohoto tisku je použití plastických materiálů jako je nylon nebo polyamid. Tím, že je materiál sintrován pouze v místech tisku, lze přebytečný materiál použít pro další tisk. Taktéž není potřeba vytvoření dočasných podpěr. Výsledné výrobky mají dobré fyzikální vlastnosti, jsou pevné a pružné, nejčastěji se používají pro velmi namáhané díly. [3] [4]

DMLS je založen na podobném principu jako SLS, pouze s tím rozdílem, že u této metody dochází k úplnému roztavení materiálu. Nejčastěji se používají kovové materiály, jako je měď, hliník, ocel, titan, kobalt, chrome nebo zlato. Výsledné předměty bývají velmi pevné a odolné. [3]



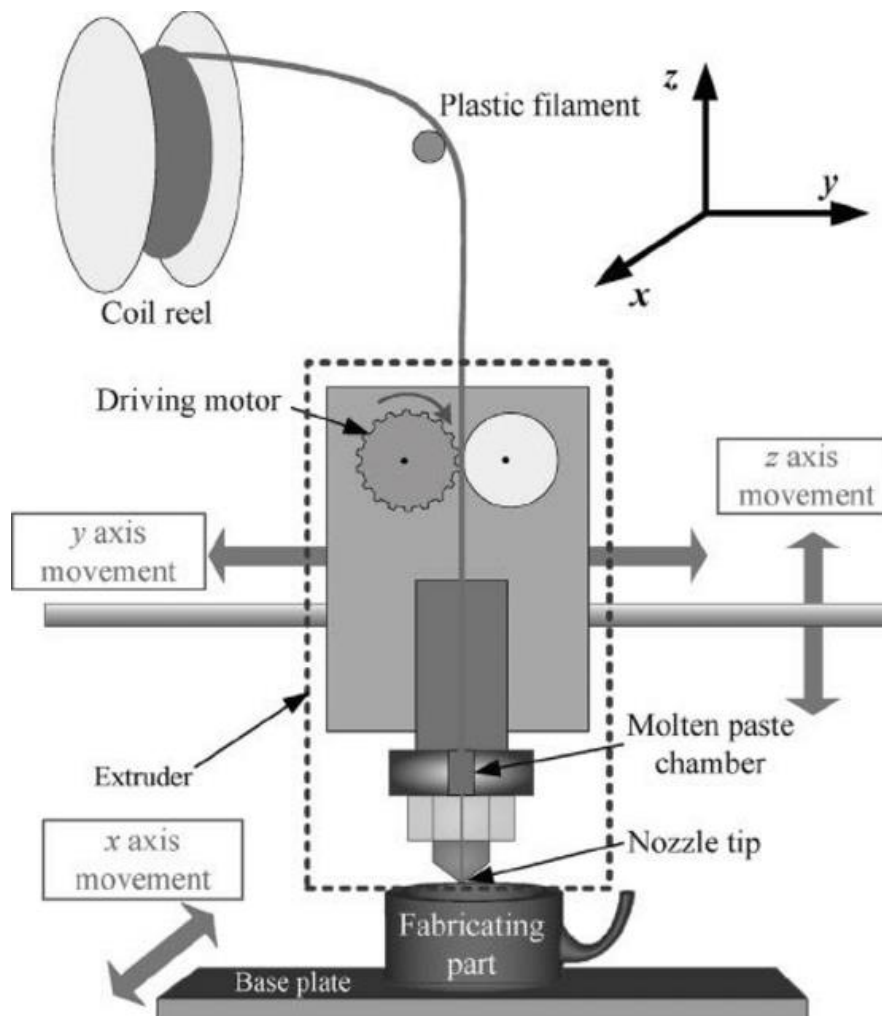
Obrázek 2 - Technologie SLS/DMLS [7]

1.3 FDM/FFF

Poslední a nejrozšířenější technologie 3D tisku je FDM (Fused Deposition Modeling). Tuto technologii si nechal patentovat Scott Crump v 80. letech minulého století. Pracuje na principu vytlačování materiálu skrze rozehřátou trysku, která tento materiál taví a pokládá na sebe vrstvu po vrstvě. Materiál na vzduchu rychle tuhne a vytváří se požadovaný model. I u tohoto typu je třeba počítat s podpěrami u komplikovanějších objektů, aby se požadovaný objekt nezhroutil během tisku. Nejpoužívanějšími materiály jsou termoplasty, polykarbonáty a nově také kompozitní materiály, které mají úplně jiné vlastnosti než klasické materiály. [3] [4]

Označení FFF (Fused Filament Fabrication) se zavedlo z toho důvodu, aby se vyvarovalo střetu s patentem FDM kvůli nezávislému projektu RepRap. Tento projekt vznikl v roce 2004 ve Velké Británii a velkou vahou k tomu přispěl matematik Adrian Bowyer. Jeho

idea byla navrhnout stroj, který by byl do značné míry schopen vyrábět sám sebe. V jednoduchosti to znamená, že každou poničenou součástku by bylo možné nahradit novou, kterou by si ale daný stroj vyrobil sám. Dále tato idea spočívala v otevřené licenci, tedy přístupná pro každého. Na této bázi nyní vzniká mnoho 3D tiskáren po celém světě. [6]



Obrázek 3 - Schéma FDM kartézské tiskárny [8]

V FDM tisku rozlišujeme tři druhy tiskáren podle toho, jakým způsobem se pohybují. První je kartézská (viz obr.3), která pracuje po třech osách x, y, z. Po osách x a z pracuje tisková hlava, zvaná extrudér, která vytlačuje materiál na desku pohybující se v ose y. Další známá je tiskárna Delta, která má extruder zavěšen na třech ramenech. To výrazně zlepšuje pohyb a zajišťuje velký tiskový prostor, naopak vyžaduje preciznost při stavbě a kalibraci. Poslední je tiskárna Polar, která není tolik využívána. Spočívá v pohybu tiskové hlavy ve dvou osách a otočné podložce. Všechny tyto tiskárny jsou pohybovány krokovými motory, které jsou lehce říditelné a chod není ovlivňován kolísáním zatížení. [3] [4]

2 Materiály pro FDM 3D tisk

Jak bylo již zmíněno, materiálů pro 3D tisk je mnoho a každý je specifický jinými fyzikálními i mechanickými vlastnostmi. Je velmi důležité rozhodnout se před tiskem, který z materiálů se nejlépe hodí a splní i ostatní požadavky pro tisk, aby výsledný výrobek vydržel všechna požadovaná kritéria. Jednou z podmínek je teplota tisku, která bývá omezena od 190 °C–280 °C. Toto omezení stanovuje výrobce těchto materiálů na základě testování různých teplot a výsledným namáháním vyrobeného prototypu. Další podmínkou je teplota podložky, která také hraje důležitou roli. Pokud by byla teplota nízká, filament by chladl rychleji, než je potřeba a nemusel by se tisknout dle představ, eventuálně dobře přichytit k podložce, případně při vysoké teplotě by se dostatečně neochladil a výrobek by se při tisku deformoval. To je způsobeno hlavně teplotní roztažností daného materiálu, kdy materiál mění svůj tvar a objem v závislosti na teplotě. [9]

3D vlákna jsou speciální typy plastů zvané termoplasty, které se stanou po zahřátí pružné. Dříve se vyráběli v 3mm tloušťce, ale později se přešlo k tloušťce 1,75mm. Tím se zajistila větší pružnost materiálu jak k navíjení na cívku, tak i k podávání a kroucení skrz extrudér až k horkému konci. Většina tiskových materiálů může být použita jak v domácím tisku, tak i v profesionálních aplikacích. [10]

V posledních letech se vyrábí i místo standartních vláken jako jsou například PET, PLA, ABS, také tzv kompozitní vlákna. To jsou zpravidla dva nebo více materiálů smíchaných do jednoho, které mají odlišné vlastnosti oproti původním materiálům. Důležité je ale mít na paměti, že čím vyšší je procento aditiva, tím bude vlákno drsnější, což může vést i k poškození 3D tiskárny. Lze se tomu ale snadno vyhnout, pokud se použije kalená tryska, která je odolnější oproti klasické. Důležité je také dbát na čistotu podložky, a proto se před tiskem čistí pomocí isopropylalkoholu, který podložku odmastí, aby se dosáhlo co nejlepší přilnavosti.

2.1 Klasické materiály

Se vznikem 3D tisku vznikly i první materiály, které jsou používány do dnes. Jejich výhodou je vysoká pevnost, dobré fyzikální vlastnosti, a hlavně nízké pořizovací náklady. Jsou rovněž použitelné pro všechny technologie 3D tisku.

2.1.1 PET (PETG, PETT)

Polyethylentereftalát (PET) je nejrozšířenější a nejběžnější používaný materiál v běžném životě. Používá se jako obal na potraviny, oděvní vlákna nebo láhve pro balenou vodu. Surový PET se většinou nepoužívá pro 3D tisk. PETT (Polyethylene coTrimethylene Terephthalate) je modifikovaná verze nazývaná kopolyster, který není až tak odolný. [12] Zdaleka nejvíce využívaným pro tisk je PETG. Označení PET-G je úprava klasického PET, pouze s příměsí modifikovaného glykolu, kvůli snadnějšímu použití, snížení jeho křehkosti a zvýšení odolnosti vůči nárazům. Jeho tisková teplota se pohybuje okolo 225 °C–250 °C a teplota podložky okolo 80 °C–100 °C. Elektrická pevnost se pohybuje v rozsahu 23–45 kV/mm. [11] [13] [14]

PETG kombinuje vlastnosti ABS a PLA. Je na rozdíl od ostatních materiálů více odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům a je možné jej lehce tvarovat. Dle výrobců se ale nejedná o nejjednodušší materiál na použití, jelikož závisí na dobrém nastavení tiskárny. Ideální využití má pro výrobu RepRap tiskáren, jejichž komponenty jsou snadno vyrobitelné. Další jeho výhodou jsou jeho pořizovací náklady, které jsou v porovnání s ostatními velmi malé. [6] [11]

2.1.2 PLA

Polylactic acid (PLA) je nejoblíbenějším a nejčastěji používaným termoplastickým materiálem pro domácí 3D tisk. Jeho největší výhodou je, že je bez zápachu a vyrábí se z obnovitelných zdrojů, nejčastěji kukuřičného a bramborového škrobu, takže je šetrný k životnímu prostředí. Je rozpustný v hydroxidu sodném a po vytištění modelu je náročné odstranit podpurné materiály z výsledného předmětu. Vyžaduje méně energie na zpracování oproti tradičním plastům, které jsou na bázi ropy. Kromě rozšíření v 3D tisku se hojně používá na potravinářské nádoby a ve zdravotnictví jako lékařské implantáty a rozpustné stehy, které se nevyndávají a v těle se rozpustí. Trvanlivost tohoto materiálu je pouze pár let a lze jej šetrně ekologicky zlikvidovat. Jeho tisková teplota se pohybuje okolo 210 °C–220 °C a teplota podložky okolo 40 °C–60 °C. Elektrická pevnost se pohybuje v rozsahu 26–34 kV/mm. [11] [12] [13] [15]

Výrobky z PLA jsou velmi pevné a díky nízké tepelné roztažnosti se na podložce nekrotí. Je tedy vhodný na výrobu prototypů a hraček. Lze tisknout i při nižších teplotách, aniž by to nějak poškodilo předmět, ba naopak, výtisk je pevný a téměř bez kazů ve spojích. Nevýhodou je sklon k pohlcování okolní vlhkosti, proto je nutné zabezpečit suché prostředí pro skladování. Při špatném skladování se to projeví na povrchu výsledného předmětu, kde se mohou objevit bublinky. [11]

2.1.3 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je amorfni termoplastický kopolymer, který se nejvíce používá pro výrobu dílů, které musí odolávat vyšším teplotám, která se pohybuje okolo 100°C a jsou odolné proti mechanickému poškození. Je to termoplast podobně jako PLA, což znamená, že může být opakovaně roztaven, aniž by došlo k narušení a znehodnocení materiálu. Může být také dodatečně zpracován acetonovými výpary, kterými se povrch naleptá a lze eliminovat drážkování, které při 3D tisku vzniká a získá tak lesklý povrch. Jelikož je ale v acetonu rozpustný, není vhodné mu výrobek dlouze vystavovat. Případně se hodí na spojení více výtisků dohromady. Jeho tisková teplota se pohybuje okolo 220 °C–265 °C a teplota podložky okolo 100 °C–120 °C. Teplota podložky je při tisku velmi důležitá, jelikož se ABS při ochlazování smrští, což může vést k deformacím předmětů. Elektrická pevnost se pohybuje v rozsahu 16–41 kV/mm.[11] [12] [13] [14] [16]

Jelikož je ABS ropný produkt a obsahuje příměs syntetického kaučuku, tak při zahřívání unikají škodliviny, a proto je důležité myslet na odvětrávání. Jeho výhodou jsou odolnost vůči kyselinám, tukům a olejům, proti opotřebením a tepelná odolnost. Proto se využívá jako ozubená kola, díly vystavené UV záření, pro výrobu nástrojů anebo LEGO kostek. Není však vhodný pro medicínské aplikace a pro tisk velkých dílů, kvůli jeho teplotní roztažnosti. V dnešní době není tolik používaný a je nahrazován jinými materiály. [11] [12]

2.1.4 ASA

Jako alternativa ABS byl vytvořen Akrylonitril-styrén-akrylát (ASA), který má zlepšenou odolnost proti přírodním vlivům, nežloutne z UV záření, není tak teplotně roztažný jako materiál ABS a také je vynikající pro výrobu dílů pro venkovní použití. ASA má vyšší tuhost než ABS, a proto se nejlépe používá pro náročné aplikace. Výhodou je dobrá mechanická odolnost, snadná tisknutelnost, odolnost proti teplotě a kvalita tisku. To je způsobeno hlavně jeho menší teplotní roztažností. Teplota tisku se pohybuje okolo 250 °C–270 °C a teplota

podložky okolo 90 °C–110 °C. Elektrická pevnost se může pohybovat v rozsahu 40–105 kV/mm. [11] [13] [16]

2.1.5 Polypropylen (PP)

Polypropylen má největší využití pro obaly a potravinové nádoby. Má lepší vlastnosti než PLA, což znamená že lépe odolává, tam kde by PLA praskl, PP se pouze ohýbá, tudíž je více flexibilní. Do budoucna se počítá s rozšířením jeho využití. Je zároveň velmi hygroskopický, takže je nutné ho před tiskem vysušit. Má ale špatnou přilnavost a je náročné ho přilepit na většinu tiskových povrchů a sklo. Teplota tisku je pohybuje okolo 250 °C–260 °C a teplota podložky okolo 90 °C–110 °C. Elektrická pevnost se může pohybovat v rozsahu 30–45 kV/mm. [11] [12] [16]

2.1.6 Nylon

Nylon je velice odolný a univerzální tiskový materiál s větší teplotní roztažností, což značí horší tiskové vlastnosti. Jeho vlákna jsou velmi pružná a tím pádem i odolná proti poškození. Je velmi dobrý pro tisk technických dílů jako jsou živé panty nebo funkčně pevné části. Podobně jako PP je velmi hygroskopický a je vhodné ho před tiskem vysušit, aby byl výsledný vytištěný předmět bez bublin a s hladkým a lesklým povrchem. [11]

Pro pevnější díly, které podléhají opotřebení se používá vylepšený NylonX, který má v sobě uhlíková vlákna. Díky tomu se materiálu mnohonásobně zvýší pevnost v tahu, stabilita a je méně pravděpodobná jeho pozdější deformace. Teplota tisku se pohybuje okolo 240°C–260°C a teplota podložky okolo 60°C–80°C. [11]

2.1.7 PC

Polykarbonát (PC) se například používá při výrobě neprůstřelného skla, což značí jeho obrovskou odolnosti proti nárazu. S touto vlastností ale také přichází obtížná náročnost tisku. Je taktéž velmi odolný proti vysokým teplotám. Využívá se také při výrobě RC modelů a částí dronů. Často se používá s ABS, nebo jej nahrazuje, a to díky jeho podobným tepelným vlastnostem. Je také skvělým nevodičem a díky jeho dielektrickým vlastnostem je dobré jej použít jako izolant. Teplota tisku se pohybuje okolo 250 °C–290 °C a teplota podložky okolo 90 °C–100 °C. Elektrická pevnost se může pohybovat v rozsahu 20–38 kV/mm. [11] [12]

2.2 Podpůrné materiály

Podpůrné materiály jsou takové, které se používají během 3D tisku, aby držely výsledný objekt v takovém stavu, aby se nedeformoval a zůstal tak celistvý. Takovéto podpěry se nazývají armatury. Je žádoucí, aby byly materiály ze snadno odstranitelného materiálu, například rozpustné ve vodě nebo jiné tekutině, která nesmí poškodit vytištěný předmět.

2.2.1 PVA

Polyvinilalkohol (PVA) je průsvitné tuhé vlákno, které je rozpustné ve vodě. Nejčastěji se používá při tisku s PVA, kvůli podobné teplotě tisku. Ideální použití je při duálním vytlačování. Jeden extrudér vytlačuje primární materiál a druhý PVA materiál jako podpěry. Je důležité ho dobře skladovat, jelikož i mírná vlhkost může materiál poškodit. Proto je důležité vzniklou strunu chladit vzduchem a ne vodou, což je komplikovanější a tím i nákladnější. Je také důležité, aby teplota tisku nepřesáhla 225 °C, při této teplotě začíná PVA krystalizovat. Teplota tisku se pohybuje okolo 180 °C–200 °C a teplota podložky okolo 45 °C–55 °C. [11] [12]

2.2.2 HIPS

High Impact Polystyrene lze rozpustit pomocí rozpouštědla Limonelu. Je vhodný pro modely s mnoha převisy a drobnými detaily. Nejčastěji se používá při tisku s ABS, kvůli podobné teplotě tisku. Díky jeho vlastnostem je vhodné ho použít při tisku velkých objektů. Lze ho brousit a povrchově upravovat. Teplota tisku se pohybuje okolo 220 °C–240 °C a teplota podložky okolo 100 °C–120 °C. Elektrická pevnost se může pohybovat v rozsahu 12–24 kV/mm. [11] [16]

HIPS lze použít i jako tiskový materiál, a ne pouze jako podpůrný materiál. Díky podobným vlastnostem jako má ABS, které jsou v porovnání s PLA srovnatelné ho lze i nahradit. Je velice odolný proti opotřebení, je pevný a jeho vysoká teplota tisku zajišťuje jeho vysokou pevnost. [12]



Obrázek 4 - Vizualizační příklady materiálů [3]

Název	PLA	ABS	PETG	ASA	FLEX	HIPS	PA	PC	PP
Pevnost v tahu * [Mpa]	45	30	42	55	10	32	63	50	32
Max. teplota použitelnosti [°C]	50	90	70	90	60	100	80	120	100
Koeficient teplotní roztažnosti [μm/m-°C]	68	90	60	98	157	80	95	69	150
Tuhost ** [od 1 do 10]	7	5	5	5	1	10	5	6	4
Odolnost *** [od 1 do 10]	4	8	8	9	9	7	10	10	9
Tisknutelnost **** [od 1 do 10]	9	7	8	7	6	6	4	2	4

- zelená – nejlepší, žlutá – průměrná hodnota, červená – nejhorší

* vyšší číslo – pevnější materiál

** vyšší číslo – tužší materiál

*** vyšší číslo – odolnější materiál

**** 0 – špatně tisknutelné, 10 – velmi dobře tisknutelné

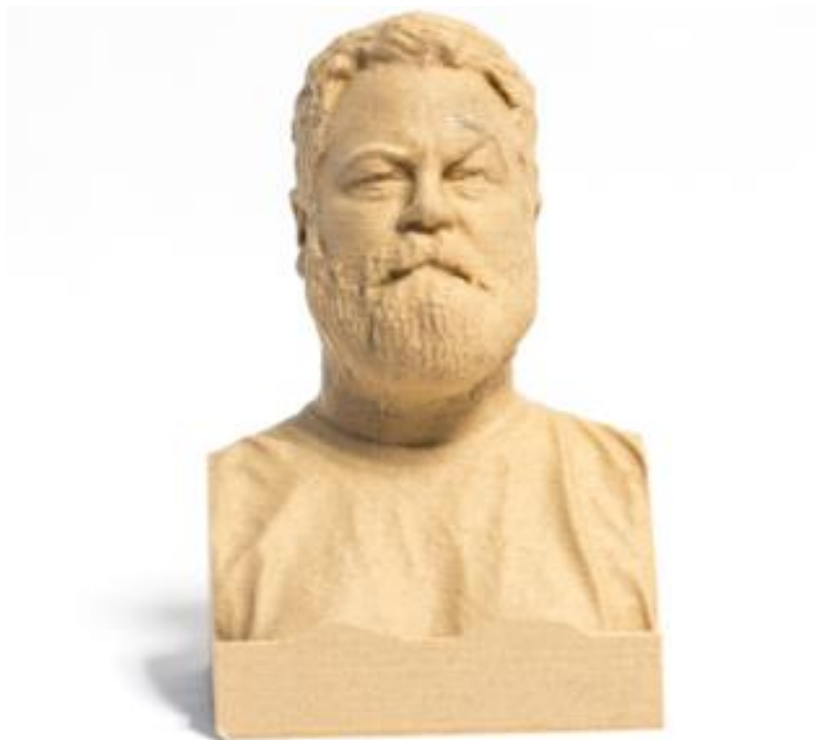
Tabulka 1- Vlastnosti vybraných materiálů [17]

2.3 Kompozitní materiály

Kompozitní vlákna jsou doposud neprobádanou krajinou, která se začala rozšiřovat od roku 2013. Lze sloučit takřka každý materiál, ale nemusí to být vždy výhodné. Sloučením se získá úplně nový materiál s odlišnými vlastnostmi oproti předchozím materiálům, které mohou být lepší, horší nebo destruktivní pro 3D tiskárnu. Je důležité tedy dbát na vlastnosti jednotlivých materiálů a vybírat je s citem a zkušeností. V současné době je značné úsilí o vytvoření materiálů s výbornými fyzickými i mechanickými vlastnostmi, nebo plně vodivými vlákny, kterými by se rovnou tiskly potřebné předměty. V této práci autor zohlední a popíše vlastnosti kompozitního materiálu PET/ABS oproti jejich samostatným klasickým vlastnostem. [11] [12]

2.3.1 Laybrick

Tento typ kompozitního vlákna dodává předmětům vzhled šedého kamene nebo pískovce, ale je zachována pružnost plastu. Složení tohoto materiálu se skládá z přírodních minerálních plniv (velmi jemně namletá křída) a kopolysterů. [18] Při nižších teplotách, což je do 190°C se tiskne hladce do vzoru šedého kamene, avšak při vyšších teplotách se podobá spíše pískovci. Tento materiál se používá pro architektonické modely a umělé kameny. Teplota tisku se pohybuje okolo 180 °C–200 °C a teplota podložky okolo 20 °C–50 °C. [11]



Obrázek 5 - Ilustrativní obrázek kompozitního materiálu pro výrobu bust, který připomíná dřevo [9]

2.3.2 Vodivá vlákna

Modifikované PLA vlákno, určena pro obvody nízkého napětí. Oproti ostatním materiálům není tak mechanicky a chemicky odolný. S přidáním uhlíkového vlákna PLA ztrácí materiál na pevnosti a je více náchylný k praskání. Nevýhodou je špatná přilnavost k podložce a vrstvám. Rezistivita těchto vláken se pohybuje řádově kΩ.cm, což se od Cu plošných spojů liší, jelikož rezistivita mědi se pohybuje řádově μΩ.cm. Výsledkem toho je menší vodivost těchto vláken, poněvadž čím větší je rezistivita, tím menší je vodivost daného materiálu a tím

větší mají elektrický odpor. [19] Nejběžnější použití je pro prototypy, zařízení s LED a kapacitní dotykové senzory. Teplota tisku se pohybuje okolo 210 °C–230 °C a teplota podložky okolo 40 °C–60 °C. [11] [13]

2.3.3 PLA vyztužená uhlíkovými vlákny

Díky uhlíkové tuhosti má tento kompozit velmi dobrou strukturální pevnost s nízkou deformací a vysokou tuhost. Je ideální spíše pro materiály, které nebudou fyzicky namáhány a ohýbány, jelikož jsou spíše pevnější. Největší využití mají pro výrobu těl dronů a dílů pro RC modely aut. Opět kvůli pevnosti materiálu je třeba před tiskem vyměnit trysku za kalenou ocelovou, aby se nepoškodila 3D tiskárna. Teplota tisku se pohybuje okolo 200 °C–220 °C a teplota podložky okolo 40 °C–60 °C. [11]

2.4 Elektrické pevnosti vybraných materiálů

Pro lepší přehlednost jsou dohledané elektrické pevnosti v níže uvedené tabulce. Ta může být později použita pro porovnání s vysokonapěťovými experimenty viz dále. Vždy je uveden rozsah od minima po maximum z toho důvodu, že existuje více zdrojů a každý udává elektrickou pevnost vždy trochu jinak. Tento rozsah je závislý na mnoha faktorech, na tloušťce materiálu, teplotě tisku či výšce vrstev. Proto nelze přesněji učit jednu elektrickou pevnost, ale vždy pouze rozhas, ve kterém pohybuje pro daný materiál. [14] [15] [16]

Materiál	Elektrická pevnost	
	Min [kV/mm]	Max [kV/mm]
PETG	23	45
PLA	26	34
ABS	16	41
ASA	40	105
PP	30	45
PC	20	38
HIPS	12	24

Tabulka 2 - Porovnání elektrických pevností vybraných materiálů [16]

3 Vysokonapět'ové experimenty

Vyhodnocování napět'ových zkoušek nelze považovat za neodbornou záležitost, a proto je důležité dodržovat určité normy stanoveny Institutem pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (dále pouze IEEE). Pro tyto zkoušky vydalo IEEE průvodce pro statistickou analýzu, která zajišťuje opakovatelnost experimentu, a zároveň alespoň trochu dohlíží na postup jejího vyhodnocení. [22]

3.1 Norma IEEE Std 930™-2004

Jak již bylo zmíněno, při vyhodnocení je třeba dbát na postupy dle norem pro vyhodnocování odolnosti a pevnosti izolačních materiálů při elektrickém namáhání. Lze jej zkoušet pomocí statických zatěžovacích testů, kdy se na materiál přivede konstantní napětí a měří se čas průrazu pro několik vzorků nebo dynamických zatěžovacích testů, ve kterých se zvyšuje napětí a měří velikost průrazného napětí. U statických testů se projeví spíše tepelný průraz, jelikož je při konstantním napětí hůře odváděno teplo z plochy materiálu, zatímco u dynamických se projeví spíše elektromechanický průraz v závislosti na rostoucí teplotě a napětí. Při obou zkouškách získá každý vzorek jiný výsledek, který je potřeba dále vyhodnotit dle statistických rozdělení. Nejčastěji se poruchy pevných izolací popisují Weibullovou a Gumbelovou distribucí. Pro vyhodnocení testovaného materiálu PET/ABS se použilo rozdělení Dvouparametrické Weibullovo, které je považováno za jedno z nejlepších pro vyhodnocení a popis životnosti materiálů. [22]

3.1.1 Charakteristika Weibullova rozdělení

Nejobecnější výraz Weibullova rozdělení je dán tříparametrovým výrazem, který je označen (1):

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{t - \gamma}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

β je parametr tvaru, známý jako Weibullův sklon

α je parametr měřítka

γ je parametr umístění

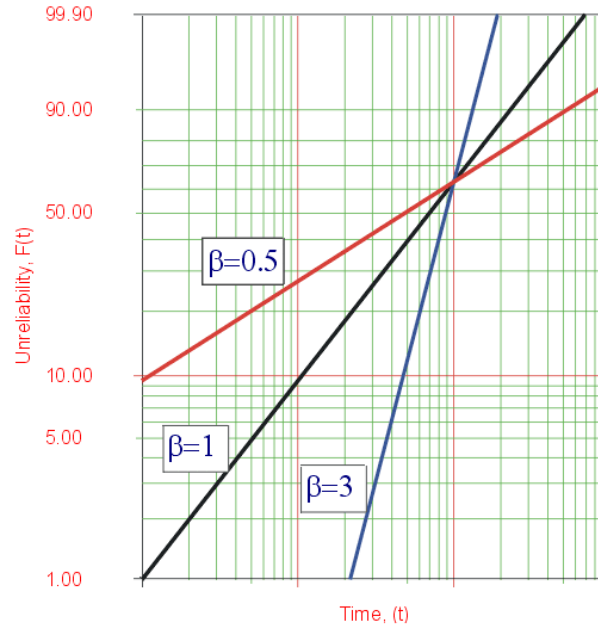
Parametr umístění lze chápat jako nejbližší předpokládaný čas, po jehož uplynutí může dojít k průrazu, ale často se nepoužívá, jelikož ho lze snadno zaměnit se statistickým ukazatelem umístění, a proto lze tuto hodnotu nastavit rovno nule. Respektive hodnota tohoto parametru udává dobu, do které nemůže nastat průraz. V tomto případě dostáváme dvouparametrové rozdělení, které je označeno (2): [20]

$$F(t; \alpha; \beta) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right\} \quad (2)$$

Existuje také i jednoparametrová distribuce, která má ve skutečnosti stejnou podobu jako dvouparametrová, pouze s tím rozdílem, že hodnota β je předem známa. Je třeba odhadnout parametr měřítka, což umožňuje analýzu malých datových souborů. Tento parametr udává velikost hodnoty na ose x, při které došlo k poruše. Při změně tohoto parametru se nemění aktuální tvar rozdělení, ale pouze měřítka. Zjednodušeně způsobuje roztažení či smrštění rozdělení. [20][21]

3.1.2 Parametr β

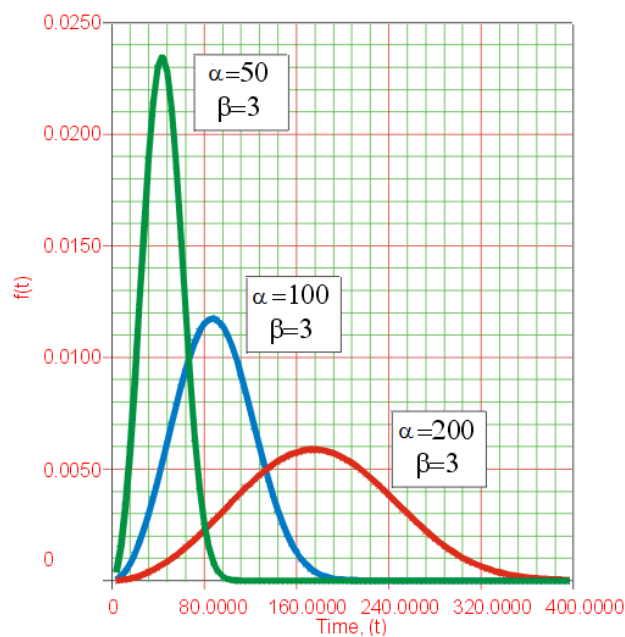
Parametr nazýván Weibullův sklon. Tato hodnota je rovna sklonu linie v grafu pravděpodobnosti. Různé hodnoty mohou mít charakteristický vliv na chování celé distribuce. Pro toho vyhodnocení je nejdůležitější sklon v pravděpodobnostním grafu, kdy se s měnící hodnotou mění i sklon celé funkce. [20][22]



Obrázek 6 - Vliv parametru na graf pravděpodobnosti $F(t)$ při stejné α za čas t [21]

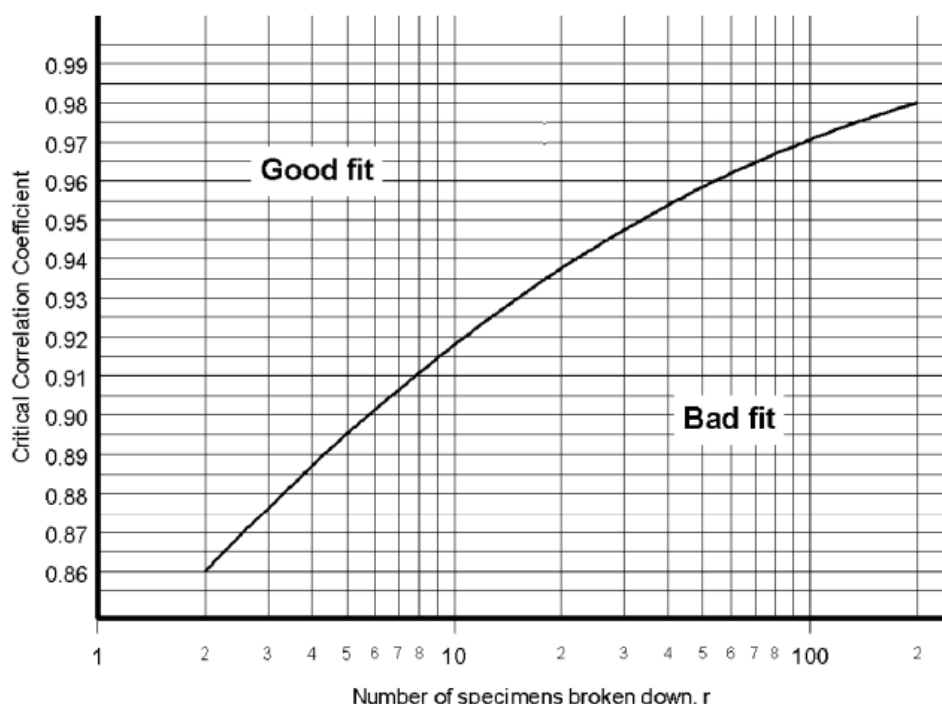
3.1.3 Parametr α

Zatímco předchozí parametr určoval sklon funkce, změna parametru α má podobný účinek jako změna stupnice vodorovné osy. Zvýšením hodnoty α při konstantním parametru β se zvýší hodnoty na ose x , což má za následek i posunutí pravděpodobnostního jevu k vyšším hodnotám. [20][22]



Obrázek 7 - Vliv parametru α na pravděpodobnost a osu x [21]

3.1.4 Správnost přizpůsobení



Obrázek 8 - Graf pro kontrolu správnosti přizpůsobení dvouparametrového Weibullova rozdělení [22]

Jedním z klíčových faktorů pro tuto metodu je graf pro kontrolu správnosti přizpůsobení. Z grafu (obr. 8) je jasně patrné, kolik vzorků je potřeba, aby bylo měření považováno za správné a opakovatelné. Pokud by se stalo, že se při určitém počtu vzorků dostal uživatel do zóny „Bad fit“, je vhodné počet vzorků navýšit, ideálně dvojnásobně. Pokud by ani totéž nepomohlo, je nutno měření zopakovat, či rovnou při vysokém počtu vzorků vyhodnotit vzorek za nevyhovující. Je-li počet vzorků dostačující, je možno pokračovat dále. [22]

3.2 Elektrická pevnost

Vzhledem k testování kompozitu PET/ABS vysokonapětovou zkouškou, je důležité popsat, co elektrická pevnost je a jaké typy průrazů existují pro jeho další zkoumání. Elektrická pevnost se definuje jako kritická velikost intenzity elektrického pole, při které materiály ztrácejí svoje izolační a dielektrické vlastnosti. Po překročení této meze dochází k nárůstu volných nosičů náboje, díky kterým klesá rezistivita materiálu. V místě poruchy vzniká elektrický průraz, který je pro pevné látky trvalý, pro plynné a kapalně látky k přeskoku, který může být jen dočasný a dochází k poklesu napětí na elektrodách, a zároveň k nárůstu proudu. Číselně se jednotky v praxi uvádí především v kV/mm. Při průrazech záleží nejen na velikosti přiloženého napětí, ale také na době přiložení napětí a díky tomu rozeznáváme tři druhy průrazů. [23] [25]

3.2.1 Čistě elektrický průraz

Tento typ průrazu nastává ve velmi krátkých časech s vysokou intenzitou elektrického pole. Tento průraz se zkoumá pomocí rázového napětí, tím je docíleno, že by nemělo dojít k tepelnému nebo elektromechanickému průrazu. Jelikož na světě neexistují dokonalé izolanty, tak ve skutečnosti mají mezi základní a vodivostní hladinou poruchové hladiny, díky kterým je ulehčen přechod elektronů. Právě při vysokých energiích jsou schopny elektrony přecházet ze zaplněného valenčního pásu do vodivostního. Volné elektrony dostávají energii od elektrického pole a jsou brzděny krystalovou mřížkou. Pokud vzroste nárůst energie na takovou hodnotu, že

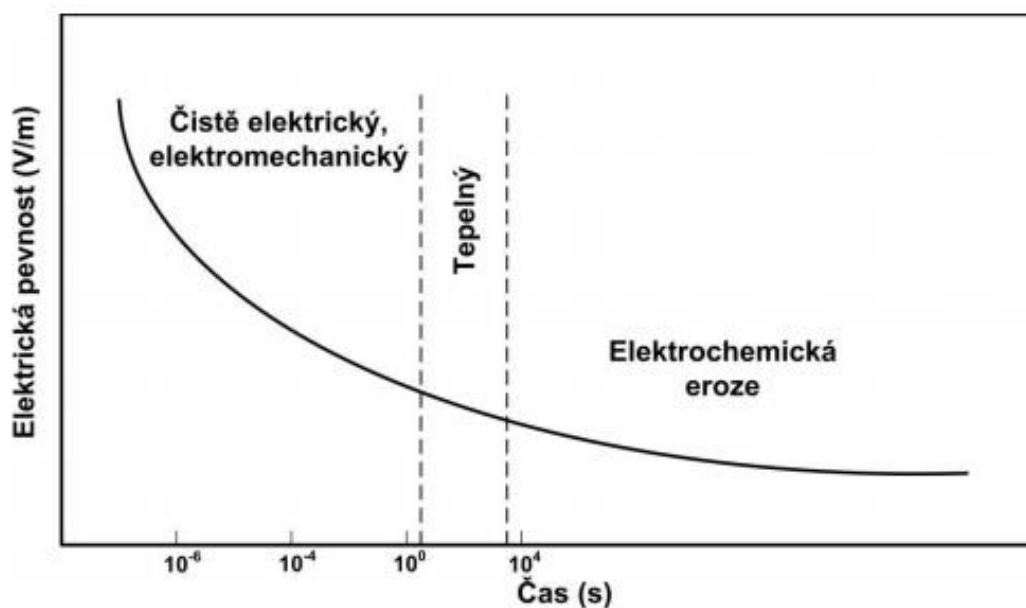
již není látka schopna elektronům zabránit přestupu do vodivostního pásu, klesne odpor a dochází k čistě elektrickému průrazu. Velikost tohoto průrazu je nezávislá na tloušťce materiálu a tvaru elektrod, ale je závislá na atomární struktuře dané látky. Fyzikální mechanismus způsobující tyto poruchy se u různých látek liší. Pro pevné látky se tak děje při dostatečně silném elektrickém poli a po průrazu je v tento jev nevratný. V plynu urychluje elektrické pole malý počet volných elektronů na dostatečně vysokou rychlost, že když se srazí s molekulami plynu, tak z nich vyrazí další elektrony. Tento proces se také nazývá ionizace. Jelikož jsou ale v této práci zkoumány pevné látky, není tak podstatné zabývat se průrazy u plynných látek. [23] [24] [26]

3.2.2 Tepelný průraz

Podstatou tohoto průrazu jsou vytvářející se dielektrické ztráty v materiálu. S rostoucí lokální teplotou se látka ohřívá a roste její ztrátový činitel, klesá odpor a zvyšuje se vodivost, což vede k dalšímu nárůstu teploty. Pokud není zajištěn odvod tepla z plochy materiálu do okolního prostředí, teplota se rychle zvyšuje, dokud nedochází k tepelnému průrazu. Tento typ průrazu je závislý na tloušťce materiálu, tzn. čím větší tloušťka materiálu, tím hůře se odvádí teplo a tím větší je pravděpodobnost průrazu. Tepelný průraz má tři příčiny. První je, že při dostatečně vysokém napětí nelze dojít k ustálení teploty, dále špatný odvod tepla z materiálu s nízkou hodnotou bodu tavení a poslední příčinou je nerovnoměrný ohřev izolantu. Ze všech tří průrazů je nejdelší a trvá řádově několik sekund. [23] [24] [26]

3.2.3 Elektromechanický průraz

Elektromechanický průraz je nejběžnější typ průrazu, u kterého se objevují oba již zmíněné průrazy. Často nelze přesněji uvést, zda se jedná čistě o elektrický nebo tepelný průraz. Nejčastěji se totiž vyskytuje jejich kombinace. Jedná se o průrazy, které trvají několik sekund. U vysokonapěťových zkoušek s nevodivými materiálními kompozity se lze setkat nejčastěji s tímto typem průrazu, jelikož zde závisí jak na struktuře vytištěného materiálu, tak na teplotě, která s vzrůstající hodnotou napětí taktéž stoupá vlivem dielektrických ztrát. [23] [24]



Obrázek 9 - Graf závislosti elektrické pevnosti na čase [27]

3.3 Měření kompozitu PET/ABS

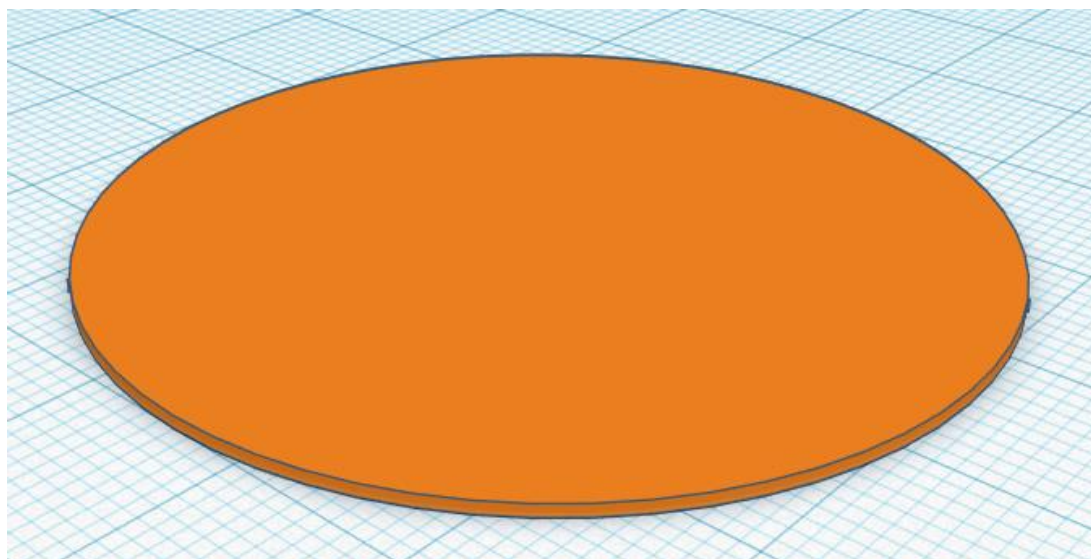
Kompozit PET/ABS je kombinací dvou velmi pevných, odolných a tvarovatelných materiálů. Zároveň je ale neprobádaný a není úplně predikovatelné, jaký bude mít vliv na tiskovou plochu, na vrstvení při tisku nebo samotnou tiskárnu. Cílem autorova měření bylo prozkoumat a vyhodnotit elektrickou pevnost tohoto kompozitu a porovnat jej s konvenčními materiály, případně určit teplotu tisku, při které se materiál lépe tiskne a nevznikají kazy a při kterých teplotách bude lepší elektrická pevnost. Měření probíhalo při střídavém napětí. Materiál byl umístěn v kádince s olejem a na jeho vrchní a spodní straně byly umístěny ploché elektrody, které se dotýkaly materiálu. Na ty bylo přivedeno napětí s krokem 2kV/s až do doby, než došlo k průrazu. Vyhodnocení proběhlo ve dvou programech.

Tisk materiálu probíhal při dvou teplotách, přičemž podložka měla teplotu v obou případech vždy stejnou teplotu. Chtěná výška vrstev byla po 150 μm a nastavená výška prototypu 0,6 mm. Hodnoty pro přehlednost jsou uvedeny v tab.3.

Teplota tisku [$^{\circ}\text{C}$]	235	250
Teplota podložky [$^{\circ}\text{C}$]	80	
Výška vrstev [μm]	150	
Výška prototypu [mm]	0,6	

Tabulka 3 – Parametry vzorků pro měření

U obou případů se odchylka měřené výšky prototypu pohybovala okolo 10%, což se na první pohled zdá jako relativně přijatelná odchylka. Během měření se ale projevil nedokonalosti a kazy při tisku s vyšší teplotou a takřka 5% z vytištěných prototypů nebylo možno použít. Z tohoto výsledku lze usoudit, že zprůměrováním teplot samostatných PET a ABS bychom mohli docílit hladkého tisku bez kazů. Ale jelikož tato skutečnost byla testována pouze pro dvě teploty tisku a jednu teplotu podložky, která v takovém případě také může hrát velkou roli, jedná se pouze o odhad. Této skutečnosti si lze všimnout již při samotném tisku, jelikož pro teplotu 235 $^{\circ}\text{C}$ byl tisk hladší a bez větších kazů, naproti tomu u 250 $^{\circ}\text{C}$ byly občas viditelné vady na okrajích vytištěných vzorků. Pro takovou zkoušku by bylo třeba provést kromě zkoušky elektrické pevnosti také zkoušku v tahu a ohybu, případně prozkoumat jednotlivé strukturované vrstvy.



Obrázek 10 - Schéma testovacího vzorku určeného pro tisk

Na obrázku 10 lze vidět vymodelované schéma testovacího vzorku, který byl určen pro tisk a následné testování. Průměr vzorku byl 3,5 cm a nastavená výška byla 0,6 mm, která byla poté proměřována za účelem zjištění, zda je případná odchylka nastavené výšky od skutečné. Výška vrstev byla nastavena na 150 μm .

3.3.1 Vyhodnocení v programu Microsoft Excel

Jako první je třeba zjistit korelační koeficient. Ten udává pravděpodobnost vzájemného vztahu mezi dvěma veličinami. V závislosti na korelačním koeficientu se poté kontroluje správnost přizpůsobení dle obrázku č.8. Ten lze snadno zjistit pomocí dvou přepočítaných vlastností, v našem případě je to elektrická pevnost a pravděpodobnost průrazu. Výsledná hodnota se porovnává s počtem vzorků a dle grafu (obr. 6) se zjistí, zda lze pokračovat ve vyhodnocení a či je toto měření opakovatelné a relevantní. Pro teplotu tisku 235 °C se korelace rovná 95 % a pro 250 °C 91 % s měřením pro 15 vzorků. Ideálně by se ale korelace měla pohybovat okolo 96 % a více, což značí první komplikaci, který se ale autor pokusí zanedbat, aby zjistil, zda tento kompozit dosahuje lepší elektrické pevnosti či nikoliv. Pravděpodobnostního rozdělení dosáhnout jednoduchým vzorcem (3):

$$F(i, n) = \frac{I(i) - 0,44}{n + 0,25} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

kde $I(i)$ značí kolikátý vzorek v pořadí se vybral a n je celkový počet vzorků. [21][22]

Dále je nutno zmínit výpočet hodnot pro korelaci elektrické pevnosti (4) a pravděpodobnosti (5):

$$Y_i = \ln(t_i) \quad (4)$$

$$X_i = \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{F(i, n)}{100}\right)\right) \quad (5)$$

kde t_i značí hodnotu elektrické pevnosti a $F(i, n)$ pravděpodobnost průrazu.

Díky těmto parametrům již lze lehce vypočítat Weibullův sklon parametr β (6), kterým se poté dopočítá i parametr α (7), které jsou nedílnou součástí pro porovnání s klasickými materiály. [21][22]

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^r [(X_i - \bar{X})]}{\sum_{i=1}^r [(X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})]} \quad (6)$$

$$\alpha = \exp\left\{Y - \frac{X}{\beta}\right\} \quad (7)$$

Toho vyhodnocení nepočítá s tzv váhovacími faktory (w_i), které se připočítávají k hodnotám X_i a Y_i a upravují a zpřesňují měření. Tyto faktory lze najít v normě IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Breakdown Data a používají se pouze při menším počtu vzorků, konkrétně do 20. Jelikož druhý program, ve kterém se vyhodnocení provádělo nepočítá s těmito faktory, je nutné je zahrnout do vyhodnocení s programem excel pro lepší porovnání výsledků. Upravené rovnice s faktory tedy znějí: [21][22]

$$X = \frac{\sum_{i=1}^r [w_i X_i]}{\sum_{i=1}^r [w_i]} \quad (8)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^r [w_i Y_i]}{\sum_{i=1}^r [w_i]} \quad (9)$$

Totéž poté platí i pro výpočet parametru β (10), výpočet parametru α zůstává stejný.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^r [w_i (X_i - \bar{X})]}{\sum_{i=1}^r [w_i (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})]} \quad (10)$$

Díky všem těmto rovnicím, které jsou stanoveny IEEE a je nutno se jimi řídit, lze snadno vypočítat potřebné parametry s váhovacími faktory i bez nich a vynést je pro přehlednost do tabulky. K této tabulce se přiřadí i samostatné materiály, uvedeny výše v porovnání materiálů, pro jejich lepší porovnání (viz tab. 4).

3.3.2 Vyhodnocení v programu Wolfram Mathematica

Pro druhé vyhodnocení se použije Wolfram Mathematica, ve které se již nemusejí tak složitě dopočítávat potřebné parametry a tento program počítá bez váhových koeficientů. Pouze zde stačí vložit soubor naměřených hodnot elektrických pevností a dle správných příkazů program sám vykreslí graf a vypočítá potřebné parametry. Pro výpočet se použil příkaz:

`EstimatedDistribution[naměřené_hodnoty, WeibullDistribution[α , β]]`

A pro vytvoření grafu:

`ProbabilityScalePlot[{hodnoty 235°C, hodnoty 250°C}]`

Tyto parametry jsou opět zahrnuty společně s programem excel (viz tab. 2).

Tento i dříve zmíněný program (viz kapitola 3.3.1) bude použit pro vyhodnocení všech materiálů, které budou zkoumány v této práci.

3.3.3 Zhodnocení měření kompozitu PET/ABS

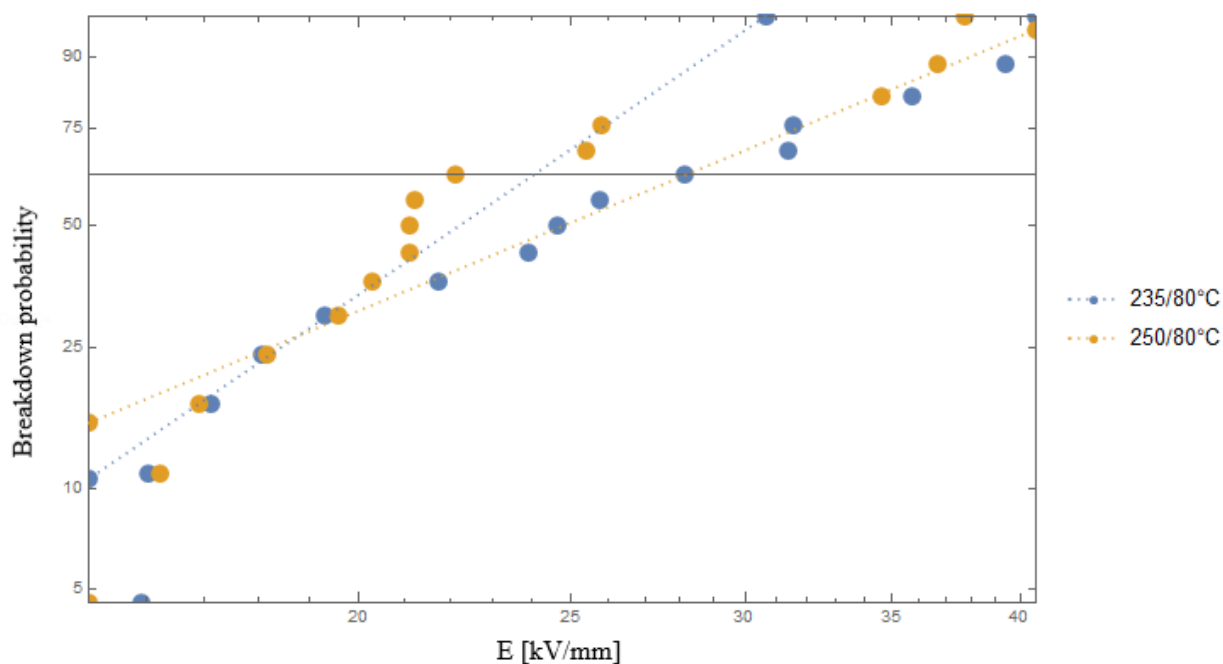
Pro celkové vyhodnocení se použijí hodnoty dopočítané z kapitol 3.3.1 a 3.3.2, a také získané hodnoty z dřívějších měření pro samostatné materiály PET a ABS, které byly převzaty z jiné akademické práce. [28] Z těchto hodnot lze snadno usoudit, zda vývoj kompozitního materiálu PET/ABS má technický a fyzikální význam, či nikoliv.

PET/ABS				PET		ABS	
Excel							
235 °C		250 °C		Alfa	Beta	Alfa	Beta
Alfa	Beta	Alfa	Beta	40,2	10,9	41,3	7,7
28,6	4	25,5	4,6				
Mathematica							
Alfa	Beta	Alfa	Beta				
28,9	3,5	26,1	3,5				
S koeficienty							
PET/ABS				PET		ABS	
Excel							
235 °C		250 °C		Alfa	Beta	Alfa	Beta
Alfa	Beta	Alfa	Beta	40,2	11,8	41,3	10,2
28,8	3,1	25,5	3,4				
Mathematica							
Alfa	Beta	Alfa	Beta				
28,9	3,5	26,1	3,5				

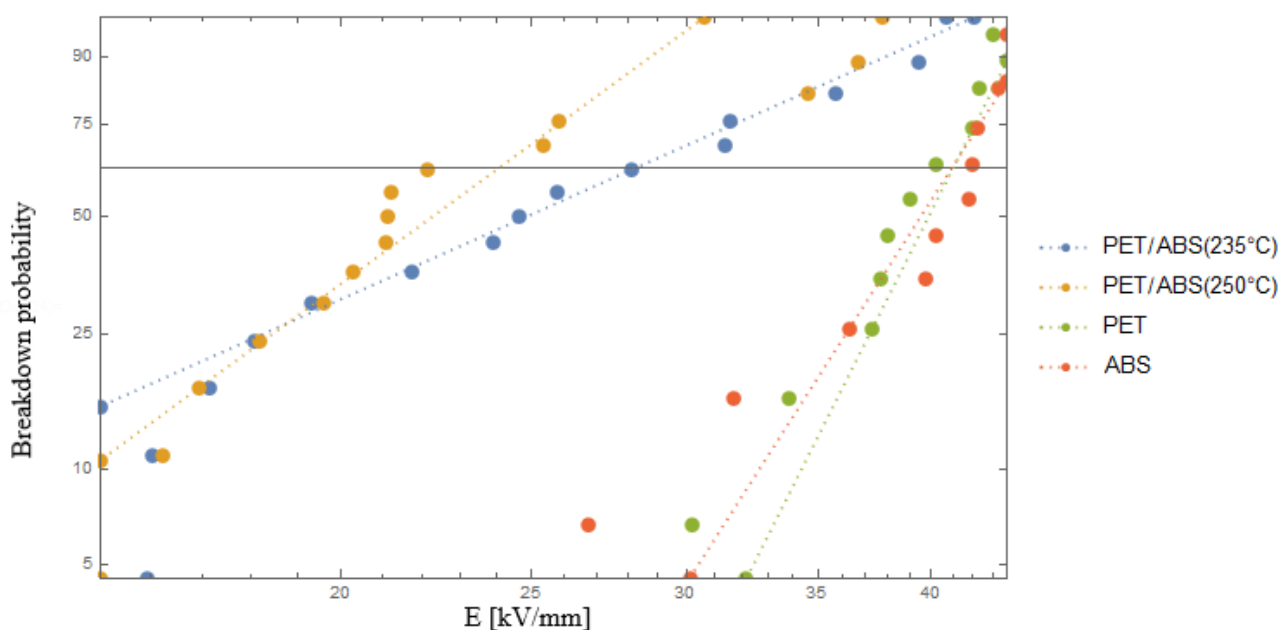
Tabulka 4 - Celkové zhodnocení měřeného kompozitu dvěma programy oproti klasickým materiálům

Z této tabulky je jasně patrné, že ani pro jednu teplotu tisku kompozitního materiálu PET/ABS se oba parametry ani lehce neblíží ke klasickým materiálům. Lze tedy dojít k závěru, že tento kompozit nemá a v budoucnu asi ani nebude mít takové uplatnění co se týče elektrické pevnosti jako samotné PET nebo ABS, alespoň ne v tomto poměru, ve kterém jsme ho testovali 2:1. Dále i zde jsou vidět rozdíly v teplotě tisku, kdy pro 235 °C se hodnoty tak výrazně neliší a drží si odchylky β o 12 % a α o zanedbatelně malé %. Přičemž pro teplotu 250°C jsou odchylky už větší. I přestože se pro jeden případ rovnají parametry β , tak přes tento fakt je stále efektivnější a lepší nižší teplota tisku. Co se týče srovnání s běžnými materiály, tak smícháním PET/ABS nedosáhneme lepší elektrické pevnosti, která je v průměru 25,95 kV/mm, ba naopak. Zda dosáhneme lepších jiných fyzikálních vlastností nelze bez podložených měření soudit, ale z prvotního konstatování nelze počítat s pozitivními výsledky.

Celkově kompozit PET/ABS považovat za elektricky méně pevný a při vyšší teplotě i hůře tisknutelný. V poměru 2:1 není jeho technické využití efektivní a je třeba jeho poměr přehodnotit, či přidat další materiál, který by zvýšil jeho elektrickou pevnost a zároveň by se i lépe tiskl. Zda je technická část ruku v ruce spjata s ekonomickým zhodnocením se bude autor zabývat v ekonomické části tohoto projektu.



Graf 1 - Grafické zhodnocení kompozitu PET/ABS pomocí programu Wolfram Mathematica pro dvě různé teploty



Graf 2 - Grafické srovnání kompozitu PET/ABS oproti běžným materiálům

3.3.4 Měření kompozitu PET/ABS oproti sandwich struktuře PET a ABS

Pro další porovnání kvality materiálu PET/ABS oproti klasickým materiálům se použil tzv sandwich (navrstvení) o stejné výšce prototypu vytvořen kombinací materiálů PET a ABS. Tiskové teploty byly použity doporučené s ohledem na tištěný materiál. Výška vrstev zůstává stejná. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé parametry uvedeny v následující tabulce 5.

Materiál	PET	ABS
Teplota tisku [°C]	240	255
Teplota podložky [°C]	105	105
Výška vrstev [μm]	150	
Výška prototypu [mm]	0,6	
Výška materiálu [mm]	0,3	0,3

Tabulka 5 - Parametry pro tisk navrstvených materiálů

Tištění jednotlivých testovacích vzorků bylo provedeno ručně, což znamená že se při vytištění prvního materiálu o výšce 0,3 mm musela vyměnit struna a poté se dotiskl zbytek vzorku. Prvním problémem při samotném tisknutí vzorků byl chtíč vytisknout jich co nejvíce, což se nejevilo jako ideální, jelikož se spodní materiál, kterým bylo ABS, odlepoval od podložky. Až při snížení počtu vzorků bylo tištění kvalitnější. Jako další problém lze uvést, že žádný z vzorků se nevytiskl na požadovanou výšku 0,6 mm. Výšky vytištěných vzorků se pohybují okolo 0,55 mm. Rychlost pro tisk první vrstvy se raději zvolila pomalejší o 20 % na 16 mm/s v důsledku odlepování materiálu od podložky.

Opět bylo vytištěno 15 vzorků, pro kterou se pohybuje korelace pro více než 96 % (viz kapitola 3.3.1). Pro tuto kombinaci je korelace 92 %, což značí, že ani tento postup není příliš validní a je jistě další komplikací, podobně jako s kompozitem PET/ABS. Opět se ale tato skutečnost zanedbá, aby bylo možno zjistit, zda je tento postup lepší či nikoliv. Měření probíhalo při střídavém napětí. Materiál byl umístěn v kádince s olejem a na jeho vrchní a spodní straně byly umístěny elektrody, které se dotýkaly materiálu. Na ty bylo přivedeno napětí s krokem 2 kV/s až do doby, než došlo k průrazu. Vyhodnocení proběhlo opět ve dvou programech (viz kapitola 3.3.1 a 3.3.2).

Velice zajímavé zjištění nastalo již při měření, jelikož se tato kombinace jevila stabilněji a z původního napěťového rozmezí 12–27 kV pro kompozit PET/ABS se změnila na 25–30 kV.

3.3.5 Vyhodnocení sandwich struktury PET a ABS

Po vyhodnocení je průměrná elektrická pevnost tohoto materiálu 49,65 kV/mm, což se oproti kompozitu liší takřka dvojnásobně. To může být do nějaké míry způsobeno tloušťkou vzorků, jelikož jsou menší než požadované. Pokud se ale tento sandwich porovná pouze s běžnými materiály PET a ABS, kdy je průměrná elektrická pevnost pro oba okolo 38 kV/mm, je zde vidět značný rozdíl. Nelze přesněji určit, čím je tato odchylka běžných materiálů oproti spojení způsobena, ale pokud by detailnější zkoumání tento fakt potvrdila, bylo by to jistě výhodnější do budoucna než výroba kompozitního materiálu PET/ABS.

Materiál	PET/ABS	Sandwich (PET+ABS)	PET	ABS
Průměrná elektrická pevnost [kV/mm]	25,95	49,65	38,4	38,8

Tabulka 6 – Aritmetický průměr elektrické pevnosti jednotlivých materiálů

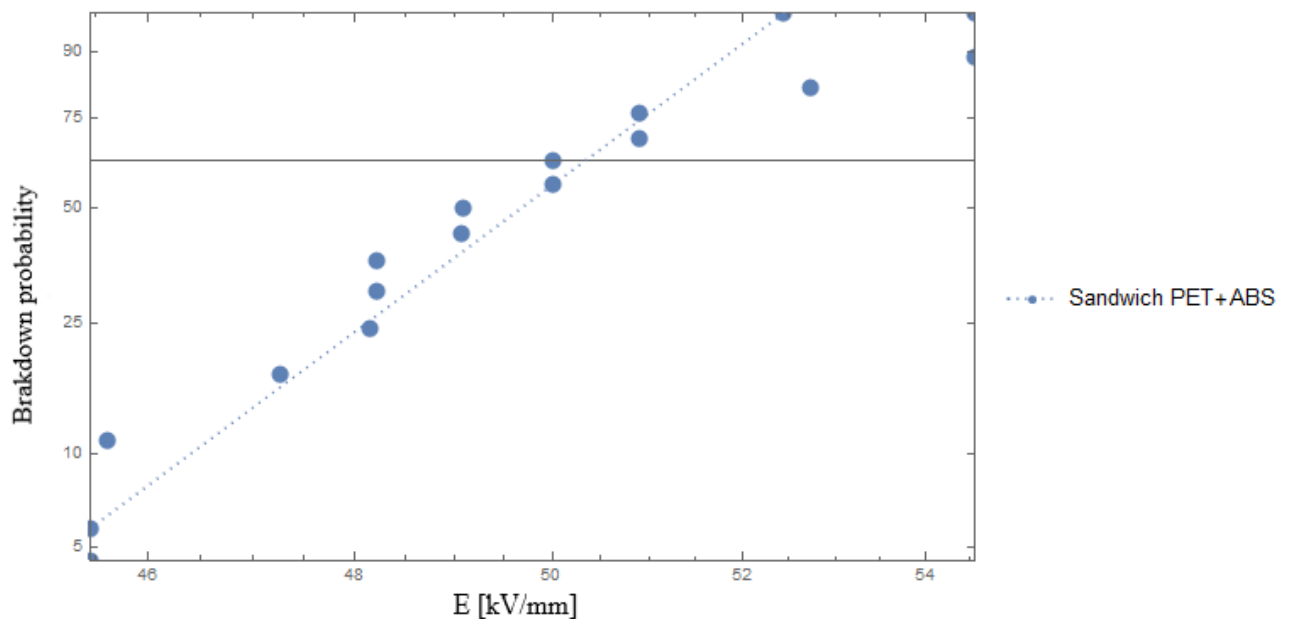
Pro vyhodnocení bylo použito také Weibullovo rozdělení, opět v programech Microsoft Excel a Wolfram Mathematica.

V tabulce 7 je zobrazeno vyhodnocení pro parametry α a β . Ty jsou téměř totožné při vyhodnocení v Mathematice a v Excelu s váhovacími koeficienty. Tudiž i pro nepřijatelnou korelaci se toto měření jeví mnohem lépe, než u kompozitu PET/ABS. Z hlediska elektrické pevnosti se toto navrstvení na sebe zdá jako optimální volba pro tyto materiály. Z hlediska tisknutelnosti lze říct, že je tento materiál hůře tisknutelný pro větší plochy, avšak pro menší ideální. Nevýhodou je časová náročnost, jelikož se struna musí vyměnit manuálně pomocí lidského faktoru, což se odrazí v ekonomické části, která bude probírána dále.

Navrstvené (PET+ABS)			
Excel		Mathematica	
Alfa	Beta	Alfa	Beta
50,8	23,5	51	18,8
S koeficienty			
Alfa	Beta		
50,8	18,9		

Tabulka 7 – Koeficienty pro navrstvený vzorek tzv sandwich (PET+ABS)

V grafu 3 níže je uvedeno grafické vyhodnocení pomocí programu Wolfram Mathematica samotné sandwich struktury. Z něj je patrné, že při namáhání 45 kV/mm je pravděpodobnost průrazu okolo 6 %. Ke 100% pravděpodobnosti průrazu by mělo dojít při elektrické pevnosti okolo 52,5 kV/mm.

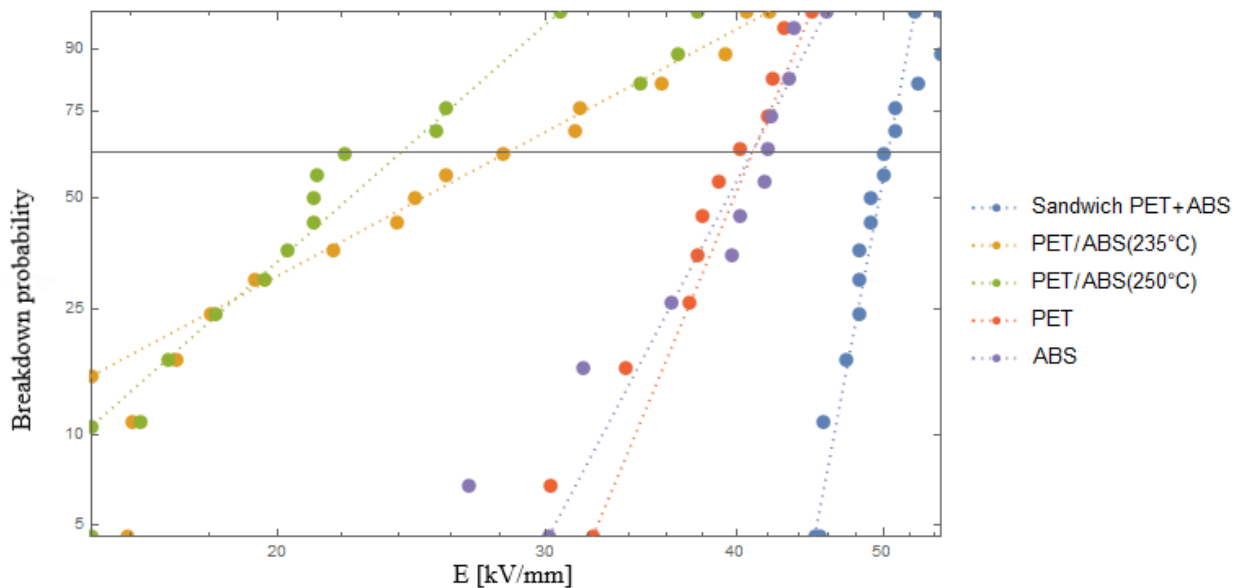


Graf 3 - Grafické zobrazení sandwich struktury

3.3.6 Celkové zhodnocení

Navrstvení dvou materiálů na sebe, konkrétně PET a ABS, se jeví jako nejideálnější varianta v porovnání s doposud testovanými vzorky. Se svou vysokou elektrickou pevností a parametrem β by v budoucnu mohl nalézt velké uplatnění. Lze také počítat s optimalizací pro konkrétní výrobky, která by mohla ušetřit nejen čas, ale také spoustu peněz. Horší tisknutelnost pro větší plochy je však zcela zásadní, a proto by se tato aplikace dala využít pouze pro menší výrobky. Celkově se ale navrstvení jeví mnohem lépe, než smíchání PET s ABS do jedné struny v poměru 2:1. V porovnání má mnohem menší elektrickou pevnost a výrazně horší parametr β ,

díky kterému je méně stabilní a průraz může nastat ve velkém rozmezí. V tomto případě by bylo nejlepší tento kompozit nevyrábět, případně změnit jeho poměr, či přidat další materiál, který by zvýšil elektrickou pevnost, protože má výrazně horší vlastnosti než samostatné materiály.



Graf 4 - Grafické porovnání všech materiálů

V grafu 4 je vyobrazeno porovnání všech doposud zmíněných testovaných materiálů. Lze jasně vidět, že sklon kompozitu PET/ABS je výrazně odlišný od zbylých materiálů. Z toho lze usoudit, že jeho výroba z technického pohledu není příliš vhodná, protože materiál má velký rozptyl pravděpodobnosti průrazu. Oproti klasickým materiálům PET a ABS má testovaný kompozit výrazně nižší koeficienty α a β , hůře se tiskne a korelace pro obě teploty nejsou dostačující. Naopak navrstvený sandwich PET+ABS se jeví výrazně lépe nejen od zmíněného kompozitu, ale také oproti samotným materiálům. Nelze přesněji určit, z jakého důvodu to tak je, jelikož pro přesnější určení by bylo potřeba mnohem více vzorků, vytištěných po různě zvolených vrstvách.

3.4 Měření polykarbonátu

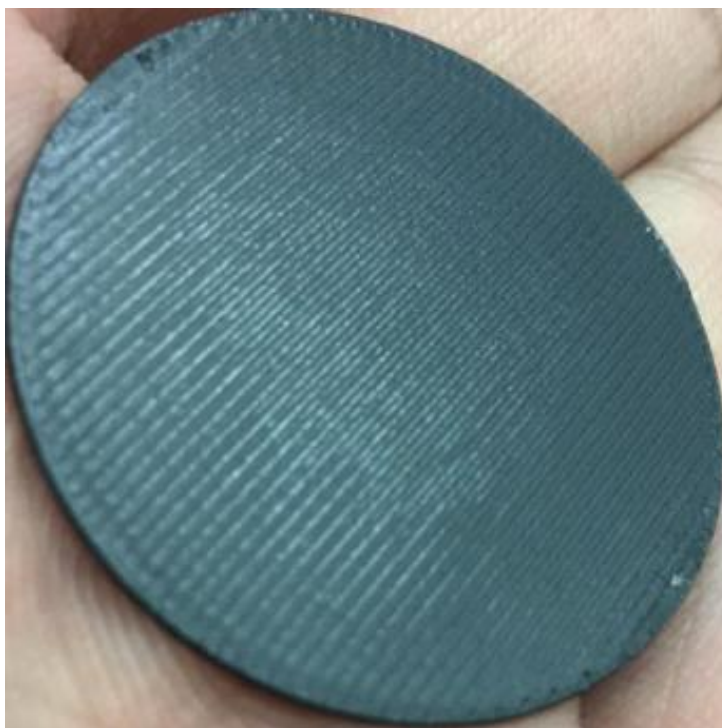
Pro další měření a porovnání byl zvolen klasický polykarbonát (PC) a polykarbonát s 20% příměsí uhlíku. Polykarbonát je velmi odolný proti nárazu, proti vysokým teplotám, velmi tvrdý a houževnatý materiál. Zároveň je dobrý pro tisk prototypů i funkčních věcí a součástí. Oproti tomu, pokud se do tohoto materiálu přidají vodivá uhlíková vlákna, úplně to může změnit celou strukturu materiálu a z perfektního izolantu se může stát vodivý materiál. O měření tohoto materiálu požádal průmyslový partner Prusa Polymers a.s., který materiál poskytl za účelem zjištění elektrické pevnosti. Vyhodnocení proběhne v několika částích, ve kterých se mimo jiné autor zaměří i na tisknutelnost. Tento materiál je doposud neprobádaný, a proto se mohou tiskové teploty měnit od doporučených. V tomto případě se PC tiskl na 270 °C a teplota podložky byla 105 °C. Pro PC s příměsí byla zvolena stejná teplota jako pro PC s jediným rozdílem, že teplota první vrstvy byla 80 °C. Tato teplota byla zvolena díky několika pokusům na menších objektech z důvodu lepší manipulace s již hotovým výrobkem a jejím lepším odstraněním z podložky. Pro přehlednost jsou všechny údaje v tabulce 8.

Materiál	PC	PC + C
Teplota tisku [°C]	270	
Teplota podložky pro 1. vrstvu [°C]	105	80
Teplota podložky [°C]	105	
Výška vrstev [μm]	150	
Výška prototypu [mm]	0,6	

Tabulka 8 – Parametry pro tisk polykarbonátu a polykarbonátu s příměsí

Tisknutelnost klasického PC se nedá považovat za nejlepší, protože výsledné vzorky nebyly detailně uhlazené, čisté a lehce se drolily. Oproti tomu, jak pevný je to materiál, tak pro tisk velmi náročný, jelikož se tento materiál vyznačuje vysokým bodem tání a nutností mít vysokou teplotu podložky. Oproti tomu PC s příměsí se při tisku jevil zcela naopak, uhlazený a čistý tisk bez sebemenších optických vad, ovšem doplněn i úpravou teploty podložky pro první vrstvu. Celkově se materiál s příměsí lépe tiskl oproti klasickému PC a po vizuální stránce byl takřka bez chyb. Jedinou nedokonalostí po dokončení tisku jsou lehce připálená uhlíková vlákna na straně, která ležela na podložce. Jistě se tiskové teploty dají ještě optimalizovat natolik, aby se při příštích pokusech toto nestávalo, ale tato skutečnost je výzvou pro další výzkum.

Požadovaná výška prototypu měla být stejná jako v již zmíněných vyhodnocení, tedy 0,6 mm. S horší tisknutelností je pro klasický PC i horší výška vrstev, která se v průměru pohybovala okolo 0,74 mm a ta se oproti chtěné výšce liší o 23 %, což už je znatelný rozdíl. Naproti tomu u PC s příměsí byla výška 0,59 mm, což je oproti všem zmíněným materiálům nejlepší výsledek, jelikož se odchylka pohybuje kolem necelých 2 %.



Obrázek 11 - Struktura polykarbonátu s příměsí uhlíku

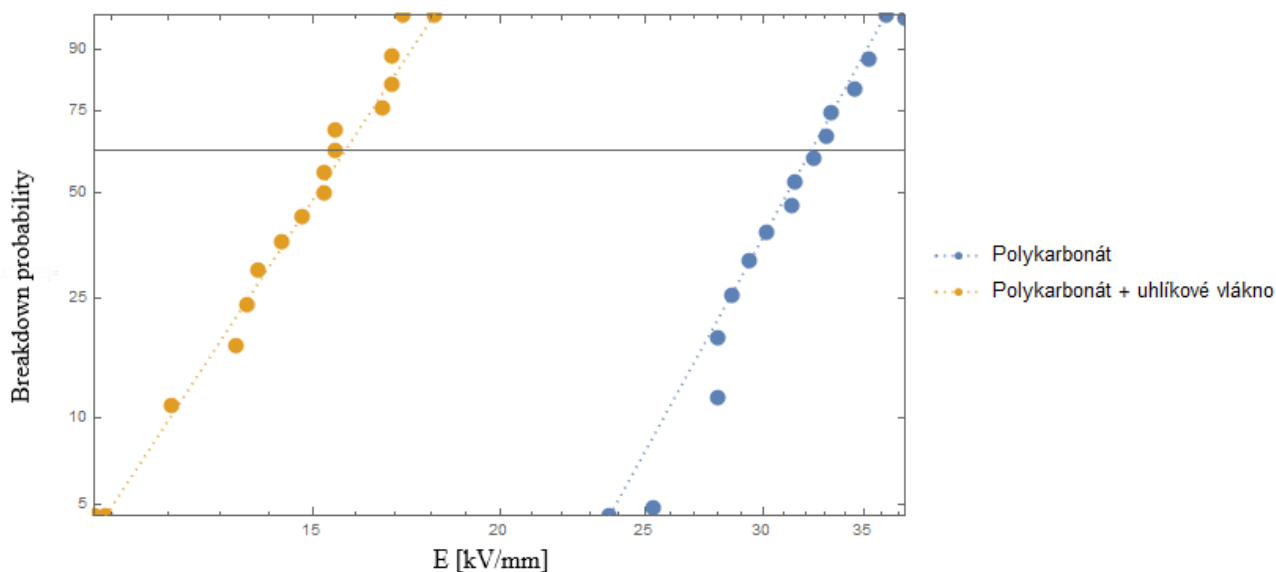
3.4.1 Vyhodnocení elektrických pevností PC

Jak je již popsáno v kapitolách 3.3.1 a 3.3.2, vyhodnocení elektrických pevností proběhlo opět ve dvou programech Microsoft Excel a Wolfram Mathematica. Korelace se pro 15 vzorků pro oba materiály měla pohybovat od 96 % více. Toto nespĺňuje ani klasický polykarbonát, který se ale i přes všechny tiskové nedokonalosti velice přiblížil a jeho korelace je 95 %. Naopak polykarbonát s příměsí uhlíkových vláken má korelaci 98 % a jako jediný materiál z již zmíněných splňuje korelační požadavek.

PC		PC+C	
Excel		Excel	
Alfa	Beta	Alfa	Beta
32,8	12,1	15,6	9,1
S koeficienty		S koeficienty	
Alfa	Beta	Alfa	Beta
32,8	11,3	15,6	9,5
Mathematica		Mathematica	
Alfa	Beta	Alfa	Beta
32,7	10,8	15,6	10,1

Tabulka 9 – Koeficienty pro polykarbonát a polykarbonát s příměsí

V porovnání elektrických pevností je dle očekávání lepší klasický PC, který má α téměř stejnou v obou metodách výpočtu a pouze odchylku v parametru β , která je 11 %. Toto může být způsobeno horší tisknutelností, nedostatečnou korelací a rozdílem ve vyhodnocení jednotlivých programů. Zároveň pokud by výška vrstev pro PC nebyla o tolik vyšší, pravděpodobně by se zvýšila i elektrická pevnost, která by měla přesáhnout pevnost materiálů jako jsou PET a ABS. Naopak PC s příměsí nemá tak velké parametry α a β , ale jeví se více stabilněji, jelikož odchylka β je 4 %. Proto by se PC s příměsí dal v budoucnu využít pro méně náročné izolanty, které nepotřebují až tak velkou elektrickou pevnost, ale vyžadují stálost. Na druhou stranu, pokud se upraví struktura tohoto materiálu natolik, aby byl vodivý, mělo by to v technologickém průmyslu obrovské využití například pro tištění DPS bez nutnosti pájení, jelikož by se na něj potřebné součástky rovnou natiskly.



Graf 5 – Grafické porovnání PC a PC+C

V grafu 5 je jasně patrné, že sklony obou materiálů jsou takřka stejné a že přidáním uhlíkových vláken do polykarbonátu se pouze sníží elektrická pevnost tohoto materiálu.

3.5 Celkové zhodnocení vysokonapětových experimentů

V této práci celkem bylo testováno a porovnáno celkem 6 různých druhů materiálů. Všechny byly hodnoceny jak z pohledu tisknutelnosti a vizuálního hlediska tak především z pohledu elektrických pevností. Vyhodnocení proběhlo ve dvou programech a při vyhodnocení se autor řídil normou IEEE Std 930™-2004: Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Breakdown Data, aby byla zajištěna opakovatelnost a prokazatelnost těchto experimentů. Po samotném měření se nejprve vyhodnotil korelační koeficient, který určoval správnost přizpůsobení (viz 3.1.4). Poté se výpočtem dle Weibullova rozdělení dosáhlo parametrů α a β , kterými se porovnávali jednotlivé elektrické pevnosti v závislosti na pravděpodobnosti průrazu daného materiálu.

	Korelace [%]	Excel		Excel s koeficienty		Mathematica	
		Alfa	Beta	Alfa	Beta	Alfa	Beta
PET/ABS 235 °C/80 °C	95	28,6	4	28,8	3,1	28,9	3,5
PET/ABS 250 °C/80 °C	91	25,5	4,6	25,5	3,4	26,1	3,5
PET	98*	40,2	10,9	40,2	11,8	40	13,2
ABS	95*	41,3	7,7	41,3	10,2	40,8	11
Navrstvené PET+ABS	92	50,8	23,5	50,8	18,9	51	18,8
Polykarbonát	95	32,8	12,1	32,8	11,3	32,7	10,8
Polykarbonát s příměsí	98	15,6	9,1	15,6	9,5	15,6	10,1

* Korelace pro 10 vzorků – 92 % a více

Tabulka 10 – Výsledná tabulka porovnání parametrů α a β

V tabulce 10 jsou přehledně zobrazeny všechny testované materiály. Korelace se pro všechny materiály měla pohybovat od 96 % s výjimkou materiálů PET a ABS, pro které měla být 92 % a více z důvodu menšího počtu vzorků. Nejlépe se z tohoto hlediska jeví polykarbonát s příměsí uhlíkových vláken, které splňuje podmínku. Dále těsně pod hranicí jsou materiály PET/ABS (235 °C) a polykarbonát. Naopak v tomto ohledu nevyhovují materiály PET/ABS (250 °C) a navrstvené PET+ABS. Pro další měření s těmito materiály by bylo jistě vhodné použít více výtisků, jelikož pro menší počet je nutné je upravit váhovacími faktory. Dále se pokusit o výtisk vzorků všech stejně vysokých jen s minimální odchylkou. Odchylka se při tisku pohybuje v řádu jednotek až desítek %, v závislosti na materiálu a počtu vrstev. To může mít v praxi vliv na větší spotřebu materiálů a časovou náročnost při tisku, a tudíž i větší zmetkovitost.

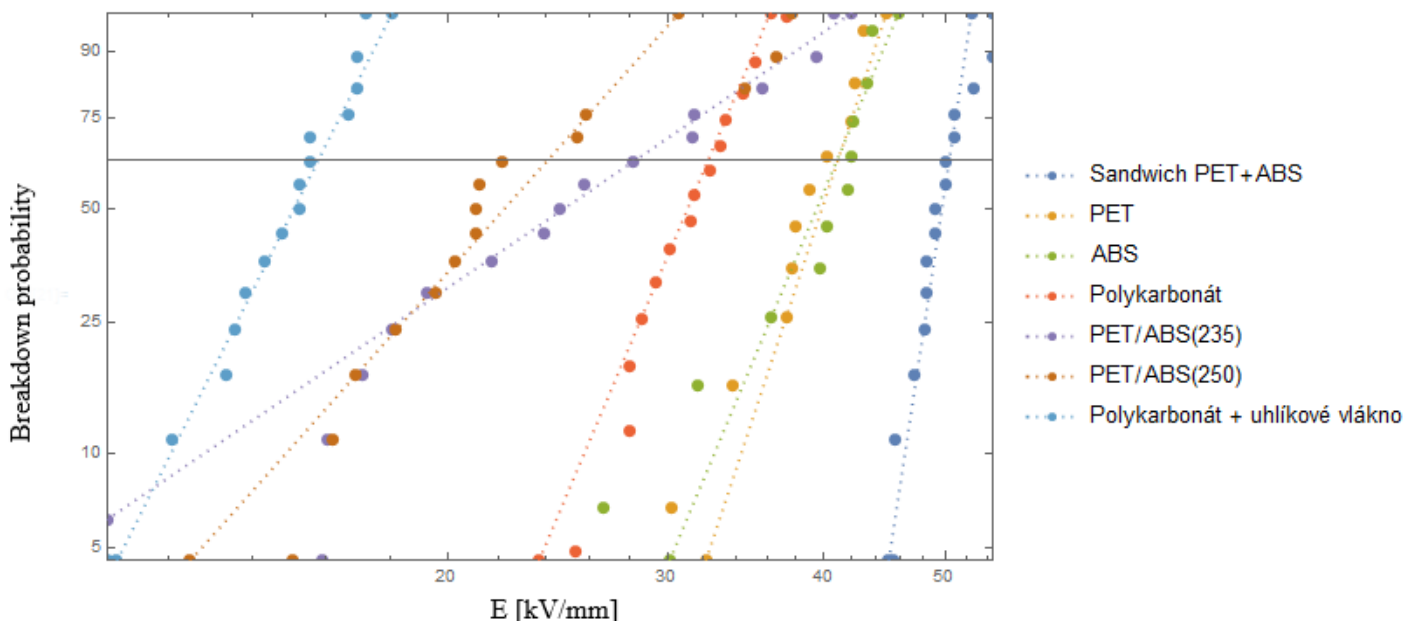
Dále se hodnotily materiály dle parametrů, které se získaly z Weibullova rozdělení. V obou programech, a zároveň oba parametry vycházejí nejlépe pro navrstvený PET+ABS. Nelze přesněji určit z jakého důvodu jsou oba parametry větší než pro samotné materiály PET a ABS, jelikož tento fakt by potřeboval mnohem detailnější výzkum, ale pokud by bylo možno při bližším zkoumání toto potvrdit, mělo by to velký význam pro budoucí vývoj materiálů v tomto odvětví. Jako další jsou materiály samotné materiály PET a ABS. Poté se velmi dobře jeví i polykarbonát, který i přes nedokonalou tisknutelnost, vyšší vzorky a nedostatečnou korelaci má poměrně vysoké oba parametry. Pravděpodobně by se při požadované 0,6 mm výšce zvedl

parametr α a převyšil PET i ABS. Z důvodu coronavirusové krize ale přetisk a kontrolní přeměření nebylo možné.

Ze zbývajících materiálů se nejlépe jevil kompozit PET/ABS. Přestože jeho parametr α je vyšší než u polykarbonátu s příměsí, tak jeho sklon díky parametru β je příliš velký, a tudíž je tento materiál méně stabilní. I přes tento fakt je jeho elektrická pevnost vyšší, a tudíž se řadí před polykarbonát s příměsí, což bylo již před měřením predikovatelné, jelikož se do polymeru přidává vodivý prvek. Zároveň si lze všimnout, že na elektrickou pevnost má vliv i teplota tisku. Při vyšší teplotě je nejmenší korelační koeficient a také nejmenší parametr α , při zanedbání polykarbonátu s příměsí. Z technologického hlediska je tedy výroba tohoto materiálu poněkud zbytečná, jelikož oproti klasickým materiálům, či navrstveným na sebe má velmi špatné vlastnosti. Zda je tomu tak i z ekonomického hlediska bude autor řešit v ekonomické části této práce.

Nejhůře se ze všech materiálů jeví polykarbonát s příměsí, a to z důvodu přidání uhlíku do polymeru. Kvůli jeho nízkému parametru α lze říct, že má nejmenší elektrickou pevnost. Dále jako jediný z materiálů splňuje korelační podmínku a jeho tisknutelnost lze zařadit k těm lepším. Nevýhodou však zůstává nízká elektrická pevnost, ale jak bylo již zmíněno výše, izolační vlastnosti tohoto materiálu by do budoucna neměly být tím zásadním parametrem, na který by se mělo nahlížet.

V grafu 6 jsou zobrazeny průběhy všech porovnávaných materiálů vyhodnocených v programu Wolfram Mathematica. Z tohoto pohledu je lépe vidět stabilitu jednotlivých materiálů, což znamená že čím menší je sklon dané přímky, tím větší je parametr β , tím více stabilní ten materiál je. V praxi to poté znamená určení do jak velkého napětí lze materiál zatížit, než dojde k průrazu. Lze vidět, že skoro všechny materiály mají podobný sklon, kromě kompozitu PET/ABS.



Graf 6 – Grafické znázornění všech porovnávaných materiálů

Z technického hlediska se tedy nejlépe jeví sandwich struktura PET a ABS, jelikož má vysokou elektrickou pevnost a nejmenší sklon. Dále se nejlépe jeví samostatné materiály ABS

a PET, které mají také poměrně vysokou elektrickou pevnost a o něco větší sklon. Z tohoto hlediska lze zvážit navrstvený tisk, oproti kompozitním materiálům, jelikož smíchání materiálů do jedné struny výrazně sníží elektrickou pevnost. Poslední materiál, o kterém lze uvažovat pro použití z technického hlediska, s dobrou elektrickou pevností je polykarbonát. Ostatní materiály není vhodné použít z důvodu jejich nízké elektrické pevnosti a nestability.

3.6 Sledování vlivu výplně výtisku na elektrickou pevnost

Po vysokonapěťových experimentech se autor ještě zaměřil na vliv hodnoty výplně výtisku v závislosti na elektrické pevnosti. Toto vyhodnocení bylo změřeno pouze pro malý počet vzorků z důvodu časové náročnosti. Jde spíše o hrubý odhad, neboť pro přesné určení by bylo potřeba mnohem více vzorků a podrobnější měření, které ale není součástí této práce. Výška vzorků byla zvolena 1,2 mm s 2 horními a spodními plnými vrstvami.

PET			
U [kV]	d [mm]	E[kV/mm]	Výplň [%]
28	1,25	22,40	20
25	1,27	19,69	20
30	1,21	24,79	50
26,5	1,19	22,27	50
30	1,21	24,79	75
27,5	1,2	22,92	75

Tabulka 11 - Sledování vlivu výplně výtisku na elektrickou pevnost pro materiál PET

V tabulce 11 jsou všechny naměřené parametry pro materiál PET. Lze si všimnout, že při zvolené výplni se nijak extra pro tento materiál nemění jeho elektrická pevnost. Zároveň pro 6 výtisků se přesná výška vzorků rovná zvolené pouze v jednom případě. Celkově se zdá, že by pro tento materiál neměla mít hodnota výplně větší vliv na velikost elektrické pevnosti.

ABS			
U [kV]	d [mm]	E[kV/mm]	Výplň [%]
23	1,23	18,70	20
24	1,25	19,20	20
31,5	1,26	25,00	50
30	1,26	23,81	50
34	1,29	26,36	75
35	1,29	27,13	75

Tabulka 12 - Sledování vlivu výplně výtisku na elektrickou pevnost pro materiál ABS

V další tabulce jsou všechny naměřené parametry pro materiál ABS. Pro tento materiál je již patrná lehká změna v elektrické pevnosti pro různou hodnotu výplně. Nejlépe se v tomto ohledu jeví nejvyšší zvolená výplň 75 %. Zároveň se výška vzorku pro 6 výtisků nerovná požadované. Možná by se při bližším zkoumání našla optimální hodnota výplně, při které by byla elektrická pevnost nejvyšší, ale tato skutečnost nebude dále zkoumána v této práci.

PET/ABS			
U [kV]	d [mm]	E[kV/mm]	Výplň [%]
18	1,18	15,25	20
19	1,19	15,97	20
30	1,18	25,42	50
27	1,21	22,31	50
27	1,2	22,50	75
27	1,18	22,88	75

Tabulka 13 - Sledování vlivu výplně výtisku na elektrickou pevnost pro kompozitní materiál PET/ABS

Jako poslední pro sledování vlivu byl zvolen kompozitní materiál PET/ABS. Z tabulky 13 je patrné, že největší elektrickou pevnost by neměl mít materiál při vyšší výplni. Pro 50% výplň je elektrická pevnost podobná jako pro 75% s tím, že v jednom případě je dokonce větší. Pokud by se tento fakt potvrdil, mohlo by se ušetřit na materiálu při tisku. Zároveň je pro tento materiál nejlepší výška vzorků, i když ani jeden nemá požadované parametry, tak je odchylka změřené výšky od skutečné přijatelná.

Celkově lze usoudit, že vliv hodnoty výplně může mít vliv na elektrickou pevnost. Pokud by se našla ideální hodnota výplně pro různé materiály, mohlo by to mít vliv zmenšení nákladů na materiál a tím i celkovou úsporu za kus výtisku. U materiálu PET to vypadá, že zde hodnota výplně nehraje takovou roli jako u ABS a PET/ABS, jelikož je elektrická pevnost velmi podobná. U ostatních materiálů je již vidět menší změna elektrických pevností.

4 Ekonomické zhodnocení kompozitních strun pro 3D tisk

Další část této práce bude zaměřena na ekonomické zhodnocení již výše zmíněných materiálů v závislosti na jejich elektrické pevnosti. Nejen technické parametry hrají zásadní roli v rozhodování, který materiál si jedinec či firma zvolí. Důležitým faktorem jsou investice do stroje, doba životnosti stroje, údržba stroje, cena materiálů, mzdy zaměstnancům, energetická náročnost stroje a v prvotní řadě hlavně zisk.

V případě tisku u jednice, kdy může být 3D tisk chápán jako volnočasová aktivita, je tato skutečnost důležitá z důvodu rozhodování, zda je ekonomicky výhodnější si jakýkoliv potřebný konstrukční prvek pro elektrotechnický výrobek vytisknout na 3D tiskárně, nebo je výhodnější jej koupit v obchodě. Pro případ firmy je důležitý podnikatelský plán, který se vypracovává ještě před započítáním podnikání. Ten se vytváří z důvodu predikce, zda má význam v tomto odvětví začít podnikat či nikoliv. Pro tento plán se používají ekonomická kritéria, která budou popsána dále. Dále pak bude pro všechny materiály provedena citlivostní analýza pro změny ceny mezd, ceny materiálů a změny diskontu. Tím se docílí předpokladu budoucích změn cen a opportunity cost.

V ekonomické části budou porovnávány ceny jednotlivých materiálů oproti jednomu konkrétnímu výrobku s ohledem na elektrickou pevnost. Tento výrobek bude již mít pevně dané parametry a bude vybrán z materiálu, který byl testován v technické části, tak aby se dal podle předem stanovených parametrů upravit a porovnat jeho konvenční cena oproti nákladům na tisk.

Autor v této části zanedbá potřebu snižovat tloušťku stěn k docílení potřebné elektrické pevnosti, jelikož je pro tuto skutečnost potřeba podrobnějších měření. Je to z důvodu, že tlustší materiál hůře odvádí teplo, a tím je poté zapříčiněn tepelný průraz. Z naměřených dat budou ceny pro jednotlivou pevnost počítány násobením dané elektrické pevnosti, což znamená, že pro elektrickou pevnost 30 kV/mm bude počítána pro 2 mm tlustou stěnu elektrická pevnost 60 kV/mm. Toto zanedbání je zvoleno z důvodu nemožnosti bližšího zkoumání v době koronaviru, neboť by bylo potřeba modely vytisknout a otestovat jejich elektrickou pevnost, což v této době nebylo možné. Proto bylo zvoleno násobení elektrické pevnosti a tloušťky z důvodu nedostatku dat.

Příkladem může být malá firma, která chce začít s výrobou elektrotechnických součástí s předem zvolenou elektrickou pevností tak, aby výrobky byly odolné, kvalitní, a cenově konkurenceschopné na trhu. Zároveň musí splňovat kritérium elektrické pevnosti, které autor po konzultaci s vedoucím práce zvolil 75 kV/mm. K tomu je nutné vypracovat kalkulaci nákladů na jeden kus při různě zvolené tloušťce stěn. V praxi se elektrická pevnost volí oproti požadované o několik % více, a proto tloušťka stěn pro vybraný materiál bude počítána pro 90 kV/mm. Pro kalkulaci nákladů autor zvolil 3D tisk jako doplňkovou aktivitu v podnikání.

Všechny ceny pro 3D tisk uvedené níže budou ceny pro koncového uživatele, z důvodu toho, že nelze získat přesná data od výrobce, který má přesnou kalkulaci na výrobek i s přidanou marží. Nelze vyčíslit konkrétní náklady na výrobu spojeny s náročností výroby a počtu vyrobených kusů. Lze tak pouze použít poskytnutá data, případně dohledaná na e-shopu. [29]

V závěru poté proběhne ekonomické zhodnocení kompozitních materiálů s ohledem na elektrickou pevnost oproti klasickým materiálům. Po seznámení v předchozích kapitolách s metodou tisku, materiály i samotným testováním elektrických pevností zbývá rozhodnout, zda pro určenou elektrickou pevnost je či není ekonomicky vhodné použití kompozitních strun oproti klasickým materiálům, případně navrstveným klasickým materiálům.

4.1 Náklady

Náklady jsou nedílnou součástí pro započítání podnikání. Je nutné označit všechny přímé i nepřímé náklady pro realizaci. Obecně náklad vyjadřuje všechny vstupy výroby, které jsou důležité pro rozhodování firmy o optimálním objemu výroby vedoucímu k maximálnímu zisku. Dělí se podle různých hledisek. Pro tuto práci je důležité dělení na investiční náklady, což je při pořízení dlouhodobého hmotného majetku a neinvestiční náklady neboli provozní, které jsou například náklady na mzdy, náklady na materiál, náklady na údržbu a náklady na energii. [30]

4.1.1 Investiční náklady

Jak již bylo zmíněno výše, investiční náklady jsou náklady na pořízení dlouhodobého hmotného majetku. Jedná se například o stroje, které jsou nedílnou součástí podnikání. Investicí lze chápat vynaložení omezených zdrojů za účelem zisku. Důležitým rozdílem investičních nákladů od těch neinvestičních je to, že náklady uvedené jako investiční, se amortizují postupně po dobu několika let své životnosti. Oproti tomu neinvestiční se promítají do nákladů najednou. Investice se v době pořízení jeví jako výdaj, do nákladů poté přichází ve formě odpisů. Amortizace neboli odpis vyjadřuje peněžní částku opotřebením majetku za určité období. Lze odepisovat dlouhodobý majetek do výše jeho vstupní ceny, a to buď rovnoměrně či zrychleně po dobu jeho životnosti.

Jelikož je zvolen 3D tisk jako doplňková aktivita k podnikání, lze zanedbat část investičních nákladů nutných pro započítání podnikání. Tyto náklady jsou například investice pro vytvoření zázemí, investice na vývoj, distribuci, propagaci výrobků a další. Toto zanedbání se ale nijak nepromítne do výsledných kalkulací, jelikož jak již bylo zmíněno, jedná se doplňkovou aktivitu k podnikání, která svojí náročností nijak nezasahuje do prvotní části podniku.

Jelikož je u investic nutné se vyrovnat s časovým faktorem, je nutné zahrnout i časovou hodnotu peněz. Toto se používá z důvodu, aby se již před započítáním projektu dalo stanovit, zda je vhodné do něj vložit peníze, či případně zvolit jiný projekt. Pro výpočet těchto investic bude nutno znát dobu životnosti investice a také diskontní míru, která je popsána dále. Dále pochopit metody hodnocení investic, jelikož ne všechny mohou být vhodné. Tyto metody jsou popsány v kapitole 4.1.2. Autor se rozhodl pro své kalkulace použít především metodu čisté současné hodnoty (NPV) a roční ekvivalentní peněžní tok (RCF).

4.1.2 Kritéria ekonomické efektivity

Jelikož hodnota peněz je rozdílná dnes a zítra, je žádoucí tyto omezené zdroje nějakým způsobem investovat za účelem získání budoucích užitek, tedy zisku těchto prostředků. Tomuto pojmu se také přezdívá časová hodnota peněz, která porovnává dvě či více investic v různých časových periodách. Díky tomu lze alespoň teoreticky predikovat, jestli bude investice výnosná či nikoliv, jelikož v praxi tomu poté může být jinak. Pro zjištění ekonomické efektivity je mnoho různých metod, které budou popsány dále.

Pro tyto investice bude potřeba znát tzv. diskontní míru, což je procentuální sazba, kterou se přepočítávají budoucí požadované výnosy. Tato míra vychází z pojmu opportunity cost neboli náklady obětované příležitosti, která vyjadřuje cenu ušlé nebo nevyužití příležitosti, ale také riziko. Tato sazba se může měnit v průběhu investice. [30] [31]

NPV

Čistá současná hodnota (NPV) je finanční veličina, která přepočítává finanční tokové veličiny jako jsou náklady, tržby nebo zisky v časovém období ke zvolenému okamžiku. Jednoduše řečeno jde o součet současných hodnot budoucích hotovostních toků investice včetně investované částky. [30] Pro hodnocení je nutno znát, nebo zvolit již zmíněnou diskontní sazbu. Je dána vztahem (11): [32]

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t(1+r)^{-t} \quad (11)$$

CF_t – tok hotovosti v čase t

r – diskontní sazba

t – životnost investice

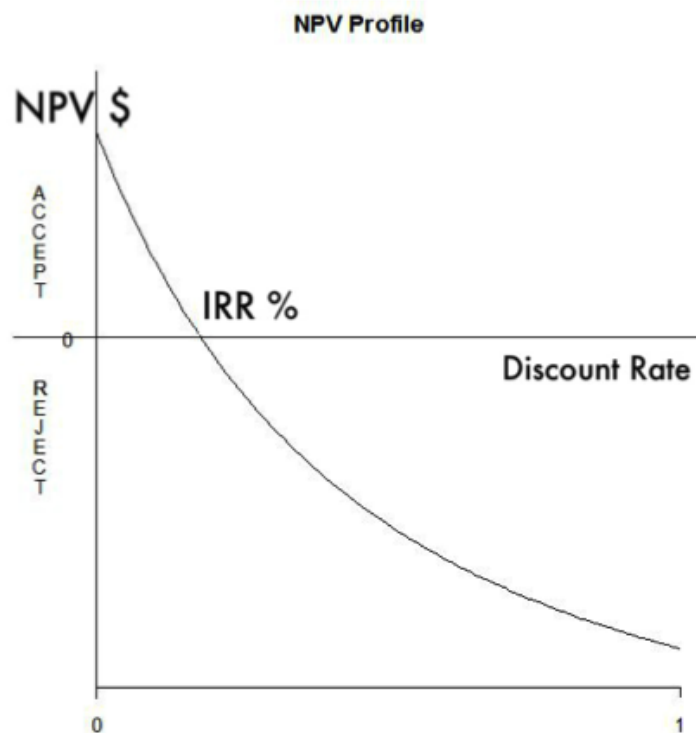
IRR

Vnitřní výnosové procento (IRR) ukazuje, kdy je čistá současná hodnota nulová. Tyto dva ukazatele jsou spolu úzce spjaté, tak jak je vidět na obr. č. 1 (viz dále). Obecně u IRR platí, že realizujeme investici, je-li IRR větší než diskontní sazba. Někdy není možné IRR přesně určit nebo je hodnot více. [32] Je dána vztahem (12):

$$\sum_{t=0}^T CF_t(1+IRR)^{-t} = 0 \quad (12)$$

CF_t – tok hotovosti v čase t

t – životnost investice



Obrázek 12 - Graf závislosti NPV a IRR (popř. r) [34]

RCF

Roční ekvivalentní peněžní tok (RCF) se používá pro porovnání variant s totožným rokem počáteční investice, ale rozdílnou dobou životnosti. Používá se k tomu tzv anuitní faktor, kterým dojde k rovnoměrnému rozdělení diskontovaných peněžních toků do jednotlivých let po celou dobu životnosti. [30] [32] Anuitní faktor je dán vztahem (13):

$$a_{t\dot{z}} = \frac{r \times (1 + r)^t}{(1 + r)^t - 1} \quad (13)$$

r – diskontní sazba

t – životnost investice

A poté RCF je dán vztahem (14):

$$RCF = a_{t\dot{z}} \times NPV \quad (14)$$

NPV – čistá současná hodnota

$a_{t\dot{z}}$ – anuitní faktor

PP

Doba splacení (PP) neboli doba, za jak dlouho navrátí tok příjmů původní investici. Tento ukazatel může, ale také nemusí být diskontovaný a je dán vztahem (15): [32]

$$PP = \frac{\text{náklady na investici}}{CF} \quad (15)$$

Zisk

Náklad neboli vyjádření všech vstupů výroby. Je obvykle spojen s výdajem peněz, ale existují též výjimky. Lze je rozdělit na fixní (stále) a variabilní (proměnné). Fixní jsou náklady, které se nemění s objemem výroby a musí se vynaložit i pokud je výroba pozastavena. Jedná se například o platy, nájem, pojištění a odpisy. Též se nazývají utopené náklady. Variabilní náklady jsou závislé na objemu výroby, se kterým se také mění. Například materiál, náklady na dopravu a částečně energie. Výnosy neboli výdělek činnosti podniku, též známý jako tržby. Výnos se stane příjmem až poté, kdy odběratelé uhradí své závazky vůči podniku. [32] [33]

Rozdílem mezi náklady a výnosy je zisk. Je to jeden z nejdůležitějších cílů podnikání a investic. Jedná se o stav, kdy celková hodnota hrubého příjmu je větší než nákladů, opakem tohoto je poté ztráta. Zisk je ukazatelem úspěšnosti hospodářského výsledku firmy a lze jej dosáhnout snížením nákladů nebo zvýšením výnosů. [32] [33]

4.1.3 Investiční náklady na 3D tiskárnu

Jako hlavní investiční faktor v této práci je investice do stroje, tudíž do 3D tiskárny. Tiskárna byla zvolena značky Original Prusa i3 MK3S. Tato tiskárna se prodává ve dvou variantách, buď jako již kompletně sestavená a zkalibrována nebo ve formě stavebnice, kterou si musí kupující sám sestavit. Výsledná cena za kus bude počítána pro obě varianty.

Tiskárna	Investice	Životnost	Anuita	RCF
Original Prusa i3 MK3S – sestavená	26990 Kč	8 let	0,167	4520 Kč
Original Prusa i3 MK3S – stavebnice	19990 Kč	8 let	0,167	3348 Kč

Tabulka 14 - Investiční náklady na 3D tiskárnu

Pro kalkulaci investice na tiskárnu byl použit roční ekvivalentní peněžní tok z důvodu rovnoměrného rozložení diskontovaných peněžních toků do jednotlivých let po celou dobu životnosti. Diskontní míra byla zvolena 7% a životnost tiskárny byla zvolena na 8 let, neboť nebylo možno přesněji dohledat životnost danou výrobcem. Jelikož je ale mnoho součástí na internetu open source a tiskárna je vyrobena pro projekt RepRap (viz 1.3), je odhadovaná životnost právě zmíněných 8 let. Tato životnost se ale může během podnikání změnit v závislosti na použití a opotřebení 3D tiskárny.

4.1.4 Neinvestiční náklady

Neinvestiční náklady neboli také provozní náklady jsou náklady spojeny přímo s výrobou. Lze tyto provozní náklady rozdělit do vícero podskupin pro jejich lepší přehlednost. Jedná se o náklady na údržbu, materiál, mzdy a energie. Hodnoty pro provozní náklady na údržbu byly převzaty z jiné akademické práce [35], jelikož z důvodu koronaviru nebylo možno konat exkurzi k výrobci Průša s.r.o. a tyto hodnoty nelze přesněji dohledat pomocí internetu. Hodnoty z převzaté práce jsou sděleny přímo od výrobce.

4.1.5 Náklady na údržbu tiskárny

Náklady na údržbu tiskárny vznikají opotřebením částí tiskárny, které je pro její plynulý chod nutno měnit. Tyto hodnoty jsou inspirovány jinou akademickou prací [35], ve které jsou sděleny přímo od výrobce. Jelikož se ale ceny každý rok mění, dohledal autor aktuální ceny a lehce snížil hodnotu pro nutnost výměny jednotlivých položek.

Položka	Nutnost provedení	Cena
Trubička-hot end	po 700 tiskových hodinách	130 Kč
E3D V6 tryska	po 700 tiskových hodinách	239 Kč
Podložka	po 1200 tiskových hodinách	390 Kč
Sada krokových motorků	po 1700 tiskových hodinách	4 300 Kč

Tabulka 15 - Náklady na údržbu tiskárny [35]

Tyto hodnoty jsou získány z dlouhodobých statistik výrobce, které jsou získávány po dobu několika let z tiskových farem, ale byly autorem upraveny z důvodu pesimističtějšího pohledu na častější údržbu a změnou cen v posledních letech. Trubička a tryska jsou součástmi tiskové hlavy, která je jednou z nejvíce namáhanou částí tiskárny. Proto je tedy nutné je obměňovat již po 700 tiskových hodinách. Důležité je pro různé materiály používat doporučené trysky, jelikož při hrubším materiálu může dojít k poškození trysky a tím i k častějšímu opotřebení. Podložka je druhou nejvíce namáhanou částí. Neopatrným zacházením při sundávání vytištěného materiálu se může časem poškodit, a to může mít vliv na zhoršení tiskových vlastností. Dále sada krokových motorků, která se neřadí k běžně vyměňovaným částem, jelikož zde nedochází k tak velkému opotřebení. Může dojít pouze ke zhoršení jejich vlastností, které by mohli mít vliv na kvalitu tisku.

4.1.6 Náklady na materiál

Další nedílnou součástí pro provozní náklady jsou náklady na materiál. Materiály se prodávají ve formě navinutých cívek s různou hmotností. Lze snadno zjistit kolik gramů materiálu bylo spotřebováno na tisk díky programu Prusa Slicer, který při slicování zobrazí i dobu tisku a spotřebu materiálu. Díky známé celkové ceně a hmotnosti jednotlivých strun lze poté snadno zjistit cenu za spotřebovaný materiál.

Informace o slicování	
Použito Filamentu (m)	1.19
Použito Filamentu (mm ³)	2862.41
Použito Filamentu (g)	3.64
Náklady	0.09
Odhadovaný čas tisku:	
- normální režim	23m
- tichý režim	23m

Obrázek 13 - Ilustrační obrázek z Prusa Sliceru s informacemi o tisku

Pro lepší přehled jsou v další tabulce zobrazeny všechny testované materiály s jejich hmotností a nákupní cenou, případně s cenou za 1 g, který bude nedílnou součástí dalších výpočtu testovaných vzorků. Ceny jsou zjištěny ze srpna 2020 z Průša e-shopu. [29]

Materiál	Hmotnost	Cena	Cena za 1 g
PET	1 kg	699 Kč	0,7 Kč
ABS	1 kg	599 Kč	0,6 Kč
PET/ABS	1 kg	749 Kč	0,75 Kč
Polykarbonát	750 g	990 Kč	1,32 Kč
Polykarbonát s příměsí uhlíku	750 g	1 299 Kč	1,73 Kč

Tabulka 16 - Ceny jednotlivých použitých materiálů [29]

4.1.7 Náklady na mzdy

Náklady na mzdy jsou jedním z nejhůře nacenitelných nákladů, jelikož záleží na tom, zda je tisk jako volnočasová aktivita či náplň práce. Pro volnočasovou aktivitu jen těžko hledat příslušnou odměnu, jelikož se odvíjí hlavně od opportunity cost. Pro náplň práce lze zvolit jednu z tabulkových zaručených mezd. Ta určuje nejnižší mzdu za práci s ohledem na složitost vykonané práce s předpokladem, že se jedná o práci na plný úvazek. [36] Tato mzda nesmí být nižší, než je minimální mzda, která je v ČR v roce 2020 stanovena na 87,3 Kč/hod brutto.

S ohledem na odpovědnost autor řadí tuto práci do skupiny 7. (viz tab. 17), která je určena například pro IT experty, programátory vývojáře, učitele na vysoké škole či finanční experty. V této skupině je hodinová mzda stanovena na 158,1 Kč, a tudíž měsíční je 26500 Kč brutto. Nicméně tato práce nevyžaduje denně tak velké pracovní vytížení, a tudíž se zde autor bude zabývat pouze hodinovou mzdou. Je to z důvodu, že časová náročnost pro tisk je vyšší než manipulace pracovníka s 3D tiskárnou, jedná se spíše o započítání tisku a následnou kontrolu tisku a výrobku. Tato hodinová mzda bude ještě znásobena daní, kterou musí zaměstnavatel za zaměstnance zaplatit. Tudíž je výsledný náklad na mzdu roven 205,5 Kč. Je počítáno s tím, že pracovník, který se stará o 3D tisk pracuje 1-2 hodiny za den v závislosti na náročnosti, době tisku a typu materiálu (viz dále).

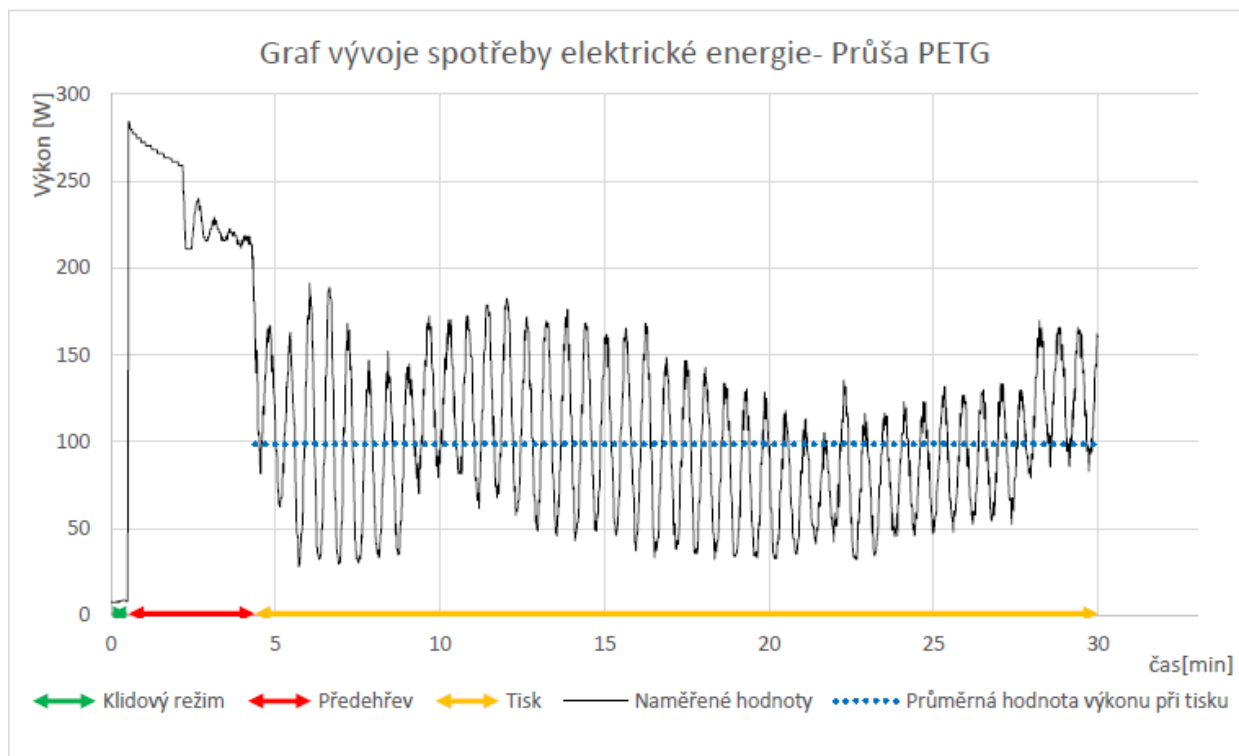
Skupina prací	Kč/měsíc	Kč/hodina
1.	14600	87,3
2.	16100	96,3
3.	17800	106,4
4.	19600	117,4
5.	21700	129,7
6.	24000	143,2
7.	26500	158,1
8.	29200	174,6

Tabulka 17 - Zaručená mzda dle rozřazení práce do skupin [36]

4.1.8 Náklady na energii

Náklady na elektrickou energii jsou výrazně ovlivněny vybraným tiskovým materiálem, jelikož pro pevnější materiály je potřeba větší teplota trysky a podložky. To způsobí, že 3D tiskárna musí vyvinout větší výkon na ohřev obou již zmíněných. Největší výkon se vyvíjí při přehřevu trysky a podložky, kdy skokově narůstá. Poté výkon klesá a tiskárna pracuje ve tzv. přechodovém stavu. To znamená, že se výkon snižuje a při poklesu teploty o 1-2 °C od požadované se opět zahřeje. Tento stav pokračuje až do dokončení tisku (viz obr. 14)

Z důvodu časové náročnosti a období koronaviru nebylo možné provést měření spotřeby elektrické energie pro tisk všech testovaných materiálů, a proto je výsledná cena za kWh převzata z jiné akademické práce [35]. Pro výsledný náklad na energii bude odchylka v řádu pár korun, kterou autor zanedbá. Výsledná cena elektrické energie je tedy rovna 5,6 Kč/kWh.



Obrázek 14 - Vývoj spotřeby elektrické energie pro materiál PETG [35]

4.2 Kalkulace nákladů pro zvolený výrobek

Jak již bylo zmíněno v úvodu ekonomické části, pro první zhodnocení bude zvolena konstrukční součástka pro elektrotechnický výrobek, jež musí splňovat určitou elektrickou pevnost, která byla stanovena na 75 kV/mm. To znamená, že každý materiál bude mít jinou tloušťku stěn v závislosti na měření elektrické pevnosti měřené ve vysokonapěťové části. Vybraná součástka bude krabička, která bude vymodelována pro všechny již dříve zmíněné materiály. Tato krabička bude vymodelována s výplní 100%, jelikož jak je zmíněno výše, nelze přesněji určit ideální hodnotu výplně pro jednotlivé materiály, k tomu je potřeba detailnějších zkoumání. Pro elektrickou pevnost byl vybrán parametr Alfa, který byl měřen v programu Wolfram Mathematica, a to z důvodu odchylek pro program Microsoft Excel a lepší korektnost. V praxi se ale nepoužívají součástky, pro které by byla jejich elektrická pevnost stanovena, nýbrž je daleko větší, aby právě tuto stanovenou vydržela pro 100 % případů. Proto se tloušťky stěn přepočítávají pro 90 kV/mm, tím by mělo být zaručeno, že se dosáhne požadovaných parametrů.

Pro porovnání byla také zvolena univerzální krabička volně k dostání s označením 1591ATRD HAMMOND z polykarbonátu s rozměry X: 50mm, Y: 100mm, Z: 21mm a tloušťkou stěn 2 mm. [37] Tato krabička je určena pro připevnění plošného spoje na vodící lišty a je rozdělena na spodek krabičky a víčko. Hmotnost této krabičky je 51,4 g brutto a její cen se odvíjí od počtu kupovaných kusů (viz tab. 18).

Množství [ks]	Cena s DPH [Kč]
1+	152,02
10+	136,83
50+	121,62

Tabulka 18 - Ceny za krabičku pro různá množství [37]



Obrázek 15 - Univerzální krabička 1591ATRD HAMMOND [37]

4.2.1 Parametry pro tisk krabiček

Nejprve je potřeba zjistit parametry pro tisk všech krabiček pro různé materiály, konkrétně tloušťku stěny. Toho se dosáhne tak, že se nejprve vypočítá tloušťka stěn pro každou krabičku zvlášť. Poté se každá krabička vymodeluje a v programu Prusa Slicer se zjistí využitý materiál a doba tisku. Dále je možné určit, kolik krabiček se bude vyrábět s ohledem na pracovní plochu. Jelikož je pracovní plocha omezena, lze vyrábět pouze 1-4 krabičky. Neboť jsou ale rozdíly při pouhém znásobení materiálu a času oproti vymodelovaným v řádu jednotek minut a desetin až setin gramů, rozhodl se autor tuto skutečnost zanedbat a pro více kusů používat pouhé znásobení všech veličin.

	požadovaná ele. pevnost	zvolená ele. pevnost
	75 kV/mm	90 kV/mm
Materiál	Elektrická pevnost [kV/mm]	Tloušťka stěny [mm]
PET	40	2,25
ABS	40,8	2,21
PET/ABS 235 °C	28,9	3,11
PET/ABS 250 °C	26,1	3,45
PET+ABS	51	1,76
PC	32,7	2,75
PC+C	15,6	5,77

Tabulka 19 - Dopočítané parametry pro tisk

Ve výše uvedené tabulce jsou přehledně seřazeny všechny testované materiály, pro které se bude zjišťovat výsledná cena za kus. Je zde také elektrická pevnost, která byla zjištěna v technické části práce a tloušťka stěn pro zvolenou elektrickou pevnost.

Z důvodu sandwich metody pro PET+ABS se autor rozhodl pro tisk zvlášť spodních a vrchních částí krabiček. Pokud by se tiskla celá krabička, což znamená vršek i spodek, byl by to u tohoto materiálu problém z důvodu častějšího měnění strun u 3D tiskárny. Tím, že se

tisknou spodní a vrchní díly zvlášť, se zajistí plynulejší chod tisku a bude pro všechny materiály stejný typ tisku.

Materiál	Doba tisku 1 ks	Spotřeba materiálu 1ks [g]	Doba tisku 4 ks	Spotřeba materiálu 4ks [g]
PET	5 hodin a 9 minut	56,38	20 hodin a 36 minut	225,52
ABS	5 hodin a 8 minut	55,96	20 hodin a 32 minut	223,84
PET/ABS 235 °C	6 hodin a 7 minut	65,23	24 hodin a 28 minut	260,92
PET/ABS 250 °C	6 hodin a 30 minut	68,6	26 hodin	274,4
PC	5 hodin a 53 minut	61,82	23 hodin a 32 minut	247,28
PC+C	7 hodin a 32 minut	89,02	30 hodin a 8 minut	356,08
Materiál	PET+ABS (1ks)		PET+ABS (4ks)	
Doba tisku první barvy	2 hodiny a 2 minuty		8 hodin a 8 minut	
Spotřeba prvního materiálu [g]	26,44		105,76	
Doba tisku druhé barvy	3 hodiny a 14 minut		12 hodin a 56 minut	
Spotřeba druhého materiálu [g]	26,44		105,76	
Celková doba tisku	5 hodin a 16 minut		21 hodin a 8 minut	
Celková spotřeba materiálu [g]	52,88		211,52	

Tabulka 20 - Tiskové parametry z programu Prusa Slicer

Poté se vymodelované krabičky vložily do programu a z nich se odečetly potřebné parametry, v tomto případě spotřeba materiálu a doba tisku, jak je vidět v tabulce 20. Uvedená gramáž a čas jsou pro kompletní 1 a 4 krabičky, tudíž minimum a maximum možno tisknutelných.

V prvé řadě je nutno podotknout, že zmíněné časy a gramáže v tabulce 20 jsou pro kompletní krabičku, tudíž sečtení času a spotřeby materiálu tisku spodní a vrchní části krabičky. Lze si všimnout, že sandwich kombinace PET+ABS nemá při nejmenší tloušťce stěny nejrychlejší dobu tisku. To je dáno náročností tisku dvou materiálů, přičemž do tohoto času není započítána výměna struny, která trvá zhruba maximálně 5 minut. Naopak má nejmenší celkovou spotřebu materiálu, což je již závislé na tloušťce stěn, a ne na tiskové náročnosti.

Dalšími materiály jsou samostatné PET a ABS, které mají podobnou tloušťku stěn a od toho se odvíjí i doba tisku a spotřeba materiálu. Mezi těmito materiály jsou minimální rozdíly, a tudíž zde hraje významnou roli pouze cena materiálu. Poté je klasický polykarbonát, který má oproti porovnávané krabičce zvětšenou tloušťku, aby splňoval zadané podmínky. Tím, že má zvětšenou tloušťku stěn je spotřebováno větší množství materiálu, konkrétně o 10,47 g a doba tisku se prodloužila o 1 hodinu a 37 minut pro 1 kus.

S poněkud horšími parametry je dále kompozitní materiál PET/ABS, a to pro obě teploty tisku. Zde je již o něco vyšší spotřeba materiálu a také delší doba tisku, která poté pro 4 kusy

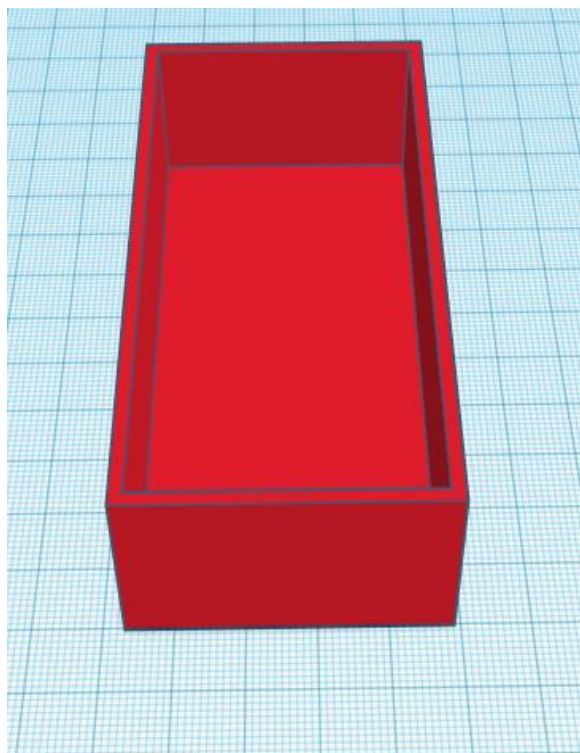
již převyšuje hranici 24 hodin. Nejméně hospodárná na čas a spotřebu se jeví poslední materiál, a to polykarbonát s příměsí uhlíku. Zde je největší spotřeba materiálu a doba tisku převyšuje 7 hodin.

Jak již víme z kapitoly 4.1.7, tak je časové vytížení stanoveno hodinovou mzdou. Proto je časová náročnost na den pro tisk 4 kusů stanovena na jednu hodinu, v čemž je započítáno začátek tisku, kontrola tisku přes den a případně posbírání již vytištěných vzorků. Pro tisk jednoho kusu jsou náklady na mzdy stanoveny na 2 hodiny za den z důvodu větší časové náročnosti (viz tab. 20). Toto však neplatí pro sandwich strukturu PET+ABS. Tam je časová náročnost o poznání větší, jelikož je pro 1 kus nutno častější změny filamentu a nelze počítat s tím, že pracovník pracuje 24 hodin nepřetržitě, proto je autorem zavržena z důvodu dvou výtisků za den, tudíž je ekonomicky neefektivní. Zbývá tedy výroba 4 kusů, která je při max. 12 hodinové směně již přijatelná i s výměnou a případnou lehkou kontrolou. V tomto případě je časová náročnost stanovena na 2 hodiny s ohledem na výměnu filamentu a posléze dalšími kontrolami.

Výtisk – 1591ATRD HAMMOND			
Materiál	Počet kusů [ks]	Spotřeba materiálu [g]	Doba tisku
PC	1	51,35	4 hodiny a 16 minut
	4	205,4	17 hodin a 4 minuty

Tabulka 21 - Parametry pro porovnávací krabičku

V uvedené tabulce 21 jsou vyobrazeny parametry tisku pro konvenční krabičku pro porovnání s ostatními materiály. Jelikož je stěna 2 mm široká, vydržela by tato krabička elektrickou pevnost nepřevyšující 65,4 kV/mm, a tudíž pro zvolené parametry by neměla být dostačující. Porovnání s touto krabičkou je čistě v zájmu ceny a spotřeby materiálu, a proto byla krabička vymodelována i na požadovanou elektrickou pevnost, ze stejného materiálu.



Obrázek 16 – Vymodelovaná spodní část krabičky pro zjištění potřebných parametrů

4.2.2 Celkové tiskové náklady

Z již známých parametrů pro tisk lze dopočítat cenu pro 1 a 4 kusy zvolených krabiček s různou tloušťkou stěn tak, aby splňovaly předem požadovaná kritéria. Tyto ceny jsou pouze ceny určeny za materiál s tím, že je zde pro porovnání i zvolená testovací krabička.

Materiál	Spotřeba materiálu 1ks [g]	Cena materiálu za 1 ks krabičky [Kč]	Spotřeba materiálu 4ks [g]	Cena materiálu za 4 ks krabiček [Kč]
PET	56,38	39,4	225,52	157,6
ABS	55,96	33,5	223,84	134,1
PET/ABS 235 °C	65,23	48,9	260,92	195,4
PET/ABS 250 °C	68,6	51,4	274,4	205,5
PET+ABS	52,88	34,3	211,52	137,3
PC	61,82	81,6	247,28	326,4
PC+C	89,02	154,2	356,08	616,7

Tabulka 22 - Ceny za krabičky pro různé materiály

V tabulce 22 jsou uvedeny jednotlivé ceny za materiál pro testované materiály. Z této tabulky je jasné patrné, že nejmenší náklady na materiál spotřebuje samostatné ABS. Poté se řadí sandwich struktura PET+ABS o necelou 1 korunu. Dále se řadí samostatné PET, poté kompozit PET/ABS pro obě tiskové teploty, dále samostatný polykarbonát, který bude důležitý pro porovnání se zvolenou krabičkou 1591ATRD HAMMOND. Nejhorší se jeví polykarbonát s příměsí, to je dáno jeho špatnou elektrickou pevností, jelikož je větší spotřeba materiálu, a i cena za gram materiálu je největší ze všech testovaných materiálů.

Další složkou do celkových nákladů jsou náklady na elektrickou energii. Nejprve je však potřeba vypočítat celkovou energii za rok a poté dle spotřeby wattů a ceny za kWh vypočítat celkovou cenu pro jednotlivé materiály. Za rok bude považován tisk 5 dní v týdnu po dobu celého roku, tudíž 260 dní.

Materiál	PET	ABS	PET/ABS 235 °C	PET/ABS 250 °C	PET+ABS	PC	PC+C
Výkon [W]	100	165	90	110	133	200	180
Počet hodin na 1 ks [hod]	5,2	5,1	6,1	6,5	5,3	5,9	7,5
Počet hodin na 4 ks [hod]	20,6	20,5	24,5	26,0	21,1	23,5	30,1
Počet hodin za rok pro 1 ks [hod]	1339	1335	1590	1690	1369	1530	1959
Počet hodin za rok pro 4 ks [hod]	5356	5339	6361	6760	5477	6119	7835

Tabulka 23 – Vyvinutý výkon na tisk pro jednotlivé materiály a počet hodin v provozu 3D tiskárny

Jelikož ale nebylo z důvodu koronaviru možno měřit spotřebu pro každý materiál zvláště, převzal autor cenu za elektrickou energii z jiné akademické práce [35] s tím, že dopočítal a odhadl spotřebovaný výkon a určil cenu za elektrickou energii s určitou odchylkou, která bude pro celkový výsledek zanedbána, jelikož se jedná o odchylku v řádu desetin korun (viz tab. 21). Cena za elektrickou energii je stanovena na 5,6 Kč/kWh.

Materiál	Cena za kWh pro 1 ks [Kč]	Cena za kWh pro 4 ks [Kč]	Cena za kWh za rok pro 1 ks [Kč]	Cena za kWh za rok pro 4 ks [Kč]
PET	2,9	11,5	749,8	2999,4
ABS	4,7	19	1233,2	4932,9
PET/ABS 235 °C	3,1	12,3	801,5	3206,1
PET/ABS 250 °C	4	16	1041	4164,2
PET+ABS	3,9	15,7	1019,9	4079,5
PC	6,6	26,4	1713,2	6852,9
PC+C	7,6	30,4	1974,3	7897,3

Tabulka 24 – Cena spotřebované elektrické energie pro různé materiály

V tabulce 24 jsou uvedeny ceny za elektrickou energii pro jednotlivé materiály, a to pro tisk 1 nebo 4 kusů. Zde je vidět, že spotřeba je spíše závislá na počtu hodin tisku, jelikož střední hodnota výkonu stroje je pro různé materiály téměř konstantní a rozhoduje pouze čas, který se tiskne a změna cen za kWh.

Dle všech doposud zjištěných parametrů se autor rozhodl zahrnout tisk po kusu, jelikož není tak efektivní, jako tisk při 4 kusech. Je to dáno tím, že při 12 hodinové směně musí pracovník v průběhu dne započít tisk vícekrát a po ukončení směny již tiskárna nepracuje, nebo pracuje malou část po směně. Naopak při tisku 4 krabiček je na začátku směny započat tisk a tiskárna pracuje pro každý materiál téměř 24 hodin, pro některé materiály i déle. Pro lepší přehlednost jsou v další tabulce všechny zmíněné materiály a počty kusů, které lze vyrobit za 1 den, případně za 1 rok.

Materiál	Tisk po 1 ks		Tisk po 4 ks	
	Počet výtisků za den [ks]	Počet výtisků za rok [ks]	Počet výtisků za den [ks]	Počet výtisků za rok [ks]
PET	3	720	4	960
ABS	3	720	4	960
PET/ABS 235 °C	2	480	4	960
PET/ABS 250 °C	2	480	3,6	864
PET+ABS	3	720	4	960
PC	2	480	4	960
PC+C	2	480	3,2	768
1591ATRD HAMMOND (PC)	3	720	4	960

Tabulka 25 – Počet výrobků vytištěných za den a za rok pro obě metody

Z této tabulky je jasně patrné, že tisk po 4 kusech je výrazně efektivnější, jelikož pro některé materiály se zvýšil počet výtisků i dvojnásobně. Proto se pro výpočet celkové ceny za kus použijí získaná data pouze pro 4 kusy.

Materiál	Cena [Kč]				
	Trubička-hot end	E3D V6 tryska	Podložka	Sada kovových motorků	Celkem
PET	995	1829	1741	13548	18112
ABS	992	1823	1735	13505	18054
PET/ABS 235 °C	1181	2172	2067	16090	21510
PET/ABS 250 °C	1255	2308	2197	17099	22859
PET+ABS	1017	1870	1780	13854	18521
PC	1136	2089	1989	15477	20692
PC+C	1455	2675	2546	19818	26494

Tabulka 26 - Cena údržby 3D tiskárny za rok

V tabulce 26 jsou zobrazeny ceny za údržbu pro jednotlivé součástky za rok. Nejmenší ceny za údržbu jsou pro materiály ABS, PET a sandwich PET+ABS. To je dáno celkovou dobou tisku za rok (viz tab. 23), jelikož nutnost provedení výměny je na ni závislá. Nejvyšší cenu za údržbu má polykarbonát s příměsí, a to se liší od nejlevnějších přibližně o 45%. Pro údržbu byla zanedbána častější výměna z důvodu poničení, jelikož tuto skutečnost lze vypočítat pouze z dlouho vedených statistik, které neměl autor k dispozici. Cena pro výměnu krokových motorů je počítána čistě dle nutnosti výměny po předem určených tiskových hodinách (viz tab. 15). V praxi však k tak časté výměně docházet nemusí, ale pro výslednou cenu je vhodnější tuto častější výměnu zvolit.

4.3 Zhodnocení celkových nákladů pro zvolený výrobek pro různé materiály

Ze všech doposud již zjištěných parametrů lze snadno dopočítat cenu za 1 kus krabičky při tisku po 4 kusech. Tisk po jednom kusu byl zavržen z důvodu neefektivity tisku a výrazně vyšší ceny za kus pro všechny materiály. Pro korekci tohoto mínění byl proveden test pro tisk nejlevnějšího materiálu při tisku 4 kusů, kde jsou celkové náklady vyšší o více než 7 Kč na kus.

Pro výsledné ceny autor také připočítával různé každoroční změny cen pro jednotlivé parametry. Pro mzdy bylo každoročně zvoleno přičíst 2,5%, pro růst energie 2%, pro růst cen náhradních dílů 1% a pro růst cen materiálu 0,5%. Výsledné ceny pro 4 kusový tisk jsou zobrazeny v tabulce 27. Detailní kroky výpočtu jsou přiloženy v souboru Ekonomické zhodnocení (viz příloha 3).

Materiál	Celkové náklady pro sestavenou 3D tiskárnu [Kč]	Celkové náklady pro verzi stavebnice 3D tiskárny [Kč]
PET	119,35	119,11
ABS	115,44	115,20
PET/ABS 235 °C	132,88	132,65
PET/ABS 250 °C	147,46	147,20
PET+ABS	115,81	115,57
PC	169,27	169,03
PC+C	273,86	273,57

Tabulka 27 - Výsledné ceny pro 1 kus krabičky pro různé materiály

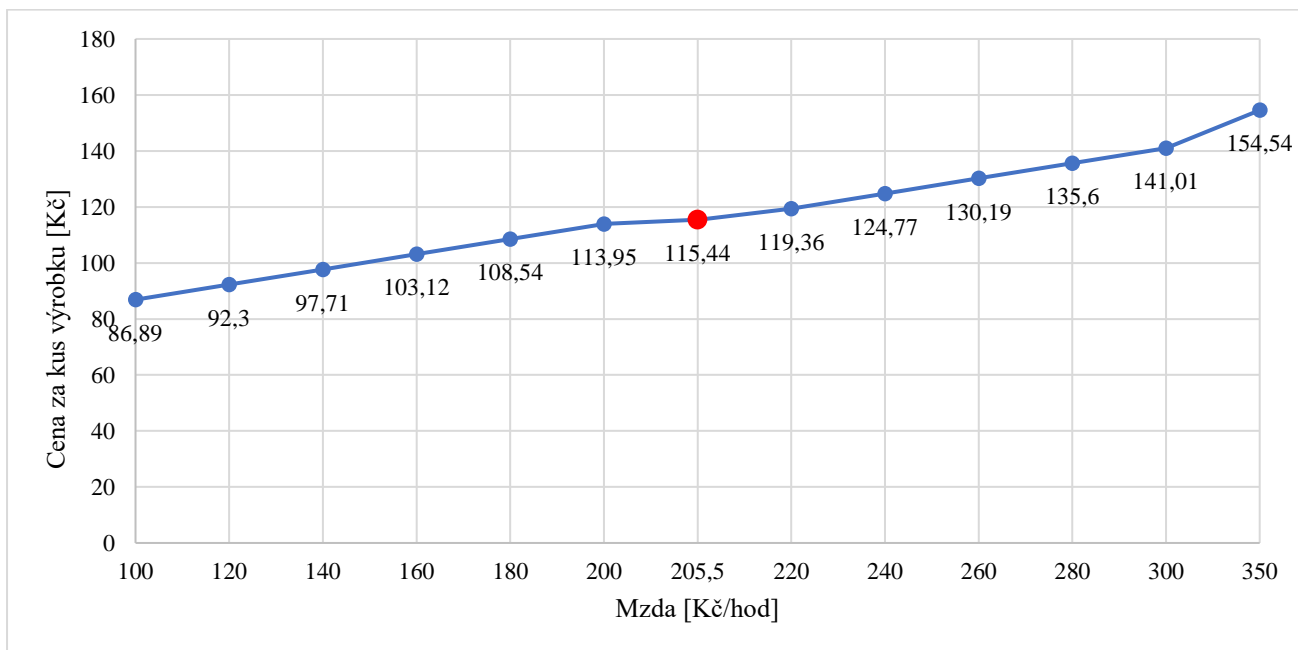
Autor zvolil kalkulaci pro obě investice, tudíž pro investici do složené a zkalibrované tiskárny nebo do stavebnice. Nicméně po dopočítání lze z tabulky vidět, že se výsledná cena pro obě investice výrazně neliší. Dále je také z této tabulky patrné, že při splnění požadavků je nejlevnější použít samostatný materiál ABS. Avšak hned za ním je sandwich materiál PET+ABS, který je dražší o 37 haléřů. Z toho lze usoudit, že pokud by se sandwich kombinace změnila na úkor dražšího materiálu, kterým je PET, o různé kombinace navrstvení materiálů PET a ABS, mohla by tato kombinace být ekonomicky nejefektivnější. Toto tvrzení by však bylo nutno ověřit dalším zkoumáním a nelze jej s přesností určit za správné. Ovšem z vyplynulých dat je tato možnost odebrat dražší materiál a přidat levnější materiál s podobnou elektrickou pevností se teoreticky jeví jako ekonomicky nejlepší.

Dále se nejlépe jeví materiál PET, ale to je pouze z důvodu větší ceny materiálu, tudíž pokud by se cena materiálu snížila, mohla by být cena za kus podobná materiálu ABS. Co se týče kompozitního materiálu PET/ABS, tak se v závislosti na teplotě tisku lépe jeví výtisk vytištěný při tiskové teplotě 235 °C. Oproti vyšší teplotě tisku je levnější o přibližně 15 Kč na kus, což už je znatelný rozdíl. Z toho lze rozhodnout, že tisk pro 250 °C není z ekonomického hlediska dobrá volba.

Poté je samostatný polykarbonát, který je ale dražší z důvodu spotřeby materiálu, spotřeby energie a nejvíce z důvodu vysoké ceny materiálu. Pokud se porovná vytištěný materiál z polykarbonátu a krabička 1591ATRD HAMMOND při stejné spotřebě, je konvekční krabička levnější o 3 Kč. Pokud by bylo ale potřeba dosáhnout stanovené elektrické pevnosti, byl by možná levnější výtisk pro tyto krabičky na 3D tiskárně. To je dáno tím, že lze měnit modely pro tisk bez nějakých větších překážek, jelikož ve velkovýrobě elektrotechnických součástí se tato změna pro pár krabiček nemusí vyplatit.

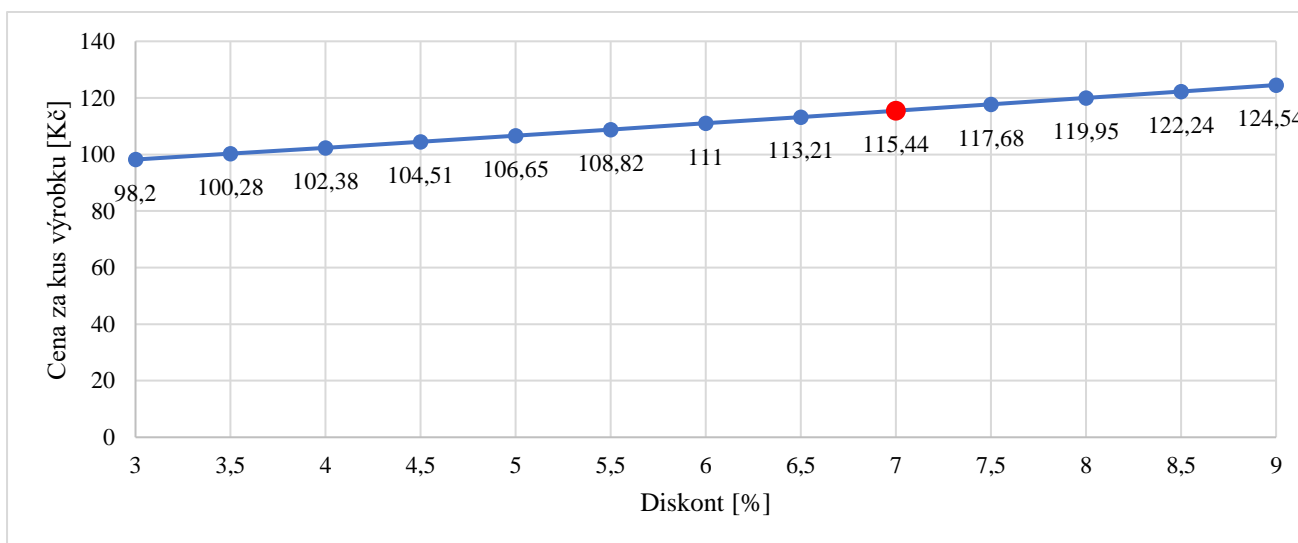
Nakonec vychází nejhůře polykarbonát s příměsí uhlíku. Zde se cena oproti nejlevnějšímu výtisku pohybuje takřka 2,5 krát více. Je to dáno vysokou spotřebou materiálu, dobou tisku a cenou za gram materiálu. Oproti ostatním materiálům by byla výroba spíše ztrátová. To je ale dáno také špatnou eklektickou pevností, kterou má tento materiál velmi nízkou a kvůli tomu je cena výrazně vyšší.

Pro ekonomický model byla také provedena citlivostní analýza pro všechny zmíněné materiály. Tato analýza je součástí příloh (viz přílohy), přičemž autor v této práci popíše a graficky znázorní změny cen za kus nejlevnějšího materiálu, kterým je ABS.



Graf 7 - Změna ceny výrobku v závislosti na změně ceny mezd pro materiál ABS

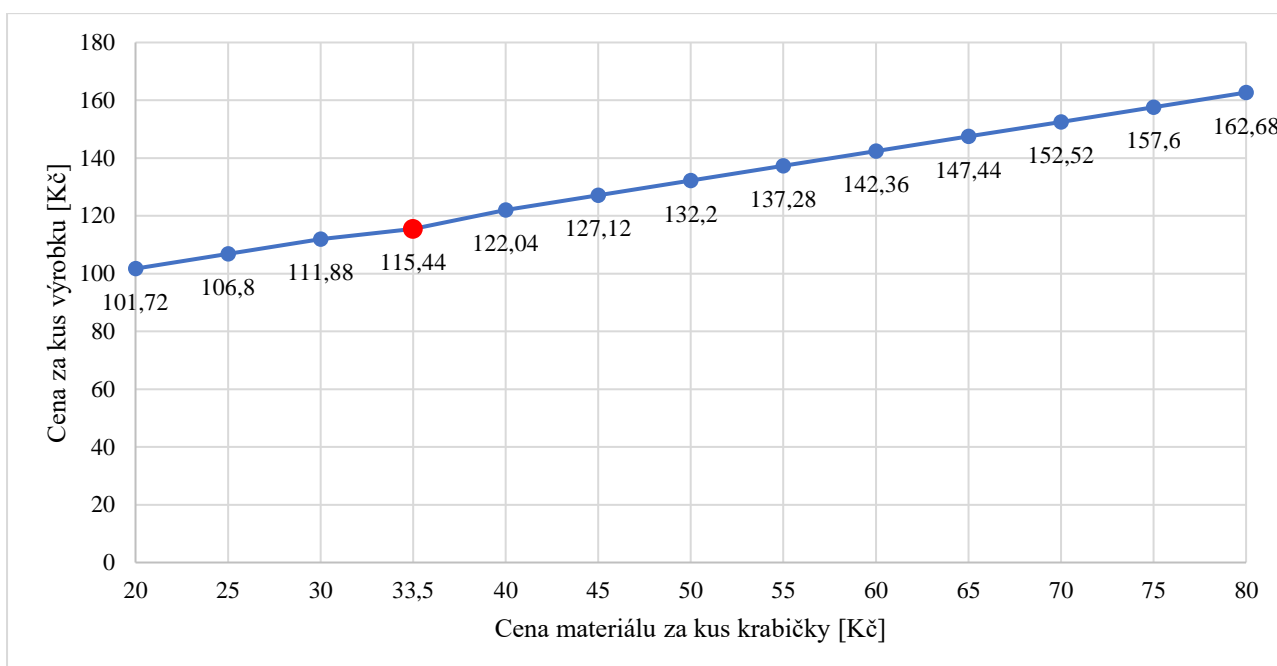
V grafu 7 je znázorněna změna ceny za kus výrobku v závislosti na změnách cen mezd. Při určení výsledné ceny je mzda z jedním nejhůře nacenitelných nákladů, avšak závisí na ni nejvíce, jelikož se při změně mzdy změní cena krabičky nejvíce. Oproti ceně za konvenční krabičku má mzda mírnou rezervu a lze zvyšovat až do přibližně 340 Kč/hod při zvoleném diskontu 7 %. Při této výši mzdy a diskontu je však zisk za krabičku necelých 37 Kč, což se při výtisku 960 kusů přibližně rovná zisku 35 000 Kč, při prodeji 1-9 kusů krabiček. Pro prodej více než 50 krabiček je zisk okolo 6000 Kč. Proto lze tvrdit, že výroba při zvolených parametrech je velmi zisková a autor by ji doporučil.



Graf 8 - Změna ceny výrobku v závislosti na změně diskontu pro materiál ABS

Dále je poté v grafu 8 znázorněna změna ceny za kus výrobku v závislosti na změně diskontu. Diskont znázorňuje budoucí požadované výnosy a byl zvolen 7%. Z grafu lze vidět, že změna diskontu nemá až tak výrazný vliv na výslednou cenu za kus výrobku, avšak nelze jej zanedbat. Pro prodeje výtisků do 10 kusů by se mohl diskont zvýšit takřka dvojnásobně na 14%, pro prodej více jak 50 krabiček lze však zvolit diskont pouze maximálně 8%. I z tohoto hlediska je při zvoleném diskontu výroba autorem doporučena, jelikož se zdá být výroba zisková.

Nakonec byla provedena citlivostní analýza změny ceny za kus výrobku v závislosti na změně cen materiálu. Cena materiálu je určena za výtisk pro 1 krabičku při tisku 4 krabiček. Graf 9 spíše predikuje, jak moc se může cena materiálu zvýšit, aby byla výroba stále zisková pro zvolený diskont. Maximální možná cena pro ziskovou výrobu se pohybuje okolo 69 Kč. Cena za materiál je druhou nejvíce se projevující složkou ve výsledné ceně. I v tomto ohledu se výroba jeví spíše ziskově, jelikož je cena materiálu výrazně pod maximálním limitem, a to i pro případný vyšší procentuální nárůst změny cen za materiál, než zvolil autor.



Graf 9 - Změna ceny výrobku v závislosti na změně ceny materiálu pro materiál ABS

V celkovém výsledku pro zvolené parametry jsou dražší 2 materiály, a to polykarbonát a polykarbonát s příměsí. Pro klasický polykarbonát lze dosáhnout levnější ceny výrobku, aby byla cenově podobná jako vybraná konvenční, a to zvolením nižší mzdy či snížením diskontní míry. Toto však neplatí pro polykarbonát s příměsí, a proto by tisk z tohoto materiálu autor silně nedoporučil. Co se týče kompozitního materiálu PET/ABS, je výhodnější zvolit tisk při 235 °C pro trysku, jelikož je nižší doba tisku a tím by se vytisklo více krabiček, což hraje ve výsledné ceně klíčovou roli. Klasické materiály PET, ABS či jejich sandwich navrstvení je ze všech nejlevnější a autor by doporučil tisk krabiček z těchto materiálů.

5 Závěr

Cílem práce bylo po seznámení s technologií FDM 3D tisku navrhnout a vytisknout vzorky pro vysokonapěťové zkoušky z různých materiálů, především z kompozitních, a ekonomicky je mezi sebou porovnat. Pro ekonomické porovnání autor zvolil kalkulaci nákladů na 1 kus a citlivostní analýzu.

V první části práce byly nejprve vysvětleny 3 hlavní kategorie 3D tisku s podrobnějším zaměřením na FDM technologii, která byla poté použita pro tisk vzorků. Dále byly popsány různé druhy materiálů, jak základních, tak kompozitních, které byly rozděleny do skupin podle jejich složení a funkce při 3D tisku. Z těchto materiálů jich bylo posléze několik zvoleno pro vysokonapěťové experimenty.

V další části došlo k samotným experimentům. Vytisknuté vzorky z různých materiálů o zvolených parametrech se vkládali do kádinky s elektrodami, na vzorky bylo poté přivedeno napětí a byla zjištěna elektrická pevnost pro každý materiál zvláště. Po vyhodnocení elektrických pevností lze nejvíce doporučit navrstvení dvou klasických materiálů na sebe, konkrétně PET+ABS, jelikož měla tato varianta největší elektrickou pevnost. Co se týče kompozitního materiálu PET/ABS či polykarbonátu s příměsí, nelze jej doporučit z tohoto hlediska, jelikož jsou jejich elektrické pevnosti výrazně nižší oproti klasickým materiálům.

Poté proběhlo ekonomické zhodnocení v závislosti na změřené elektrické pevnosti vzorků. Nejprve bylo teoreticky seznámeno s celkovými náklady, se kterými je potřeba počítat pro zjištění ceny. Posléze byla pro vyhodnocení vybrána konvenční krabička s určitými parametry a cenou za kus, která byla přemodelována pro požadovanou elektrickou pevnost. Výsledné ceny za vymodelované krabičky bylo potřeba zjistit pomocí kalkulace nákladů na 1 kus a citlivostní analýzou, která poukázala na výslednou cenu při změně některých vybraných parametrů. Nejlevnější výsledná cena byla zjištěna pro materiál ABS, za kterým o pár haléřů byl navrstvených materiál ze dvou materiálů. I tento fakt značí, že navrstvení materiálů je ekonomicky efektivnější než použití kompozitního materiálu. Nejhůře dopadl polykarbonát s příměsí uhlíku, pro který cena za kus výrazně převyšuje všechny ostatní, a proto by jej autor nedoporučil.

Celkově se nejlépe jeví navrstvení dvou materiálů na sebe, jelikož má vysokou elektrickou pevnost a nižší cenu za kus. Dále jsou samotné materiály PET a ABS, které mají také poměrně vysokou elektrickou pevnost a výsledné ceny za kus se pohybují v podobném cenovém rozmezí. Kompozitní materiál PET/ABS je se svými vlastnostmi a cenou na rozmezí, jelikož v technické části spíše neplní zvolené požadavky, ale v ekonomické ano. Nejhůře v obou částech skončil polykarbonát s příměsí.

6 Seznam grafů, tabulek, obrázků a rovnic

Obrázek 1 - Metoda SLA-Laser [7]	16
Obrázek 2 - Technologie SLS/DMLS [7]	17
Obrázek 3 - Schéma FDM kartézské tiskárny [8]	18
Obrázek 4 - Vizualizační příklady materiálů [3].....	22
Obrázek 5 - Ilustrativní obrázek kompozitního materiálu pro výrobu bust, který připomíná dřevo [9]	23
Obrázek 6 - Vliv parametru na graf pravděpodobnosti $F(t)$ při stejné α za čas t [21]	26
Obrázek 7 - Vliv parametru α na pravděpodobnost a osu x [21].....	26
Obrázek 8 - Graf pro kontrolu správnosti přizpůsobení dvouparametrového Weibullova rozdělení [22]	27
Obrázek 9 - Graf závislosti elektrické pevnosti na čase [27].....	28
Obrázek 10 - Schéma testovacího vzorku určeného pro tisk	29
Obrázek 11 - Struktura polykarbonátu s příměsí uhlíku	37
Obrázek 12 - Graf závislosti NPV a IRR (popř. r) [34]	46
Obrázek 13 - Ilustrační obrázek z Prusa Sliceru s informacemi o tisku	48
Obrázek 14 - Vývoj spotřeby elektrické energie pro materiál PETG [35].....	50
Obrázek 15 - Univerzální krabička 1591ATRD HAMMOND [37]	51
Obrázek 16 – Vymodelovaná spodní část krabičky pro zjištění potřebných parametrů	53
Tabulka 1- Vlastnosti vybraných materiálů [17].....	22
Tabulka 2 - Porovnání elektrických pevností vybraných materiálů [16]	24
Tabulka 3 – Parametry vzorků pro měření	29
Tabulka 4 - Celkové zhodnocení měřeného kompozitu dvěma programy oproti klasickým materiálům.....	32
Tabulka 5 - Parametry pro tisk navrstvených materiálů.....	34
Tabulka 6 – Aritmetický průměr elektrické pevnosti jednotlivých materiálů.....	34
Tabulka 7 – Koeficienty pro navrstvený vzorek tzv sandwich (PET+ABS)	35
Tabulka 8 – Parametry pro tisk polykarbonátu a polykarbonátu s příměsí.....	37
Tabulka 9 – Koeficienty pro polykarbonát a polykarbonát s příměsí	38
Tabulka 10 – Výsledná tabulka porovnání parametrů α a β	39
Tabulka 11 - Sledování vlivu výplně výtisku na elektrickou pevnost pro materiál PET	41
Tabulka 12 - Sledování vlivu výplně výtisku na elektrickou pevnost pro materiál ABS	41
Tabulka 13 - Sledování vlivu výplně výtisku na elektrickou pevnost pro kompozitní materiál PET/ABS	42
Tabulka 14 - Investiční náklady na 3D tiskárnu.....	47
Tabulka 15 - Náklady na údržbu tiskárny [35]	48
Tabulka 16 - Ceny jednotlivých použitých materiálů [29]	48
Tabulka 17 - Zaručená mzda dle rozřazení práce do skupin [36]	49
Tabulka 18 - Ceny za krabičku pro různá množství [37].....	50
Tabulka 19 - Dopočítané parametry pro tisk.....	51
Tabulka 20 - Tiskové parametry z programu Prusa Slicer	52
Tabulka 21 - Parametry pro porovnávací krabičku	53
Tabulka 22 - Ceny za krabičky pro různé materiály	54

Tabulka 23 – Vyvinutý výkon na tisk pro jednotlivé materiály a počet hodin v provozu 3D tiskárny	54
Tabulka 24 – Cena spotřebované elektrické energie pro různé materiály	55
Tabulka 25 – Počet výrobků vytištěných za den a za rok pro obě metody	56
Tabulka 26 - Cena údržby 3D tiskárny za rok	56
Tabulka 27 - Výsledné ceny pro 1 kus krabičky pro různé materiály.....	57

Graf 1 - Grafické zhodnocení kompozitu PET/ABS pomocí programu Wolfram Mathematica pro dvě různé teploty	33
Graf 2 - Grafické srovnání kompozitu PET/ABS oproti běžným materiálům	33
Graf 3 - Grafické zobrazení sandwich struktury	35
Graf 4 - Grafické porovnání všech materiálů	36
Graf 5 – Grafické porovnání PC a PC+C	38
Graf 6 – Grafické znázornění všech porovnávaných materiálů	40
Graf 7 - Změna ceny výrobku v závislosti na změně ceny mezd pro materiál ABS	58
Graf 8 - Změna ceny výrobku v závislosti na změně diskontu pro materiál ABS	58
Graf 9 - Změna ceny výrobku v závislosti na změně ceny materiálu pro materiál ABS	59

7 Seznam příloh

Příloha 1 Měření vysokonapěťových zkoušek

Příloha 2 Vyhodnocení v programu Wolfram Mathematica

Příloha 3 Ekonomické zhodnocení

Zdroje

- [1] THAYER, Jeffrey S. "Competitive Strategic Advantage Through Disruptive Innovation." [online]. c1984. Dostupný z <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/10954/35749974.pdf>
- [2] Filaments Directoy. *Filaments Directory* [online]. Belgie: Rue des Pères Blancs 4, 1040 Etterbeek, Belgie, 2015 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.filaments.directory/en/plastics/composite>
- [3] PRUSA3D. Naše 3D tiskárny [online]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>
- [4] Encyklopedie 3D tisku. *3D-tisk.cz* [online]. online: Vydavatelství Nová média, 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- [5] Profesionální řada Stereolitografický tisk SLA | Kancelářská technika – ASC HB a.s. Kancelářská technika – ASC HB a.s. [online]. Copyright © ASC HB a.s. [cit. 04.01.2020]. Dostupné z: <http://www.multifunkce-tiskarny.cz/3d-tiskarny-a-3d-skenery/professionalni-rada-stereolitografiky-tisk-sla.htm>
- [6] STŘÍTESKÝ, Ondřej. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [7] STŘÍTESKÝ, Ondřej a Josef PRŮŠA. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [8] Schematic diagram of FDM process. In: *SemanticScholar* [online]. 2017 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Feed-rate-and-volume-of-material-effects-in-fused-Pitayachaval-Masnok/e28bbb5af1390ee18a51a14eb942fe28a94df203/figure/0>
- [9] Tipler, Paul A.; Mosca, Gene (2008). Fyzika pro vědce a inženýry – svazek 1. Mechanika/oscilace a vlny/termodynamika. New York, NY: Worth Publishers. str. 666–670. ISBN 978-1-4292-0132-2.
- [10] STEVENSON, Kerry. Curious Thing Thing about 3.00 vs 1.75mm 3D Printer Filament. *Fabbaloo* [online]. 2015 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/blog/2015/7/26/a-curious-thing-about-300-vs-175mm-3d-printer-filament>
- [11] *MatterHackers Inc.* [online]. Burbank, 2013 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>
- [12] *Materialpro 3D* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [13] PRUSA3D. Naše 3D tiskárny [online]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>

- [14] VESELÝ, Petr, Tomáš TICHÝ, Ondřej ŠEFL a Eva HORYNOVÁ. *Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution* [online]. 2019, 7 [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Dielectric-strength-of-3D-printed-objects_fig3_329548217
- [15] VESELÝ, Petr, Tomáš TICHÝ, Ondřej ŠEFL a Eva HORYNOVÁ. *Study of electrical properties of 3D printed objects* [online]. Praha, 2018, 5 [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: http://poseidon2.feld.cvut.cz/conf/poster/proceedings/Poster_2018/Section_PE/PE_043_Vesely.pdf
- [16] Dielectric Strength. *Omnexus* [online]. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/dielectric-strength>
- [17] Materiály pro tisk technologií FDM. In: *3D tisk-online* [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-prehled-materialu-pro-3d/>
- [19] Formfutura Sandstone filament - 1.75mm – Laybrick – 3Dprint-shop.be. 3Dprint-shop.be - 3Dprint-shop.be [online]. Copyright © Copyright 2020 3Dprint [cit. 04.01.2020]. Dostupné z: <http://www.3dprint-shop.be/formfutura-sandstone-filament-175mm-laybrick.html>
- [18] PLA Conductive filament Proto-Pasta černá 1,75 mm 10 m | Elegant3D – 3D tiskárny, 3D pera, filamenty a příslušenství. Elegant3D – 3D tiskárny, 3D pera, filamenty a příslušenství [online]. Copyright © ELEGANT STYLE s.r.o. 2019 [cit. 04.01.2020]. Dostupné z: <https://www.elegant3d.cz/PLA-Conductive-filament-Proto-Pasta-cerna-1-75-mm-10-m-d222.htm>
- [19] Přehled materiálů pro 3D tisk. In: *MFK* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk>
- [20] Elektrorevue [online]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02017/index.html#parametry>
- [21] Characteristics of the Weibull Distribution. *Weibull.com* [online]. [cit. 2019-12-31]. Dostupné z: <https://www.weibull.com/hotwire/issue14/relbasics14.htm>
- [22] *IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Breakdown Data*. 2nd. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005. ISBN 0-7381-4469-X SS95269.
- [23] ŠAVEL, Josef. Elektrická pevnost. *ProfiElektrika.cz* [online]. 1998 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/terminolog/eterminolog2definition.2006-04-22.5895106704>
- [24] Moodle Fakulta elektrotechnická [online]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/112375/mod_resource/content/1/uloha_5_elektricka-pevnost-izolacnich-folii.pdf
- [25] Electromechanical Breakdown. *BrainKart.com* [online]. 2018 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: https://www.brainkart.com/article/Electromechanical-Breakdown_12892/
- [26] PALKO, Radek. *Teoretický rozbor elektrického průrazu*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.

[27] *Technika vysokých napětí: Elektrická pevnost* [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/b1m15tvn/tvn_elektricka_pevnost_1_2.pdf

[28] ČÁPAL, Tomáš. *IZOLAČNÍ VLASTNOSTI VÝROBKŮ VYTIŠTĚNÝCH 3D TISKOVOU TECHNOLOGIÍ FDM*. Technická 2, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Tichý.

[29] PRUSA3D shop. Naše 3D tiskárny [online]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/en/>

[30] FIALA, MUDr. Jan. *Ekonomický slovník: s odborným výkladem česky a anglicky*. 3rd. Praha: A plus, 2014. ISBN 978-80-87681-02-2.

[31] Náklady obětované příležitosti (Opportunity Costs) - ManagementMania.com. [online]. Copyright © 2011 [cit. 15.01.2020]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/naklady-obetovane-prilezitosti>

[32] Moodle Fakulta elektrotechnická [online]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/225801/mod_resource/content/1/Krit%C3%A9ria%20ekonomick%C3%A9%20efektivnosti.pdf

[33] Náklady, výnosy a zisk | www.gymnazium-milevsko.cz. Hlavní strana [online]. Copyright © 2020 Gymnázium, Milevsko, Masarykova 183, [cit. 15.01.2020]. Dostupné z: <https://www.gymnazium-milevsko.cz/naklady-vynosy-a-zisk>

[34] IRR Internal Rate of Return: Finally Understand How to Calculate and Use IRR. *Medium* [online]. 2018 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://medium.com/swlh/irr-internal-rate-of-return-d1a2aa26c8d0>

[35] BĚHAL, Daniel. *Ekonomické zhodnocení FDM technologie 3D tisku v elektrotechnickém průmyslu*. Technická 2, Praha, 2019. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Tomáš Tichý.

[36] Zaručená mzda 2020. *KurzyCZ* [online]. 2019 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/mzda/zarucena-mzda/>

[37] Univerzální krabička 1591ATRD HAMMOND. In: *Tme* [online]. [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/hm-1591atrd/univerzalni-krabicky/hammond/1591atrd/>