

České vysoké učení technické
Fakulta elektrotechnická

Obor: Aplikovaná elektrotechnika



Degradace materiálů používaných pro technologii
3D tisku

Degradation of materials used for technology of
3D printing

Bakalářská práce

Vypracoval: Jakub Mareš
Vedoucí práce: Ing. Eva Horynová
Rok: 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mareš** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466381**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Degradace materiálů používaných pro technologii 3D tisku

Název bakalářské práce anglicky:

Degradation of materials used for technology of 3D printing

Pokyny pro vypracování:

1. Napište stručné pojednání o vlastnostech materiálů používaných při 3D tisku.
2. Popište technologii 3D tisku.
3. Popište degradační procesy probíhající v plastech.
4. Vytvořte vzorky a proměřte jejich vlastnosti před a po působení degradačních vlivů.

Seznam doporučené literatury:

Noorani R. 3D printing: technology, applications, and selection. New York; Boca Raton; London: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2018.
Kudláček I. České vysoké učení technické v Praze. Elektrotechnická fakulta. Degradací procesy 1. Vyd. 1. ed. Praha: České vysoké učení technické; 1994.
Mentlík V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. ed. Praha: BEN - technická literatura; 2006.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Eva Horynová, katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **13.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Eva Horynová
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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

.....

Jakub Mareš

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval paní Ing. Evě Horynové za její odborné rady, přátelský přístup po celou dobu vypracovávání této bakalářské práce a zpřístupnění laboratoří katedry Elektrotechnologie (K13113) ČVUT. Můj velký dík patří také za ochotnou pomoc a odbornou asistenci panu Ing. Tomáši Tichému při tisku vzorků. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za jejich podporu po celou dobu studia.

Seznam zkratek

3D	trojrozměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitrilstyrenakryl
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované projektování)
CHDM	Cyklohexandimethanol
CO-PET	Kopolyester
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (přímé kovové laserové spékání/slinování)
FDM	Fused Deposition Modeling (modelování tavené depozice)
G-Code	Programovací jazyk pro CNC (computer numerical control)
EG	Ethylenglykol
HDT	Heat Deflection Temperature (teplota tepelné deformace)
iPA	Isophthalic Acid (kyselina isoftalová)
PCT	Polycyklohexylendimethyltereftalát
PCTA	Polycyclohexylene dimethylene terephthalate acid (okyselený PCT)
PET	Polyethyltereftalát
PET-G	Polyethyltereftalát-glykol
PLA	Polylactic Acid (kyselina polymléčná)
PP	Polypropylén
SLA	Stereolithography – Stereolitografie (vytvrzování kapalného fotopolymeru)
SLS	Selective Laser Sintering (selektivní laserové spékání/slinování)
TPA	Terephthalic Acid (kyselina tereftalová)
UV	Ultrafialové záření

Seznam symbolů

F	Lorentzova síla [N]
F_m	magnetická síla [N]
q	elektrický náboj [C]
E	vektor intenzita elektrického pole [$\text{N}\cdot\text{C}^{-1}$ ($\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)]
v	rychlost náboje [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
B	vektor magnetická indukce [T]
×	vektorový součin
ε	permitivita [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
D	vektor elektrické indukce [$\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$]
ε₀	permitivita vakua [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
ε_r	relativní permitivita [-]

C	kapacita [F]
C _o	vakuový kondenzátor [F]
U	elektrické napětí [V]
δ	ztrátový úhel [rad]
tg δ	ztrátový činitel tg delta [-]
R _m	pevnost v tahu [N·m ⁻²]
F _{max}	maximální síla [N]
S ₀	výchozího průřezu [m ²]
ε	poměrné prodloužení [-]
L ₀	počáteční délka [m]
L _u	délka při které došlo k přetržení [-]
A	tažnost [%]

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická část	10
2.1	3D Tisk	10
2.2	Využívané technologie 3D tisku	10
2.2.1	FDM – fusion deposition modeling	10
2.2.2	SLA – stereolithography	11
2.2.3	SLS – selective laser sintering	11
2.2.4	DMLS – direct metal laser sintering	11
2.3	Materiály používané pro výrobu tiskových strun	12
2.3.1	Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)	12
2.3.2	Kyselina polyléčná (PLA)	12
2.3.3	Akrylonitrilstyrenakryl (ASA)	12
2.3.4	Polypropylen (PP)	13
2.3.5	Polyamid (NYLON)	13
2.3.6	Kopolyester (CO-PET)	13
2.3.7	Polyethyltereftalát-glykol (PET-G)	14
2.4	Dielektrika a izolanty	14
2.4.1	Polarizace dielektrik	15
2.4.2	Dielektrické vlastnosti tuhých látek	16
2.5	Mechanické vlastnosti	19
2.6	Degradace polymerů	20
2.7	Faktory ovlivňující degradaci	21
2.7.1	Vliv kyslíku	21
2.7.2	Vliv vody	21
2.7.3	Vliv teploty	21
2.7.4	Působení slunečního záření	22
2.7.5	Chemická degradace	22
2.7.6	Mechanická degradace	22

2.7.7	Biodegradace	22
3	Praktická část	24
3.1	Použité materiály pro tisk.....	24
3.2	Tisk vzorků.....	24
3.2.1	Tisk vzorků pro měření kapacity, ztrátového činitele	25
3.2.2	Tisk vzorků pro měření pevnosti v tahu	26
3.3	Měření pevnosti v tahu.....	27
3.4	Měření kapacity a ztrátového činitele $tg \delta$	27
3.5	Podmínky degradace.....	28
4	Výsledky	30
4.1	Experimentální ověření vstupních vlastností materiálů	30
4.2	Vliv teploty na pevnost v tahu.....	31
4.3	Vliv vlhkosti na pevnost v tahu	32
4.4	Vliv součinného působení tepla a vlhkosti na pevnost v tahu.....	33
4.5	Vliv teploty na kapacitu materiálu	34
4.6	Vliv vlhkosti na kapacitu materiálu	35
4.7	Vliv součinného působení tepla a vlhkosti na kapacitu materiálu.....	36
4.8	Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ABS	38
4.9	Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ASA	39
4.10	Porovnání vlivu tepla a vlhkosti na materiál CO-PET.....	40
4.11	Porovnání vlivu tepla a vlhkosti na materiál PET-G	41
5	Závěr.....	42
6	Citovaná literatura	44
7	Seznam obrázků	45
8	Seznam tabulek	46

Anotace

Cílem této práce je testovat vliv degradačních činitelů na elektrické a mechanické vlastnosti materiálů využívaných pro 3D tisk. Teoretická část se zaměřuje na popis technologie 3D tisku a základní materiály, které se pro tisk využívají. Dále jsou zde uvedeny degradační procesy a jednotlivé faktory, které se podílejí na degradaci. V teoretické části jsou také popsány základní vlastnosti dielektrik a izolantů. Praktická část prezentuje výsledky, které byly získány z tohoto měření. Vzorokly byly testovány na změnu elektrické kapacity a změnu pevnosti v tahu.

Klíčová slova

3D tisk, Degradace materiálu, Technologie 3D tisku, Mechanické vlastnosti, Elektrické vlastnosti

Annotation

The aim of this work is to determine the influence of degradation on electrical and mechanical properties of materials used in 3D printing. The theoretical part describes the technology of 3D printing and the basic materials that are used. Furthermore, there is a degradation process and individual factors involved in degradation. The theoretical part also focusses on the basic properties of dielectrics and insulators. The measured data are given in the practical part of this work. These data were obtained from a set of test samples on which measurements were performed. The samples were tested for change in electrical capacity and change in tensile strength.

Key word

3D print, Degradation of materials, 3D printing technology, Mechanical properties, Electrical properties

1 Úvod

V současné době patří technologie 3D tisku k velice rychle se rozšiřujícímu odvětví průmyslového sektoru. 3D tisk si našel největší uplatnění při tvoření prototypů a výrobků, u kterých by bylo finančně a časově náročné vyrábět šablonu na vstřikování plastů. Největšího využití se mu dostává ve strojírenství. Zde tato technologie vytvořila velký potenciál při navrhování prototypů, a hlavně v kusové výrobě, jelikož výrobní náklady jsou při klasickém postupu vysoké a ve většině případů ani neproveditelné. Naopak v případě, kdy se využije 3D tisk, je prototypování pouze otázkou ceny využitého materiálu a ceny lidských zdrojů. Proto je nejvíce využíván v případě, kdy se jedná o zakázkovou výrobu, nebo sérii o pár kusech. Další možné uplatnění je v medicínském oboru, kde v dnešní době probíhají výzkumy týkající se tisku nových orgánů, implantátů a končetin ze speciálních biomateriálů k tomu vhodných. Současný trend je vytváření 3D tiskáren takových rozměrů a cen, že se stávají dostupné i pro domácí využití.

3D tisk je pojmenování technologického postupu, který je založen na postupném nanášení a spojování jednotlivých vrstev při vytváření trojrozměrných objektů. Této operace lze dosáhnout pomocí různých technologických postupů.

Mezi nejvíce rozšířené technologie 3D tisku patří FDM (Fused Deposition Modeling), metoda využívající k tisku polymery. Nevýhodou těchto materiálů je jejich nestabilita, která se projevuje změnou vlastností polymerního materiálu. Velice snadno podléhají degradaci vlivem prostředí (klimatických činitelů). Tato nežádoucí degradace se projevuje na mechanických, vizuálních a izolačních vlastnostech materiálů. Skladování polymerů (tiskových strun) v nevhodných podmínkách negativně ovlivňuje proces tisku a finální kvalitu výtisku.

2 Teoretická část

2.1 3D Tisk

Technologie 3D tisku vznikla v druhé polovině 20. století. V roce 1980 žádal v Japonsku o udělení patentu Dr. H. Kodama na Rapid Prototyping System, ovšem neúspěšně. Patent byl udělen C. Hullovi na metodu vytvrzování kapalného fotopolymery tzn. stereolitografii (SLA) v roce 1986. [1] [2] Od této doby se technologie 3D tisku intenzivně rozvíjí.

3D tisk je metoda tvorby třídimenzionálních pevných objektů pomocí přidávání jednotlivých vrstev materiálu, řízená počítačem na základě instrukcí z digitálního souboru. Výsledný tištěný předmět je tedy složen z jednotlivých tenkých vrstev. Při tisku jsou nanášeny jednotlivé vrstvy na sebe tak, aby došlo k jejich vzájemnému spojení a vytvořily finální předmět. To přináší výhodu v tom, že tento princip tisku umožňuje vytvářet i složité tvary a dutiny.

Předmět je nejprve třeba vymodelovat pomocí CAD softwaru a uložit v digitálním souboru .amf nebo .stl. Z těchto souborů je vygenerován soubor .gcode. Ten obsahuje konkrétní instrukce na základě, kterých jsou řízeny pohyby jednotlivých motorů, teplota trysky a podložky. V případě nevyhovujících vlastností (rozměrů) lze snadno modifikovat design a opět výrobek vytisknout.

V současné době patří mezi nejvíce využívané technologie 3D tisku: FDM, SLA, SLS a DMLS. V následující kapitole jsou popsány principy, na kterých jsou založeny tyto technologie.

2.2 Využívané technologie 3D tisku

2.2.1 FDM – fusion deposition modeling

FDM technologie se nejčastěji využívá při tvorbě prototypů nebo v případě kusové výroby. Fusion deposition modeling (FDM) byl vyvinut S. Scottem Crumpem v roce 1988. [3] FDM je nejvíce rozšířená technologie z důvodu její jednoduchosti, rychlosti, a především pořizovacích nákladů tiskárny a filamentů (tiskových strun). Cena filamentů se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,5 Kč až 1,3 Kč za jeden gram materiálu.

Princip tisku je založen na nanášení roztaveného filamentu (tiskové struny), který je zahříván tryskou. Tryska je součástí tiskové hlavy. Další její části jsou ve většině případů i ventilátory, jež slouží pro chlazení trysky nebo roztaveného filamentu. Každá jednotlivá vrstva musí být nanášena na již ztuhlou předchozí vrstvu (nelze tisknout do vzduchu). Z tohoto důvodu je potřeba u některých složitých těles, které mají převisy s úhlem větším, jak 45°, vytvářet tiskové podpory a ty se po dokončení tisku odstraní. K tisku se využívá tiskových strun (filamentů), které jsou vyrobeny z různých druhů termoplastů. Na jejich kvalitu a přesné rozměry jsou kladeny velké nároky. Pokud nemá tisková struna konstantní průměr v celé své délce, výsledný produkt by nemusel poté splňovat požadovaná kritéria.

Další důležitá část tiskárny je tisková podložka, která je ve většině případů vyhřívána, a to pro docílení lepšího propojení první vrstvy s podložkou a také aby nedocházelo k velikým teplotním rozdílům napříč výtiskem. Pro zajištění pohybu tiskové hlavy a podložky se nejčastěji využívají krokové motorky, které se starají o posun v jednotlivých osách X, Y, Z.

Je více možností, jak zajistit pohyb výrobku vůči tiskové hlavě v osách X, Y, Z. V některých případech je tisknutý model statický a tryska se pohybuje ve všech osách. Častější je využití toho principu, že se tryska pohybuje pouze v osách X a Y a tisknutý předmět se posouvá v ose Z. Avšak jednotlivých principů je mnoho a vše závisí na výrobci tiskárny.

2.2.2 SLA – stereolithography

Jedná se o metodu vytváření 3D objektů fotopolymerizací (pomocí světelného záření dochází ke spojení řetězců molekul polymeru). [1] Nejčastěji je využíváno UV záření. Samotný proces tisku probíhá tak, že se podložka ponoří do tekuté pryskyřice, poté je ozářen pouze požadovaný tvar dané vrstvy laserovým UV paprskem. Následkem toho dojde ke ztvrdnutí ozářeného materiálu a podložka se posune v ose Z. Tím je dokončen tisk jedné vrstvy a celý proces se znovu opakuje. Výhodou SLA je velice přesný tisk a nevýhodou, že vytisknuté modely mají malou mechanickou odolnost.

2.2.3 SLS – selective laser sintering

Tato technologie pracuje na principu ozařování termoplastického prášku laserem, který po ozáření tuhne. Termoplastický prášek se nanáší pomocí břitů, někdy pomocí válců, po jednotlivých vrstvách, ty jsou následně ozařovány pouze na daných místech laserem. Tištěný předmět je postupně zasypáván dalším materiálem. Výhodou technologie SLS je, že není třeba vytvářet podpory při tisknutí složitých struktur. Neozářený termoplastický prášek je možno recyklovat a následně znovu využít. Mezi nevýhody patří velmi vysoké pořizovací náklady 3D tiskárny.

2.2.4 DMLS – direct metal laser sintering

DMLS je metoda 3D tisku, která pracuje na principu spékání kovového prášku. DMLS dovoluje vyrobit plně funkční kovové výrobky na základě návrhu ve 3D softwaru bez nutnosti dalšího strojního opracování. DMLS si proto našlo uplatnění při výrobě složitých tvarů v kusovém množství. Je možno dosáhnout porézní, ale také plně homogenní struktury. Princip tisku je velice podobný jako v případě technologie SLS. Na základě požadované tloušťky jedné vrstvy je pomocí břítu nanesen kovový prášek ze zásobníku na základní desku. Následně je povrch osvětlen laserovým paprskem. Osvětlený materiál je lokálně roztaven a dochází k jeho tuhnutí do požadovaného tvaru. V dalším kroku je nanášena další vrstva kovového prášku

v přesně dané tloušťce. Kovový prášek, který nebyl využit, lze po dokončení procesu tisku odsát a následně ho znovu využít.

2.3 Materiály používané pro výrobu tiskových strun

Na výrobu tiskových strun (filamentů) pro technologii FDM jsou komerčně používané různé materiály, termoplasty, které se odlišují svým složením a vlastnostmi.

2.3.1 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

Materiál ABS je amorfní termoplastický kopolymer (heteropolymer), který je složen z nejméně dvou odlišných monomerů s různým uspořádáním. ABS vzniká polymerací styrenu a akrylonitrilu za přítomnosti polybutadienu. Teplota tání ABS je přibližně 225 °C. [4] Butadien v látce zajišťuje pružnost a styren dodává materiálu lesklý a pevný povrch. ABS má dobrou pevnost v tahu, je rozměrově stálý, tvrdost a tuhost materiálu je jen minimálně závislá na teplotě. Teplota, při které je vhodné materiál využívat je v rozpětí -40 °C až 80 °C. [5] ABS je odolný vůči kyselinám, hydroxidům, uhlovodíkům, olejům, tukům a organickým rozpouštědlům. Konečné parametry ABS ovlivňují do značné míry teploty, při kterých je materiál zahříván a ochlazován během procesu tepelného tvarování. Díky svému všestrannému využití je ABS nejvíce využívaný technický plast. [6]

2.3.2 Kyselina polyléčná (PLA)

Jedná se o biologicky rozložitelný polyesterový produkt vytvořený z rostlinných materiálů. K výrobě PLA se využívá především škrob (kukuřičný nebo obilný), z něho se enzymatickou hydrolýzou vzniká glukóza, ze které se fermentací získává kyselina mléčná. Ta se dále polymerizací přemění na polyléčnou kyselinu. Z kyseliny polyléčné se suchým nebo mokřím zvláknováním získávají vlákna PLA. Jednou z největších výhod PLA je biologická rozložitelnost. [7] Materiál PLA je citlivý vůči UV záření. Při dlouhodobém vystavení UV záření začíná materiál křehnout a rychleji degraduje. Další nevýhodou je nižší teplotní odolnost, kdy již při 50 °C dochází k nevratné deformaci.

2.3.3 Akrylonitrilstyrenakryl (ASA)

ASA je velice odolný vůči UV záření i povětrnostním podmínkám, což z něj činí ideální materiál pro venkovní použití. Další vlastností materiálu je velmi dobrá mechanická odolnost, tuhost a schopnost odolat vysokým teplotám. Mezi výhody patří odolnost vůči chemickým látkám a minimální žloutnutí vlivem slunečního a UV záření. Díky těmto vlastnostem je možné tento materiál využívat i v automobilovém průmyslu, pro který splňuje náročné požadavky. [8]

2.3.4 Polypropylen (PP)

Jedná se o termoplastický materiál ze skupiny polyolefinů. Polypropylen je velice houževnatý a má značnou odolnost proti mechanické únavě. Dále se vyznačuje malou hodnotou tření díky hladkému povrchu, je chemicky odolný proti široké škále zásad a kyselin. Po ohýbání, protažení a torzi si materiál ponechává původní tvar. Vyznačuje se vysokým elektrickým odporem a také minimální absorpcí vlhkosti. [9] V případě nestabilizovaného polypropylenu se projevuje malá odolnost vůči UV záření, zažloutnutí a postupným hnědnutím. Tento jev je často doprovázen vznikem trhlinek na povrchu. Již při krátkodobém zahřátí na 100 °C dochází u polypropylenu k velikému zhoršení mechanických vlastností. Při vystavení nestabilizovaného polypropylenu atmosférickým podmínkám je rychlost změn mechanických vlastností značná. Životnost nestabilizovaného PP v atmosférických podmínkách je udávána na 1 až 4 měsíce. [10]

2.3.5 Polyamid (NYLON)

Nylon se skládá z opakujících se jednotek řetězců atomů uhlíku. Existují různé typy nylonů v závislosti na povaze těchto řetězců. Například Nylon-6,6 je tvořen ze dvou monomerů, z nichž každý obsahuje 6 atomů uhlíku. [11]

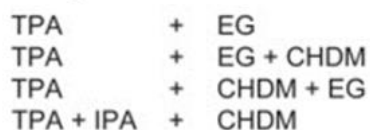
Jelikož je velice odolný vůči vysokým teplotám, alkoholu a chemikáliím, je ideální pro výrobky určené pro mechanické a technické aplikace. Díky tomu se dá využívat pro mechanicky náročné aplikace. Tento materiál je velice flexibilní a dovoluje výrobku se značně deformovat, než dojde k jeho zničení. [12]

2.3.6 Kopolyester (CO-PET)

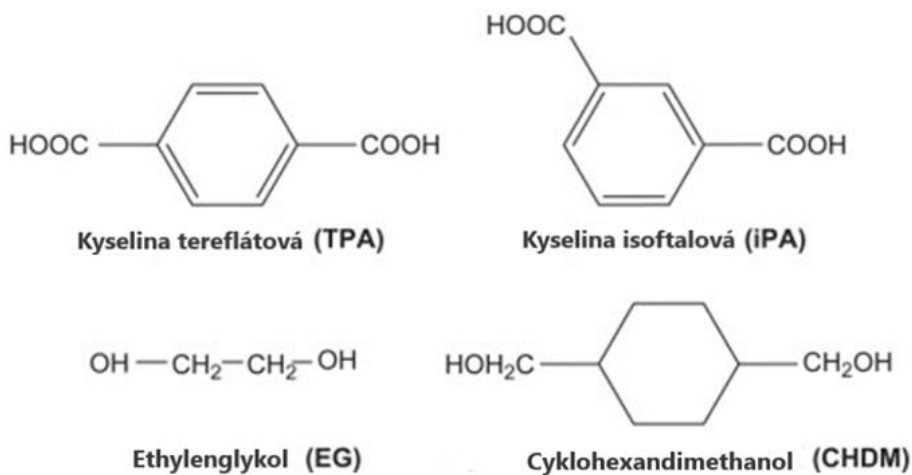
Obecně kopolyestery vznikají v polymerizačním procesu (Obr. 1), ve kterém je přítomen více než jeden diol nebo dikarboxylová kyselina. Diol je chemická sloučenina, která obsahuje dvě hydroxylové skupiny (-OH skupiny). Dikarboxylová kyselina je organická sloučenina, která obsahuje dvě karboxylové funkční skupiny (-COOH). V případě, že je směs kyseliny tereftalové (TPA) a isoftalové (iPA) zkombinována společně s 1,4 cyklohexandimethanolem (CHDM) je produkován modifikovaný (okyselený) PCT, nazývaný Polycyclohexylene dimethylene terephthalate acid (PCTA). [13]

Kopolyester je amorfni materiál, který je průhledný a čirý. Výhodou tohoto materiálu je dobrá odolnost vůči olejům, alkoholům a tukům. CO-PET je odolný vůči UV záření.

Dikarboxylová kyselina + Diol



Polyester



Obrázek 1 - Polymerizační proces polyesterů [13]

2.3.7 Polyethyltereftalát-glykol (PET-G)

Jedná se o modifikovaný Polyethyltereftalát (PET), ke kterému se během polymerizace přidává modifikovaný glykol. Díky tomu vzniká vlákno, u něhož je dosaženo jasnějšího vzhledu a větší odolnosti než u samotného materiálu PET. PET-G je odolný vůči nárazům, vysokým teplotám i některým chemickým látkám, např. vůči acetonu. Materiál je vhodný pro tisk výrobků, které přicházejí do kontaktu s potravinami, ale není biologicky odbouratelný. [14]

2.4 Dielektrika a izolanty

Dielektrikum je látka, jejíž požadovanou vlastností je schopnost polarizace. Izolanty patří do podmnožiny dielektrik, a proto je každý izolant dielektrikum. Tato skutečnost však neplatí zpětně, a tedy ne každé dielektrikum je izolant. Ideální izolant je materiál, který neobsahuje volné nosiče elektrického náboje. Avšak takové materiály skoro neexistují, proto se zavádí pojem reálný izolant, tzn. takový materiál, který obsahuje minimální množství volných nábojů. V případě, že ho vystavíme dostatečně velkému elektrickému poli začíná dielektrikum částečně vést elektrický proud.

2.4.1 Polarizace dielektrik

Polarizace dielektrik je proces, při kterém dochází k posunu vázaných nosičů náboje v látce vlivem působení elektrického pole. Na vázané nosiče působí Lorentzova síla (1), jež je dána součtem elektrické a magnetické síly.

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

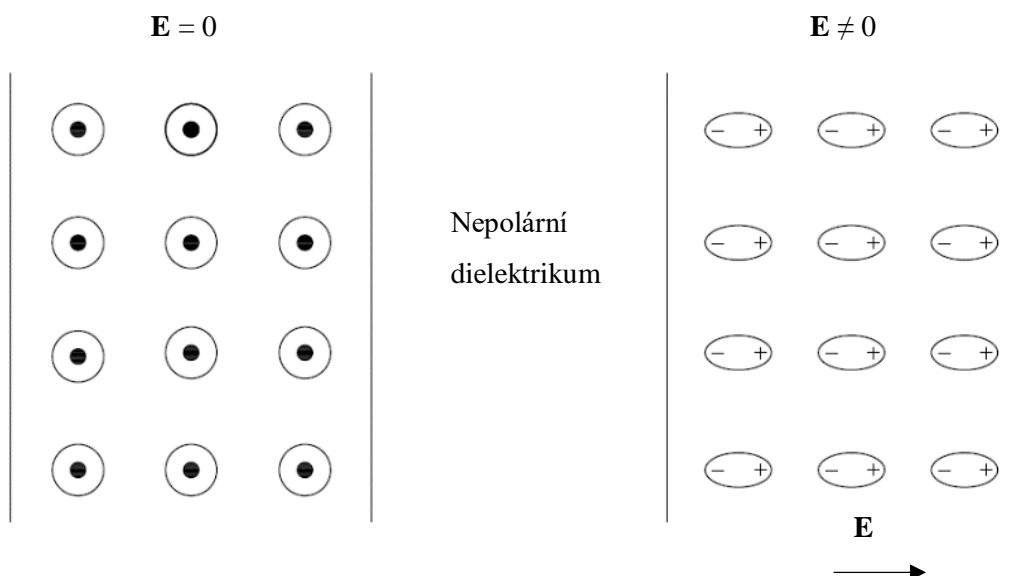
Elektrická síla (2) působí ve směru spojnice mezi náboji a dá se vyjádřit pomocí vektoru intenzity elektrického pole \mathbf{E} .

$$\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E} \quad (2)$$

Na pohybující se náboje působí magnetická síla (3), která je kolmá na směr dráhy pohybu náboje a je taky kolmá na vektor magnetické indukce \mathbf{B} .

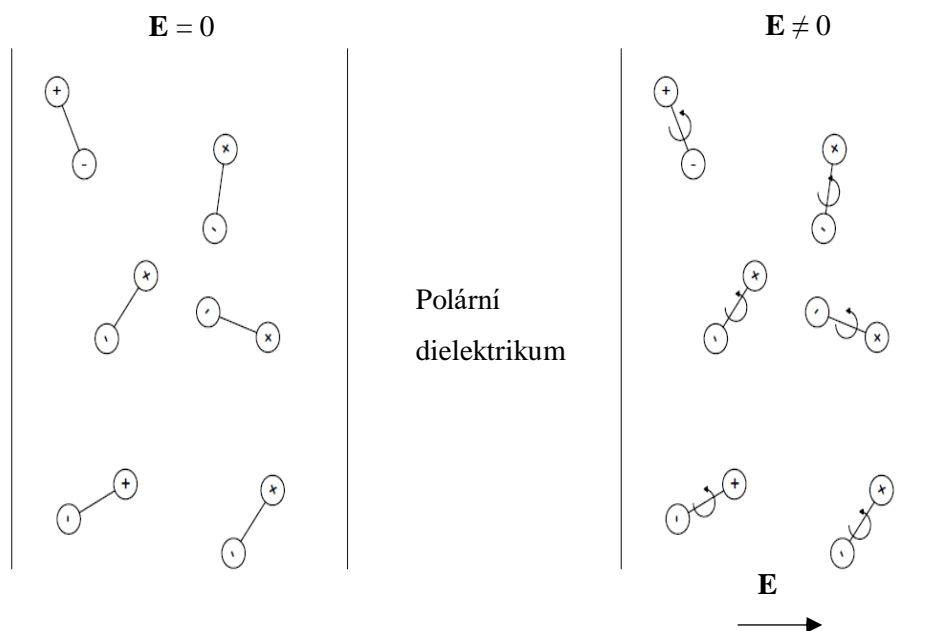
$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

Dielektrické látky můžeme rozdělit do dvou velkých skupin, a to na látky polární a nepolární. Tyto dvě skupiny dielektrik se liší skladbou hmoty, a tedy i jejich chováním v elektrickém poli. U nepolárních dielektrik se polarizace odehrává u základních částic hmoty, čímž jsou atomy. Ty jsou samostatně nábojově vyvážené. To znamená, že kladné náboje v jádře atomu a záporné orbitální elektrony mají shodné těžiště ve středu jádra, a proto se jeví jako vyvážené. Jelikož jsou tyto atomy samy o sobě vyvážené nevznikají elementární dipóly. Tento jev je vidět na Obr. 2 (levá část). Jakmile je dielektrikum vystaveno elektrickému poli (pravá část Obr. 2) nastane polarizace. Při ní dojde k posunu kladného jádra atomu ve směru elektrického pole a elektronový obal se posune ve směru proti směru působícího pole. Tím dojde k vytvoření indukovaného elementárního dipólu, který je orientovaný ve stejném směru jako siločáry působícího elektrického pole.



Obrázek 2 - Nepolární dielektrikum

U látek polárních existují elementární dipóly i v případě, že na těleso nepůsobí žádné elektrické pole. Tyto elementární dipóly jsou náhodně orientované, ale jelikož se navzájem mezi sebou ovlivňují, je výsledné elektrické pole nulové, protože se navzájem vyruší. Tento jev je zobrazen na Obr. 3. V případě, že je polární dielektrikum vystaveno elektrickému poli dojde k natočení dipólů. Velikost natočení dipólů závisí na velikosti intenzity elektrického pole \mathbf{E} . [15]



Obrázek 3 - Polární dielektrikum

2.4.2 Dielektrické vlastnosti tuhých látek

Relativní permitivita a ztrátový činitel jsou jedny z parametrů, které se používají pro hodnocení jejich vlastností.

2.4.2.1 Permittivita

Permittivita značená řeckým písmenem ε (epsilon) udává koeficient úměrnosti mezi vektorem elektrické indukce \mathbf{D} a vektorem elektrické intenzity \mathbf{E} . Permittivita vyjadřuje schopnost materiálu odolávat elektrickému poli. Permittivita má jednotku udávanou ve faradech na metr v soustavě SI.

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad [\text{F} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (4)$$

Relativní permitivita

Někdy taky označovaná jako dielektrická konstanta je jeden z nejdůležitějších parametrů pro určování dielektrik. Jedná se o látkovou bezrozměrnou veličinu. Relativní permitivita ε_r udává informaci o tom, kolikrát je permittivita daného materiálu nebo prostředí větší než permittivita

vakua ϵ_0 . ϵ_0 je materiálová konstanta, která je rovna hodnotě $\epsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$. Relativní permitivita byla zavedena M. Faradayem, který ji definoval jako poměr kapacity kondenzátoru C vyplněného dielektrikem a stejného vakuového kondenzátoru C_0 .

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad [-] \quad (5)$$

Kapacita vakuového kondenzátoru se dá určit podle rovnice (8), do které se dosadí permitivita vakua.

Relativní permitivita je závislá na druhu dielektrika a také na fyzikálních podmínkách. Nejvíce záleží na tlaku, teplotě a v případě, že je dielektrikum ovlivňováno střídavým napětím tak i frekvencí.

Relativní permitivita ϵ_r se dá definovat jako:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad [-] \quad (6)$$

Kde:

ϵ : permitivita (absolutní permitivita) [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]

ϵ_0 : permitivita vakua [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]

2.4.2.2 Elektrická kapacita

Elektrická kapacita je definována jako množství elektrického náboje ve vodiči s jednotkovým elektrickým potenciálem. Další možnost, jak definovat elektrickou kapacitu: „Elektrická kapacita je schopnost vodiče uchovat elektrický náboj. Čím větší bude kapacita, tím tato schopnost bude větší.“ Kapacita se označuje písmenem C a její jednotkou je farad [F].

Kapacita se dá vypočítat z následujícího vzorce

$$C = \frac{q}{U} \quad [\text{F}] \quad (7)$$

Kde

q : elektrický náboj [C]

U : elektrické napětí [V]

Elektrická kapacita deskového kondenzátoru se dá určit pomocí vzorce, který je definován pomocí permitivity, účinné plochy elektrod a tloušťkou dielektrika.

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad [\text{F}] \quad (8)$$

Kde:

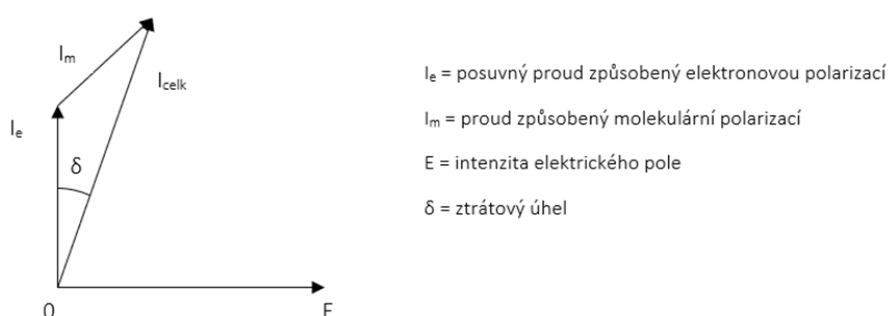
ϵ : permitivita [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]

S: účinná plocha desek elektrod [m^2]

d: vzdálenost mezi deskami elektrod [m]

2.4.2.3 Ztrátový úhel δ

V případě, že je na dielektrikum přiloženo střídavé elektrické pole dochází k pohybu volných a vázaných nábojů. Při tomto ději se energie elektrického pole přeměňuje v kinetickou (potencionální) energii nosičů náboje. Část z této energie se přemění na teplo vlivem srážek nosičů náboje s okolím. Tato energie se považuje za ztrátovou. V případě pružné polarizace, kde se náboje přemisťují pouze na malé vzdálenosti, je předaná kinetická energie téměř minimální, a proto se dají tyto dielektrika označit jako bezztrátová. V případě, že se jedná o polarizaci relaxační a migrační, tak se náboje posouvají o velké vzdálenosti, a proto dokáží předat větší množství kinetické energie, a tím jsou vzniklé ztráty větší. Na Obr. 4 je zobrazeno určení ztrátového úhlu δ .

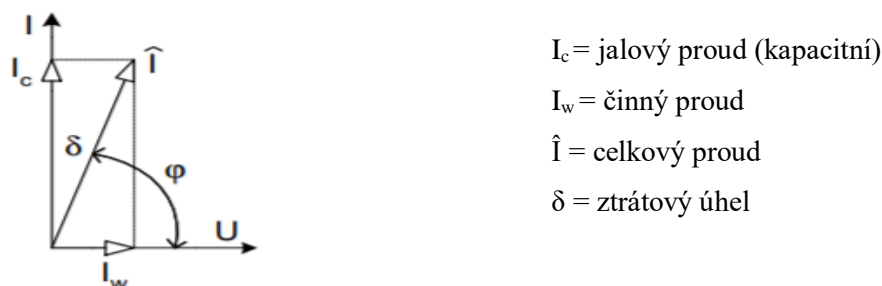


Obrázek 4 - Určení ztrátového úhlu δ

2.4.2.4 Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$

Ztrátový činitel charakterizuje ztráty v dielektrikách, jež jsou vloženy ve střídavém elektrickém poli. Tyto ztráty vznikají vlivem natáčení elementárních dipólů vlivem vnějšího střídavého elektrického pole. Dielektrikem protéká ztrátový proud, který je ve fázi s napětím a je zpožděný o úhel $\varphi = (\pi / 2) - \delta$ za kapacitním proudem $I_c = j\omega C_x U$ (Obr. 5). Pro popis těchto ztrát se využívá ztrátový činitel $\text{tg } \delta$. $\text{Tg } \delta$ je poměr činné složky proudu k jalové složce. Tento parametr se velmi často používá k hodnocení dielektrických vlastností látek. [15]

$$\text{tg } \delta = \frac{I_w}{I_c} [-] \quad (9)$$



Obrázek 5 - Určení ztrátového činitele $\text{tg } \delta$

2.5 Mechanické vlastnosti

Při zpracování materiálů a jejich následném využívání jsou výrobky vystaveny různému mechanickému namáhání například: tahu, tlaku, krutu, střihu nebo ohybu. V reálné situaci nedochází pouze k jedinému druhu namáhání, ale dochází současně k více dějům naráz.

Mechanické zkoušky se dají rozdělit na dvě kategorie, z hlediska působení síly na testovaný materiál. Při statické zkoušce je testovaný předmět vystaven postupně zvyšující se síle a doba působení je v rozsahu minut. Při dynamické zkoušce je síla působící na předmět nárazová a doba působení je v jednotkách vteřin, tento proces se ve většině případů cyklicky opakuje.

2.5.1.1 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu se měří statickou zkouškou tahem, kdy se na materiál o daném počátečním průřezu S_0 působí silou v tahu. Při zkoušce dochází k jeho prodloužení z výchozí délky l_0 na délku l_1 . Při dosažení kritické síly F_{max} , a tedy maximálního prodloužení nastává destrukce materiálu.

Pevnost v tahu R_m udává podíl maximální síly F_{max} a výchozího průřezu S_0 .

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (10)$$

2.5.1.2 Poměrné prodloužení

Další vlastnost, která se měří statickou zkouškou tahem je poměrné prodloužení ε . Poměrné prodloužení je poměr změny délky ΔL ku původní délce testovaného vzorku L_0 .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} [-] \quad (11)$$

Kde

L_u : délka při které došlo k přetržení

2.5.1.3 Tažnost

Tažnost A je poměrné prodloužení udávané v procentech vůči počáteční délce L_0 .

$$A = \varepsilon \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

2.6 Degradace polymerů

„Degradace (znehodnocování) je souhrn změn vlastností materiálů, ke kterému dochází na základě fyzikálních a fyzikálně-chemických dějů v materiálu vlivem působení degradačních procesů.“ [10] Výše znehodnocení je závislá na charakteru a také na průběhu degradačních dějů. Postup degradačního procesu s ohledem na podstatu dějů se dá rozdělit do těchto skupin.

- a) Stárnutí – při stárnutí dochází k chemickým změnám ve vnitřní struktuře materiálu, které se projevují postupnou změnou vnitřních nebo vnějších parametrů materiálu.
- b) Únava – při tomto fyzikálním procesu dochází ke změně vnitřní struktury projevující se postupnou změnou vnitřních parametrů.
- c) Opatření – jedná se o fyzikální a chemický proces při němž dochází ke změně povrchové struktury, která se projevuje postupnou změnou vnějších parametrů materiálu.

Degradaci polymerů je označován proces, při němž dochází ke změnám ve struktuře a vlastnostech polymerů. Tyto děje mohou být způsobeny rozkladnými reakcemi. Při degradaci dochází k eliminaci nízkomolekulárních látek z makromolekul. Degradace polymerů nastává již v průběhu samotné výroby a jejich následném zpracování. Nejčastěji vlivem vysoké teploty při roztavení polymerů v případě vstřikování do formy nebo například při vytlačování z extrudéru (trysky) při 3D tisku. Další faktor, který ovlivní polymery již při výrobě, je následné zchladnutí po dokončení výrobního procesu. Při chladnutí materiálu vzniká vnitřní pnutí ve struktuře. A v neposlední řadě se projeví to, v jakých podmínkách je materiál (výrobek) skladován a následně expedován k finálnímu využití. Následná degradace, která v polymerech nastane po výrobě není tak intenzivní, ale je dlouhodobá a působí ve většině případů na celý výrobek. [16]

Mezi projevy degradace lze zařadit změny těchto vlastností:

- změna barvy
- ztráta lesku
- povrchové praskliny
- pokles mechanické odolnosti (houževnatost, tažnost, pevnost)
- změna chemických vlastností materiálu
- elektrické vlastnosti materiálu
- změna tvaru (zkroucení, prohnutí, roztečení, rozpad na více částí)

2.7 Faktory ovlivňující degradaci

2.7.1 Vliv kyslíku

Ve většině případů jsou polymery vůči vzdušnému kyslíku odolné a stálé. Pokud ale bude polymer vystaven i dalším vlivům, například teplu, vodě a UV záření může dojít k oxidačním procesům vlivem vzdušného kyslíku, který ovlivní kvalitu polymerů. Přirozeně se vyskytující ozon, tvořený třemi atomy kyslíku, je pouze minimálním zdrojem degradačních účinků. Nicméně ozon ve vyšších koncentracích může ovlivnit degradační proces. [17]

2.7.2 Vliv vody

Přítomnost vody nebo vzdušné vlhkosti nejčastěji ovlivňuje změnu velikosti výrobku a fyzikálních vlastností. Voda způsobuje degradační proces, při němž dochází k vymývání všech podílů polymerů, které jsou ve vodě rozpustné, a také zapříčiňuje vymývání aditiv, které jsou přidávány do látek pro změnu jejich vlastností. [18] Navlhání polymeru je vlastnost, která není ovlivněna vodou ani vzdušnou vlhkostí. Navlhání je materiálová konstanta, a ta určuje, jak je materiál schopný přijmout vlhkost. Málo odolnými polymery proti navlhání jsou polární polymery (pryskyřice, kaučuky, polykarbonáty). Nepochární polymery jsou odolnější proti navlhání (polypropylen, polyethylen). Zvyšující se obsah vody v látce vede ke zvýšení houževnatosti, zvětšení rozměrů, dochází ke zvětšení permitivity a zvýšení meze pevnosti. Naopak dochází ke zhoršení elektrických izolačních vlastností a snížení odolnosti vůči vysokým teplotám. [18]

2.7.3 Vliv teploty

Jeden z jevů, který ovlivňuje parametry materiálů je teplota. Ta ovlivňuje vlastnosti materiálu ve všech stádiích jeho existence a je zásadní při skladování surového materiálu, výrobě, technologickému postupu a také při působení na finální produkt. Působení tepla lze rozdělit na dlouhodobé a krátkodobé. Při krátkodobé změně teploty dochází nejčastěji k vratným změnám a dlouhodobé působení téměř vždy zapříčiňuje změny nevratné.

Krátkodobé výkyvy teploty způsobují změny v rozměrech výrobku. Tyto rozměrové změny zapříčiňují mechanické pnutí v materiálu. Díky tomu dochází ke vzniku trhlinek a praskání materiálu. Nestálost teplot (střídání) někdy vede k transformaci krystalinity polymerů, což způsobuje změny, jak mechanických vlastností, tak i ovlivňuje difuzi ozonu a kyslíku do struktury polymeru.

Dlouhodobé působení teploty vyvolává v materiálu fyzikální změny. Tyto proměny vedou ke změně hmotnosti díky vysoušení a také ovlivňují pružnost a pevnost materiálu. [10]

2.7.4 Působení slunečního záření

Sluneční záření, které dopadá na povrch polymeru může být pohlceno, odraženo nebo rozptýleno. Fotochemické změny v polymerech vyvolává zejména absorbované záření. Velikost absorbované energie závisí na tom, jaké je spektrální složení dopadajícího světla a také na složení osvětleného polymeru, důsledkem je pak různá míra degradace jednotlivých polymerů. Hodnota absorbované energie následně určuje, jestli dojde v daném polymeru k rozštěpení vazeb, a tím i k degradaci polymeru.

Aby se u polymerů dosáhlo větší odolnosti vůči světelnému záření, přidávají se různé příměsi a stabilizátory. Tyto stabilizátory dokáží přeměnit absorbované záření na jiný druh energie nebo dopadlé záření vyzařují v jiných vlnových délkách, které nejsou pro daný typ polymeru nebezpečné. Při fotochemické degradaci dochází ke štěpení polymerních řetězců. To je vždy charakterizováno ostrým poklesem délky řetězců a současně dochází ke vzniku zanedbatelného množství monomeru. Vlivem tohoto štěpení ztrácí látka svoje mechanické vlastnosti. Další fotochemický proces je síťování. To vede k tomu, že se polymer stává nerozpustným a v rozpouštědlech dochází pouze k bobtnání. [10] Síťování makromolekul vede také ke křehnutí a ztrátě pružnosti materiálu. [18]

2.7.5 Chemická degradace

Při chemické degradaci dochází k reakci mezi polymerem, nebo některou z jeho složek a chemikálií. Tyto transformace jsou trvalé a způsobují změny vlastností a někdy dokonce destrukci materiálu. Nejčastěji dochází k přetržení řetězce molekul a síťování. Odolnost proti chemikálii je dána strukturou polymeru, chemickým složením a přísadami. Chemická odolnost závisí na polaritě polymeru a rozpouštědla. Materiál obsahující polární skupiny je napadán polárním rozpouštědlem a naopak. Například nepolární materiál PP bobtná nebo se rozpouští zejména v organických rozpouštědlech (benzín, benzen), ale odolává rozpouštědlům polárním (voda, alkohol). Při chemické degradaci má vliv koncentrace chemikálie, doba kontaktu s ní a teplota. [19]

2.7.6 Mechanická degradace

V případě, že je na polymer působeno silou, která je menší, než maximální síla, při které dojde destrukci, dochází k mechanické degradaci. Pokud bude tato situace často opakována může dojít k nevratným změnám barvy, tvaru, nebo až k následné destrukci. [18]

2.7.7 Biodegradace

Biodegradace polymerů je každá nežádoucí změna vlastností materiálu, ke které došlo vlivem mikrobů, bakterií, plísní a enzymů. Dále se jedná o poškození, jež vzniklo od vyšších

forem života například: hlodavců, termitů a rostlin. [18] Může dojít k mechanickému poškození materiálu vlivem toho, že organismy využijí materiál jako zdroj potravy. Biodegradační proces je závislý i na tom, v jakém prostředí se materiál nachází. Například pokud bude materiál vystaven vlhkosti a teplotě vhodné pro růst plísní a hub je biodegradační proces razantnější a má větší následky.

3 Praktická část

Cílem této práce je sledovat vliv teploty a vlhkosti na elektrické a mechanické vlastnosti rozdílných tiskových strun (filamentů) využívaných pro 3D tisk pomocí technologie FDM.

3.1 Použité materiály pro tisk

V následující tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny parametry udávané výrobcí: Prusa Research s.r.o. pro filamenty ABS, ASA, PP, PLA, PET-G a Smart materials 3D (Španělsko) pro materiál INNOVATEFIL® Copolyester Temperature+ (CO-PET). Při tisku zkušebních vzorků byly dodržované teploty udávané výrobcem, aby bylo zajištěno ideální roztavení materiálu při extruzi.

Tabulka 1- Vybrané referenční hodnoty využitých materiálů

Materiál	ABS	ASA	CO-PET	PP	PLA	PET-G
Teplota tiskové hlavy [°C]	220-240	250-265	260-280	210-230	190-210	230-250
Teplota podložky [°C]	80-100	90-100	90-110	70-90	40-60	60-80
Hustota materiálu [g·cm ⁻³]	1,05	1,07	1,24	0,9	1,24	1,27
HDT (při 1,8 MPa) [°C]	101	95	96	62	55	70
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	65	66	90	100	106	70
Rázová houževnatost [kJ·m ⁻²]	21	45	24	10	12,7	6,2
Mez pevnost v tahu [MPa]	47	42	56	14	50	50

3.2 Tisk vzorků

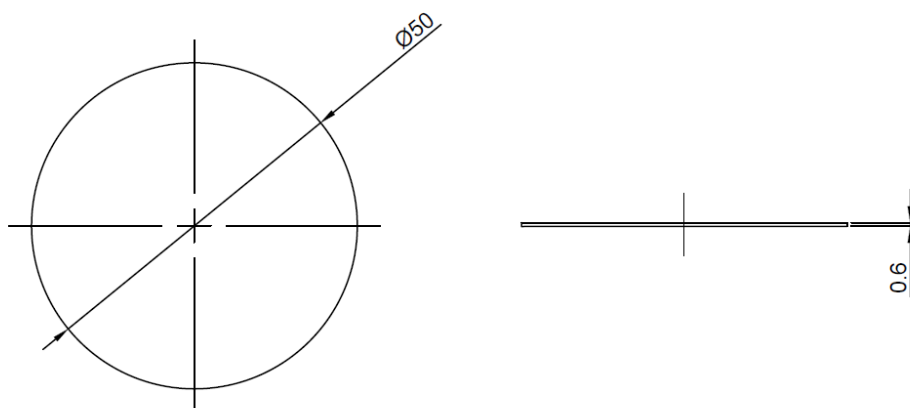
Pro zajištění porovnatelnosti naměřených výsledků, bylo nutno využít normalizované rozměry vzorků. Ty byly vytisknuty na 3D tiskárně Prusa I3 MK3 od firmy Prusa Research s.r.o. za odlišných teplot tiskové hlavy a podložky v závislosti na materiálu, ze kterého byl vzorek tištěn viz Tab. 1. Vzorky, jak pro měření mechanických, tak elektrických vlastností, se tiskly z materiálů ABS, ASA, CO-PET, PET-G, PLA a PP. Parametry nastavené na 3D tiskárně při tisku jednotlivých materiálů jsou uvedeny v Tab. 2.

Tabulka 2 - Použité parametry při tisku vzorků

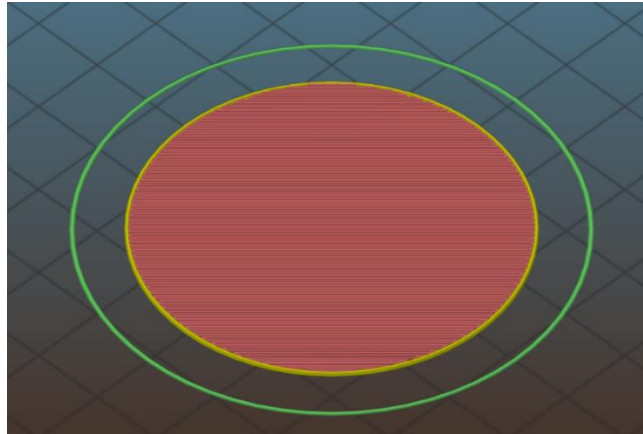
Materiál	Teplota tiskové hlavy [°C]	Teplota podložky [°C]	Úhel výplně [°]	Výška jedné vrstvy [mm]	Šířka extruze [mm]
ABS	255	100	45	0,15	0,45
PLA	220	60	45	0,15	0,45
PP	220	100	45	0,15	0,45
PET-G	230	85	45	0,15	0,45
ASA	265	110	45	0,15	0,45
CO-PET	230	85	45	0,15	0,45

3.2.1 Tisk vzorků pro měření kapacity, ztrátového činitele

Pro měření elektrických vlastností byly vzorky tisknuty ve tvaru válce o průměru 50 mm a výšce 0,6 mm (Obr. 6). Na tomto druhu vzorků byla měřena kapacita a ztrátový čísel. Na (Obr. 7) je snímek z programu Slic3r PE, na kterém je zobrazena jedna z vrstev a druh použité výplně. Parametr pro tisk výplně vzorku byl nastaven na 100 % (celý objem vzorku je tvořen pouze materiálem), natočení jednotlivých vrstev oproti sobě bylo 45°. Perimetr (počet obvodových vrstev, žlutě vyznačeno na Obr.7) vzorků byl zvolen 1. Tyto vzorky byly vytištěny z materiálu ABS, ASA, CO-PET, PET-G, PLA a PP.



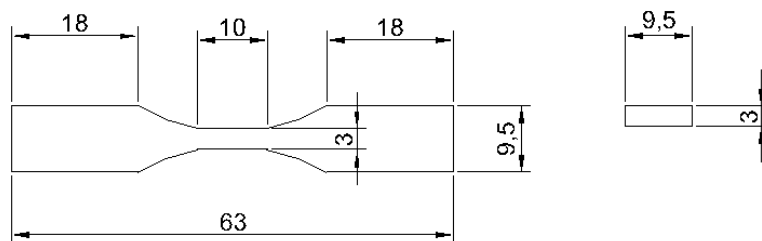
Obrázek 6 - Technologický náčrt vzorku pro měření elektrických vlastností



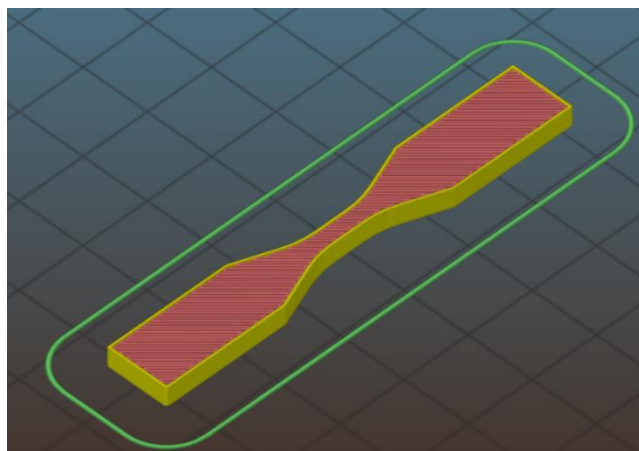
Obrázek 7 - Výplň vzorku pro měření kapacity a ztrátového činitele

3.2.2 Tisk vzorků pro měření pevnosti v tahu

Pro měření mechanických vlastností byly vzorky tisknuty ve tvaru víceúčelového zkušebního tělesa podle normy ČSN EN ISO 527 (Obr. 8). Na Obr. 9 je zobrazena výplň vzorku, na kterém byla měřena pevnost v tahu. U těchto vzorků byl zvolen parametr výplně 100 %, perimetr byl nastaven na 1 a natočení jednotlivých vrstev oproti sobě bylo 45°. Vzorky pro testování pevnosti v tahu byly vytisknuty z materiálů ABS, ASA, CO-PET, PET-G, PLA a PP.



Obrázek 8 - Technologický náčrt vzorku pro měření mechanických vlastností

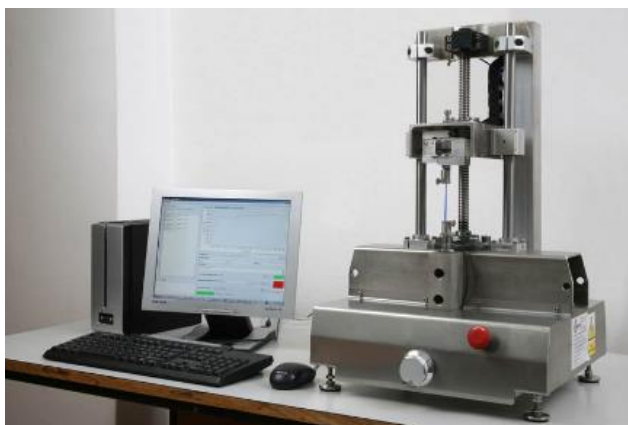


Obrázek 9 - Výplň vzorku pro měření mechanických vlastností

3.3 Měření pevnosti v tahu

Pevnost v tahu R_m byla měřená na trhačce Deform 02/15 od firmy Pemar s.r.o. (Obr. 10). K trhačce byl připojen počítač pro její ovládání pomocí programu s nastavenými parametry: posun v ose Z byl 7 mm za minutu a celková délka pohybu čelistí byla 20 mm.

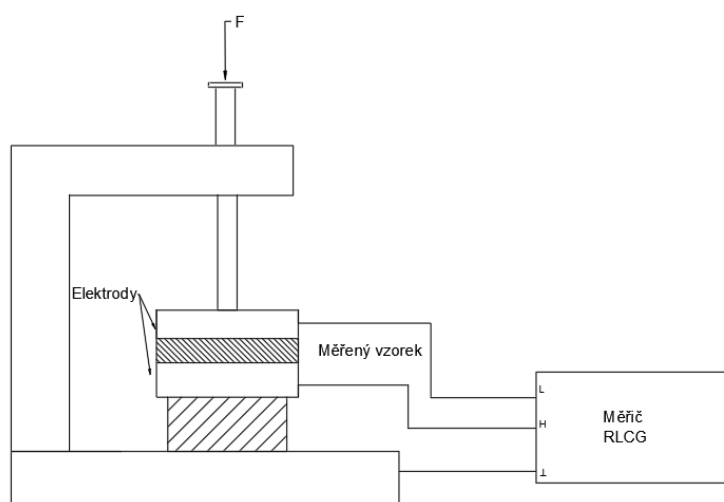
Měřený zkušební vzorek byl upnut do speciálních čelistí tak, aby nedošlo k jeho vysmeknutí a byla provedena mechanická zkouška tahem. Program ukládá průběžně naměřené hodnoty síly a posunu čelistí do textového dokumentu.



Obrázek 10 - Trhačka použitá pro měření pevnosti v tahu R_m , [20]

3.4 Měření kapacity a ztrátového činitele $\text{tg } \delta$

Kapacita a ztrátový činitel byl měřen na speciálním přípravku, který umožňoval uchycení testovaného vzorku mezi dvě kruhové elektrody a ten byl připojen k přístroji TESLA BM 595 RLCG meter, který využívá Scheringův můstek pro měření kapacit a ztrátového činitele $\text{tg } \delta$. Na tyto elektrody je působeno přitlačnou silou F , která zajistí konstantní rozložení elektrického náboje. Naměřené hodnoty bylo možné přímo odečítat na displeji přístroje (Obr. 11).



Obrázek 11 - Schéma pracoviště pro měření kapacity a ztrátového činitele

3.5 Podmínky degradace

Po dokončení tisku byla provedena kontrola rozměrů a kvality vytisknutých vzorků. Nevyhovující vzorky byly vyřazeny. Vytisknuté vzorky byly vloženy do jednotlivých teplotních komor, které udržují nastavené parametry po předem zvolenou dobu. Část měřených vzorků byla vložena do komory, kde byla udržována teplota 80 °C a 80% vlhkost vzduchu (Obr. 12). Další vzorky byly vloženy do pece o teplotě 80 °C s minimální vlhkostí vzduchu (Obr. 13). Poslední sada vzorků byla ve vlhkostní nádobě (exsikátor) při 85% vlhkosti a pokojové teplotě (Obr. 14). Nádoba exsikátoru byla naplněna vodou ve spodní části. Teplota a vlhkost byla změřena pomocí digitálního vlhkoměru.

Měření hodnot bylo prováděno maximálně do 45 minut po vyjmutí vzorků z komor, pokud není uvedeno jinak. V pravidelných týdenních intervalech bylo prováděno měření sledovaných veličin vždy na pěti vzorcích od každého materiálu. V tabulkách výsledků je vždy uváděna průměrná hodnota s vypočtenou směrodatnou odchylkou.



Obrázek 12 - Klimatická komora CTS



Obrázek 13 - Teplotní komora Memmert



Obrázek 14 - Vlhkostní komora – exsikátor

4 Výsledky

4.1 Experimentální ověření vstupních vlastností materiálů

Mechanické a elektrické vlastnosti vzorků vytisknutých z materiálů ABS, ASA, CO-PET, PET-G, PLA a PP, byly měřeny před vložením do klimatických komor. Referenční hodnoty pevnosti v tahu R_m [$N \cdot mm^{-2}$] a kapacity C_x [pF] jednotlivých materiálů před zahájením degračního experimentu jsou uvedeny v Tab. 3. Dále je zde vypočtená relativní permitivita podle (5). Kapacita C_0 byla vypočtena pomocí rovnice (8) po dosazení rozměrů vzorků na $C_0 = 28,96$ pF.

Tabulka 3 - Referenční hodnoty vzorků

Materiál	Pevnost v tahu R_m [$N \cdot mm^{-2}$]	Kapacita materiálu C_x [pF]	Relativní permitivita ϵ_r [-]
ABS	$38 \pm 0,43$	$49,52 \pm 1,62$	1,71
ASA	$51 \pm 0,49$	$47,21 \pm 1,24$	1,63
CO-PET	$71 \pm 0,2$	$57,86 \pm 5,21$	2,00
PET-G	$59 \pm 0,84$	$68,22 \pm 5,14$	2,36
PLA	$67 \pm 0,6$	$69,31 \pm 3,24$	2,39
PP	ND	$43,2 \pm 0,92$	1,49

Z referenčních hodnot vyplývá, že největší pevnost v tahu má materiál CO-PET ($71 N \cdot mm^{-2}$). Naopak materiál s nejmenší pevností v tahu je ABS ($38 N \cdot mm^{-2}$). Největší kapacitu vykazoval vzorek vytisknutý z materiálu PLA ($69,31$ pF). Nejmenší kapacitu z porovnávaných látek má PP s hodnotou $43,2$ pF.

Ztrátový činitel $tg \delta$ nebylo možné u žádného z testovaných materiálů změřit, jelikož jeho hodnoty byly příliš nízké a v dalších experimentech toto měření nebylo prováděno.

Materiál PP nebylo možné přetřhnout na používané trhačce, jelikož materiál vykazoval velké poměrné prodloužení ϵ , přesahující parametry trhačky, jejíž rozsah pohybu je limitován mechanickou konstrukcí. Hodnota pevnosti v tahu nebyla změřena, ale tažnost A materiálu PP byla vypočtena pomocí vzorce (12) na $90,5$ %. Z tohoto důvodu byl PP vyřazen ze vzorků určených na měření pevnosti v tahu.

Jako další problematický materiál se ukázal PLA. Vytisknutý vzorek z této látky bylo možno testovat pouze před zahájením procesu degradace, jelikož po týdnu v klimatické komoře s 80% vlhkostí při 80 °C došlo k rozpadnutí vzorků. Vzorky se rozpadly do takové míry, že nešlo provést měření sledovaných parametrů. Z toho vyplývá, že PLA je nejméně odolný materiál v případě expozice zvolenému degračnímu prostředí. PLA byl tedy vyřazen ze souboru testovaných materiálů a dalších experimentů. Na Obr. 15 je zdokumentováno porovnání vlivu

degradace na materiály ABS (levá část obrázku) a PLA (pravá část obrázku) po jednom týdnu v klimatické komoře.



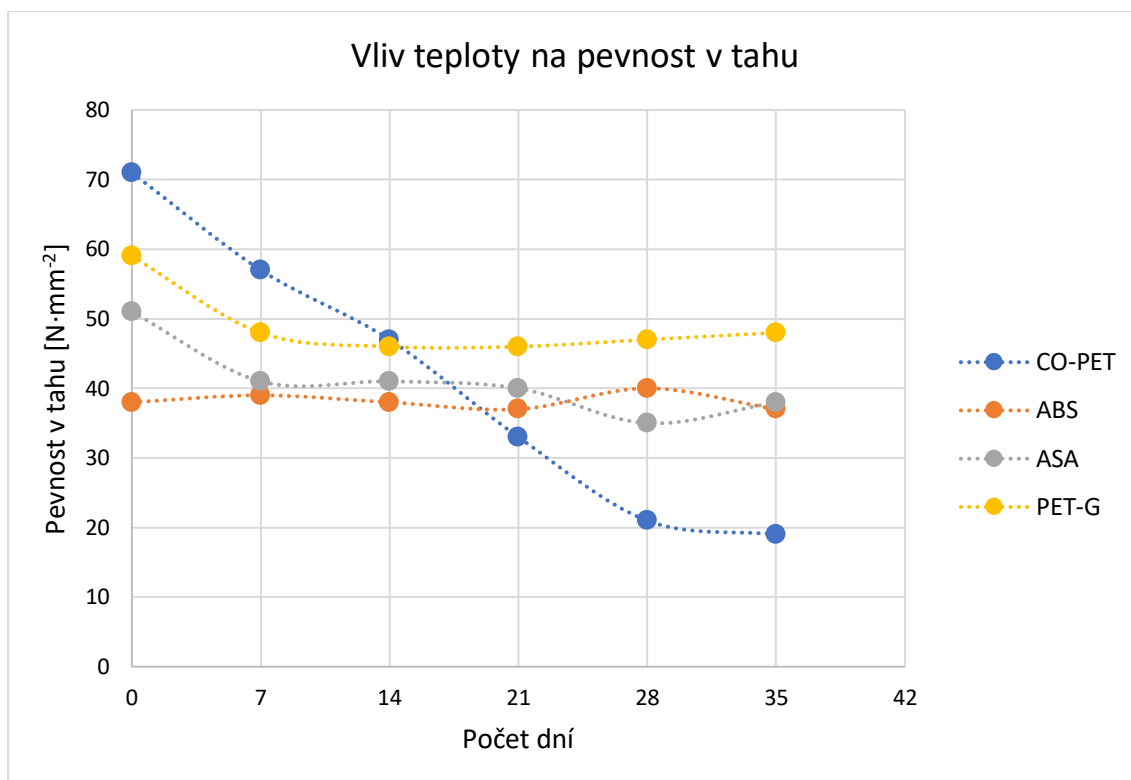
Obrázek 15 - Degradace materiálu PLA po jednom týdnu; ABS (levá strana) a PLA (pravá strana)

4.2 Vliv teploty na pevnost v tahu

V Tab. 4 je uvedeno porovnání vlivu degradačního procesu způsobeného teplem na pevnost v tahu u testovaných materiálů. Naměřená data jsou graficky znázorněná na Obr. 16. Z hodnot je patrné, že působení 80 °C na vzorky má za následek snížení pevnosti v tahu u materiálu ASA, CO-PET a PET-G. Nejvíce náchylný materiál na vysokou teplotu je CO-PET, kdy po 35 dnech došlo ke snížení pevnosti v tahu o 73,2 %. Nejvíce odolný materiál vůči vysoké teplotě je ABS. U tohoto materiálu došlo pouze k minimální změně pevnosti v tahu, a to ke snížení o 2,6 %, po 35 dnech při působení 80 °C teploty. U látek ASA a PET-G došlo k poklesu pevnosti v tahu mezi 0. a 7. dnem o 19,6 % (ASA) a 18,6 % (PET-G). Následně již nedošlo k zásadním změnám, a tedy mezi 7. a 35. dnem se hodnota pevnosti v tahu ustálila na hodnotách 38 N·mm⁻² pro materiál ASA a 48 N·mm⁻² pro PET-G.

Tabulka 4 - Vliv teploty na pevnost v tahu

Materiál	Pevnost v tahu R_m [N·mm ⁻²]					
	Počet dní					
	0	7	14	21	28	35
ABS	38 ± 0,43	39 ± 0,4	38 ± 0,86	37 ± 1,42	40 ± 1,55	37 ± 2,3
ASA	51 ± 0,49	41 ± 1,21	41 ± 0,6	40 ± 0,47	35 ± 0,70	38 ± 0,25
CO-PET	71 ± 0,2	57 ± 3,88	47 ± 3,52	33 ± 2,41	21 ± 4,19	19 ± 2,97
PET-G	59 ± 0,84	48 ± 1,17	46 ± 1,62	46 ± 0,68	47 ± 2,27	48 ± 3,98



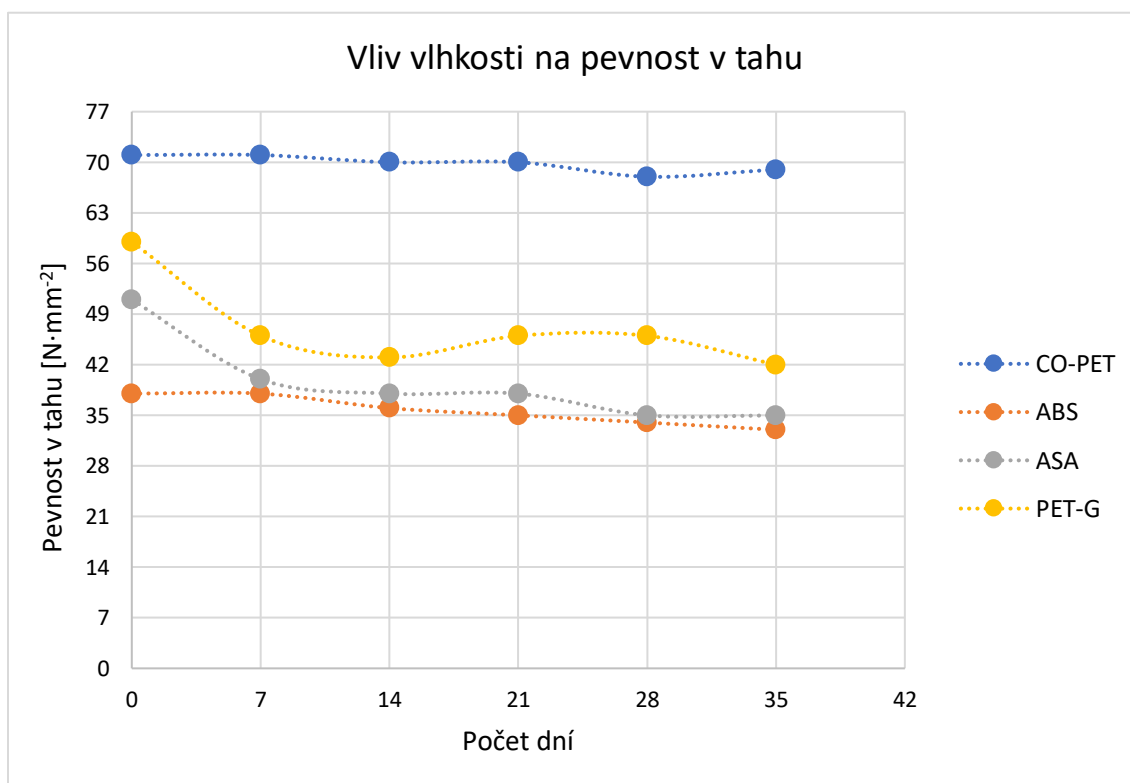
Obrázek 16 - Vliv teploty na pevnost v tahu

4.3 Vliv vlhkosti na pevnost v tahu

Testované materiály byly vystaveny 85% vlhkosti při pokojové teplotě. Následky degradačních procesů způsobených těmito podmínkami na změně pevnosti v tahu jsou zobrazeny v Tab. 5 a Obr. 17. Z hodnot je patrné, že nejméně odolnými látkami vůči vlhkosti jsou ASA a PET-G. U těchto látek došlo po 35 dnech ke snížení pevnosti v tahu o 31,4 % (ASA) a 28,8 % (PET-G) oproti stavu před zahájením experimentu. Nejvíce odolný materiál vůči vlhkosti je CO-PET, u kterého došlo pouze k 2,8% zmenšení pevnosti v tahu za 35 dní. Materiál ABS vykázal 13,2% snížení pevnosti v tahu po 35 dnech.

Tabulka 5 - Vliv vlhkosti na pevnost v tahu

Materiál	Pevnost v tahu R_m [N·mm ⁻²]					
	Počet dní					
	0	7	14	21	28	35
ABS	38 ± 0,43	38 ± 0,35	36 ± 1,2	35 ± 1,58	34 ± 1,44	33 ± 0,99
ASA	51 ± 0,49	40 ± 0,57	38 ± 0,62	38 ± 0,38	35 ± 0,26	35 ± 0,63
CO-PET	71 ± 0,2	71 ± 0,61	70 ± 1,53	70 ± 0,73	68 ± 0,3	69 ± 1,44
PET-G	59 ± 0,84	46 ± 1,44	43 ± 1,9	46 ± 1,28	46 ± 2,69	42 ± 1,88



Obrázek 17 - Vliv vlhkosti na pevnost v tahu

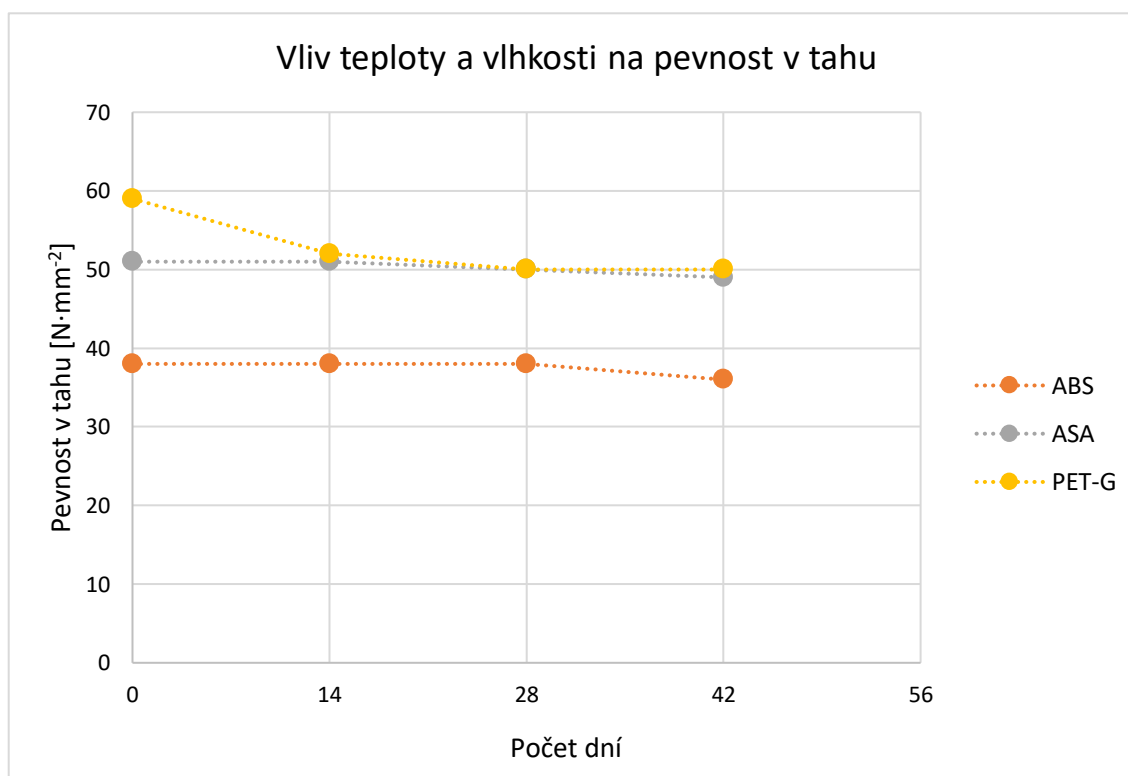
4.4 Vliv součinného působení tepla a vlhkosti na pevnost v tahu

Vlastní výsledky naměřených hodnot pevností v tahu ukazující degradační vliv způsobený teplotou a vlhkostí na materiálech ABS, ASA a PET-G v průběhu 42 dnů jsou uvedeny v Tab. 6 a graficky znázorněny na Obr. 18. Současné působení teploty 80 °C a 80% vlhkosti na materiály vedlo ke snížení pevnosti v tahu u všech testovaných látek, ale s rozdílným účinkem. Degradačním vlivům nejvíce podléhá materiál PET-G, u kterého došlo k poklesu pevnosti v tahu vůči vzorku nepodrobenému degradaci o 15,3 % za 42 dní. Nejvíce odolné materiály vůči současnému působení teploty a vlhkosti jsou ABS a ASA. U obou došlo po

42 dnech pouze k nepatrnému snížení pevnosti v tahu o 2 N·mm⁻². Materiál CO-PET nebyl tomuto degradačnímu prostředí podroben, protože v době testování nebyl k dispozici.

Tabulka 6 - Vliv teploty a vlhkosti na pevnost tahu

Materiál	Pevnost v tahu R_m [N·mm ⁻²]			
	Počet dní			
	0	14	28	42
ABS	38 ± 0,43	38 ± 0,93	38 ± 0,83	36 ± 0,76
ASA	51 ± 0,49	51 ± 0,17	50 ± 0,54	49 ± 0,7
PET-G	59 ± 0,84	52 ± 3,45	50 ± 1,6	50 ± 2,92



Obrázek 18 - Vliv teploty a vlhkosti na pevnost v tahu

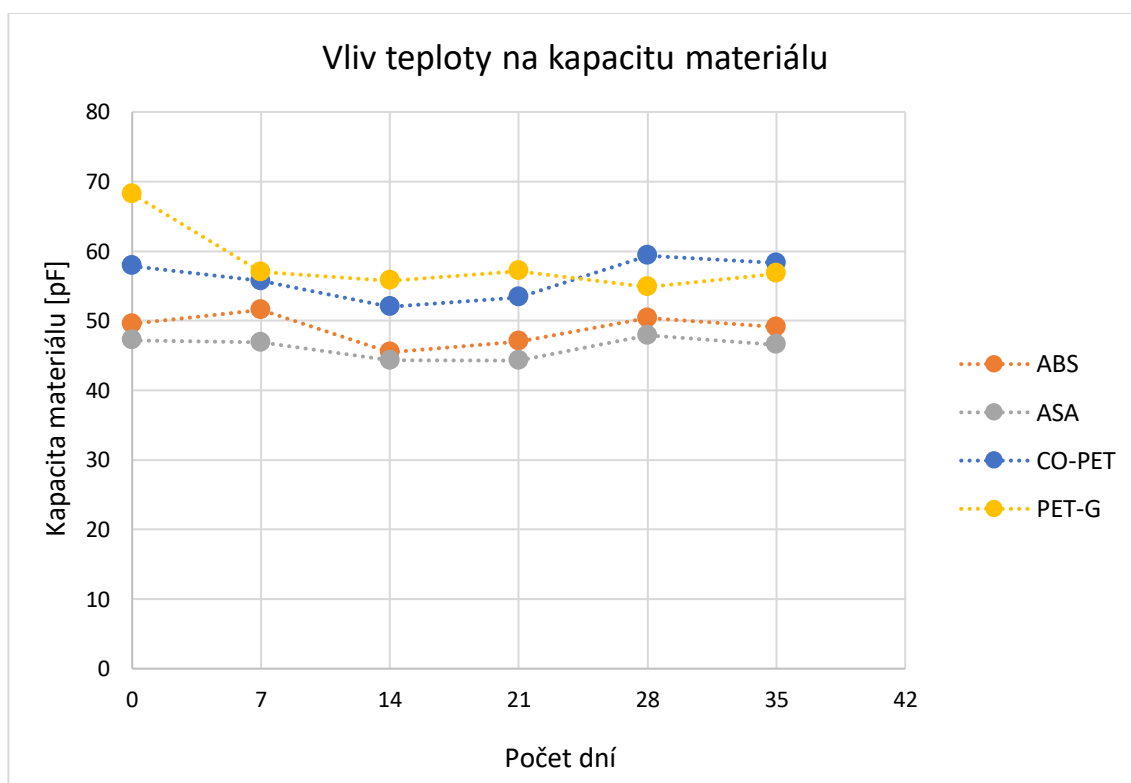
4.5 Vliv teploty na kapacitu materiálu

V Tab. 7 a Obr. 19 jsou uvedeny naměřené hodnoty kapacit degradovaných vzorků. Degradační proces byl vyvolán teplotou 80 °C s minimální vlhkostí vzduchu. V prvních 14 dnech klesá elektrická kapacita u všech materiálů v rozmezí od 8,2 % pro ABS až do 18,3 % u PET-G. V dalších dnech již pokles C_x není výrazný, a naopak se zvyšuje, s tím, že po 35 dnech kapacita u všech materiálů s výjimkou PET-G, dosáhla téměř výchozích hodnot. Rozptyl hodnot

jednotlivých měření spíše ukazuje na nepřesnost měření. Pouze u materiálu PET-G došlo po 35 dnech ke změně kapacity z hodnoty 68,22 na 56,77 pF, což představuje pokles o 16,8 %.

Tabulka 7 - Vliv teploty na kapacitu materiálu

Materiál	Kapacita C_x [pF]					
	0	7	14	21	28	35
ABS	49,52 ± 1,62	51,55 ± 3,23	45,46 ± 3,18	47,01 ± 1,5	50,36 ± 2,93	49,09 ± 3,24
ASA	47,21 ± 1,24	46,85 ± 2,01	42,94 ± 2,12	44,27 ± 1,60	47,9 ± 2,51	46,53 ± 1,98
CO-PET	57,86 ± 5,21	55,71 ± 2,12	52,00 ± 4,29	53,37 ± 4,1	59,33 ± 5,94	58,28 ± 8,38
PET-G	68,22 ± 5,14	56,98 ± 9,25	55,74 ± 7,02	57,14 ± 7,06	54,84 ± 3,55	56,77 ± 3,26



Obrázek 19 - Vliv teploty na kapacitu materiálu

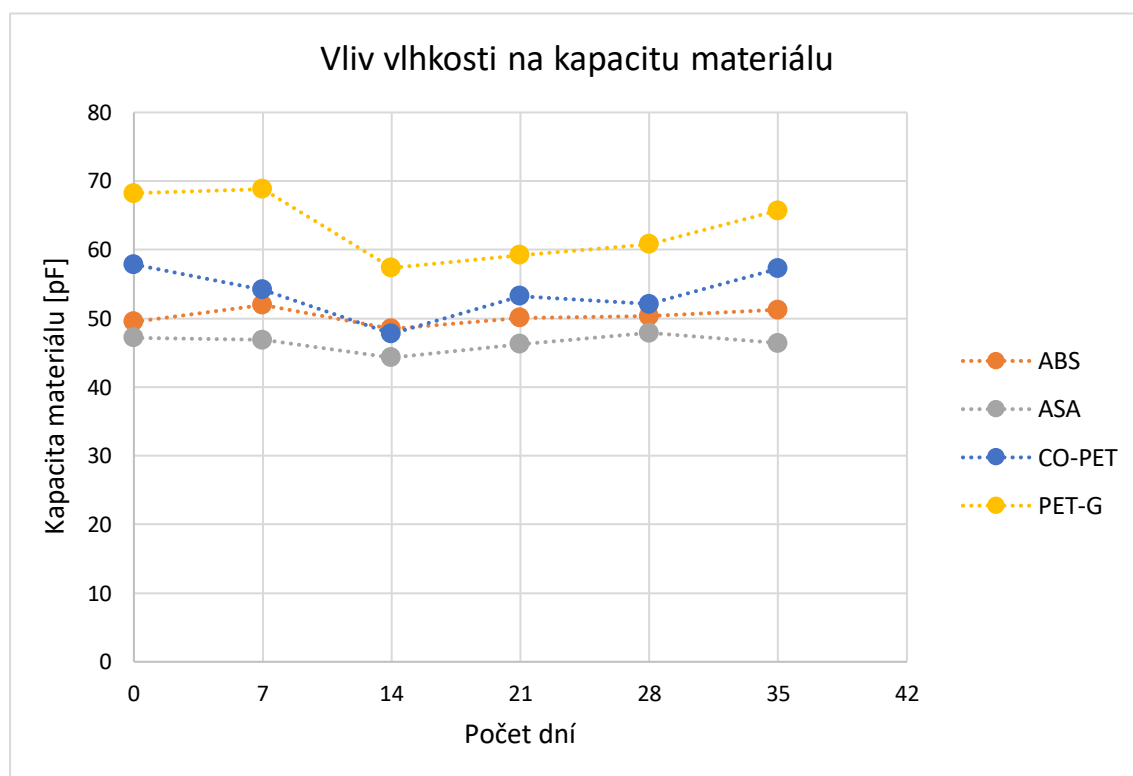
4.6 Vliv vlhkosti na kapacitu materiálu

85% vlhkost při pokojové teplotě v průběhu 35 dnů neovlivnila měřenou kapacitu materiálu ASA, ABS a CO-PET a hodnoty se pohybují v rámci chyby měření (Tab. 8, Obr. 20). Pokles kapacit všech vzorků stanovených 14. den pravděpodobně nemusel být způsoben změnou v materiálu, ale dobou, kdy byla měřena kapacita od vyjmutí vzorků z klimatické komory. Z důvodu nefunkčnosti měřícího přístroje a prodlevě v délce 3 hodin, pravděpodobně došlo

k opětovnému vysušení materiálu, a tím ke snížení permitivity. Změnu permitivity v závislosti na obsahu vlhkosti v materiálu popsal Keating 1991 [21], kdy se zvyšujícím se obsahem vody ve vnitřní struktuře vzorku vzrůstá permitivita materiálu a opačně. Vztah mezi kapacitou a permitivitou uvádí vzorec (8).

Tabulka 8 - Vliv vlhkosti na kapacitu materiálu

Materiál	Kapacita C_x [pF]					
	Počet dní					
	0	7	14	21	28	35
ABS	49,52 ± 1,62	51,96 ± 3,88	48,48 ± 5,38	50,08 ± 4,54	50,33 ± 3,02	51,24 ± 0,17
ASA	47,21 ± 1,24	46,85 ± 2,01	44,29 ± 2,79	46,27 ± 1,6	47,9 ± 2,51	46,41 ± 5,67
CO-PET	57,86 ± 5,21	54,19 ± 5,45	47,77 ± 3,68	53,25 ± 3,29	52,07 ± 3,73	57,25 ± 6,41
PET-G	68,22 ± 5,14	68,83 ± 5,62	57,36 ± 3,37	59,21 ± 3,15	60,82 ± 3,03	65,7 ± 3,97



Obrázek 20 - Vliv vlhkosti na kapacitu materiálu.

4.7 Vliv součinného působení tepla a vlhkosti na kapacitu materiálu

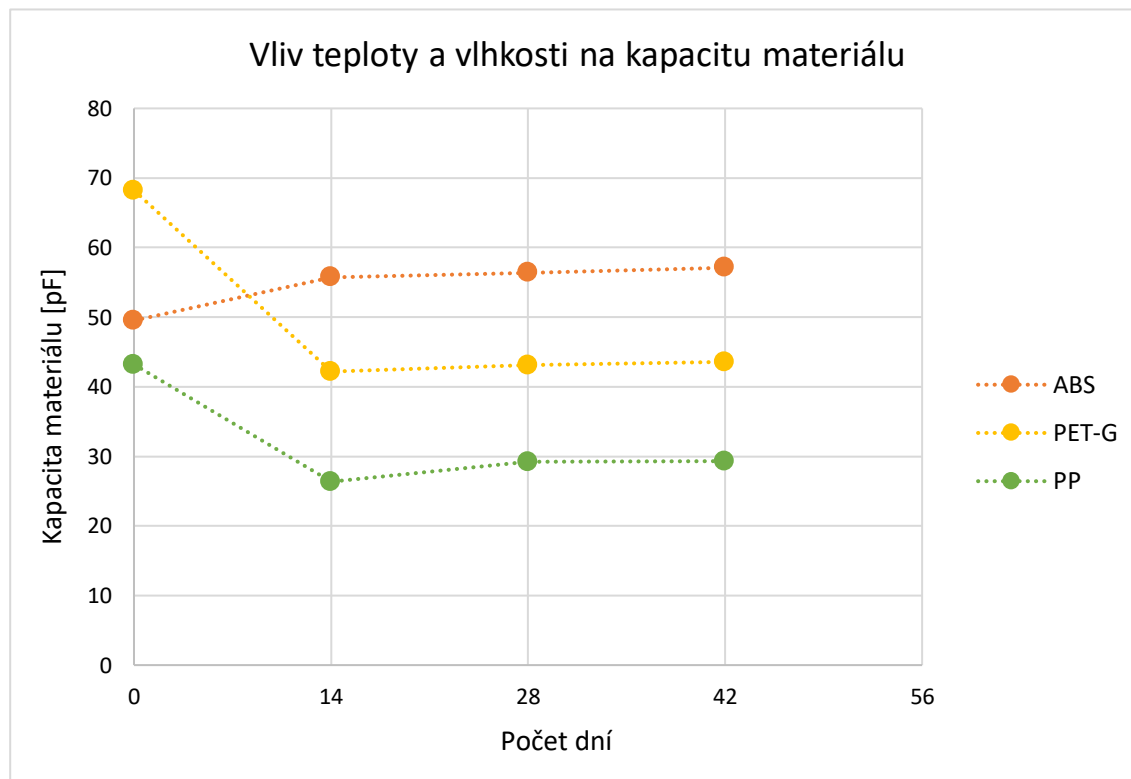
Souběžné působení tepla (80 °C) a vlhkosti (80 %) bylo měřeno na materiálech ABS, PET-G a PP ve 14 denních intervalech. Materiál CO-PET nebyl tomuto degradačnímu prostředí

podroben, protože v době testování nebyl ještě k dispozici. Naměřené hodnoty C_x jsou graficky zobrazeny na Obr. 21 a Tab. 9. Nejméně odolný materiál vůči současnému působení vody a teploty kromě PLA (viz. Výsledky, Kap. 4.1) je PET-G a PP. U nich došlo mezi 1. až 14. dnem k výrazným poklesům kapacit o 39 % (PP) a o 38,2 % (PET-G). Následně u obou materiálů došlo mezi 14. a 42. dnem k malému vzrůstu kapacit o 2,94 pF (PP) a 1,38 pF (PET-G). Nicméně výsledný pokles po 42 dnech představuje snížení kapacity o 32,2 % (PP) a 36,1 % (PET-G).

Odišné chování projevil vzorek vytištěný z materiálu ABS, u kterého došlo k postupnému zvyšování kapacity po celou dobu degradace z výchozí hodnoty 49,52 pF až k 57,1 pF. U materiálu ABS souběžné působení teploty a vlhkosti zvýšilo kapacitu o 15,3 %.

Tabulka 9 - Vliv teploty a vlhkosti na kapacitu materiálu

Materiál	Kapacita C_x [pF]			
	Počet dní			
	0	14	28	42
ABS	49,52 ± 1,6	55,72 ± 2,14	56,38 ± 5,22	57,1 ± 4,4
PET-G	68,22 ± 5,1	42,18 ± 2,66	43,1 ± 3,76	43,56 ± 4,27
PP	43,2 ± 0,9	26,36 ± 3,19	29,2 ± 1,48	29,3 ± 2,84



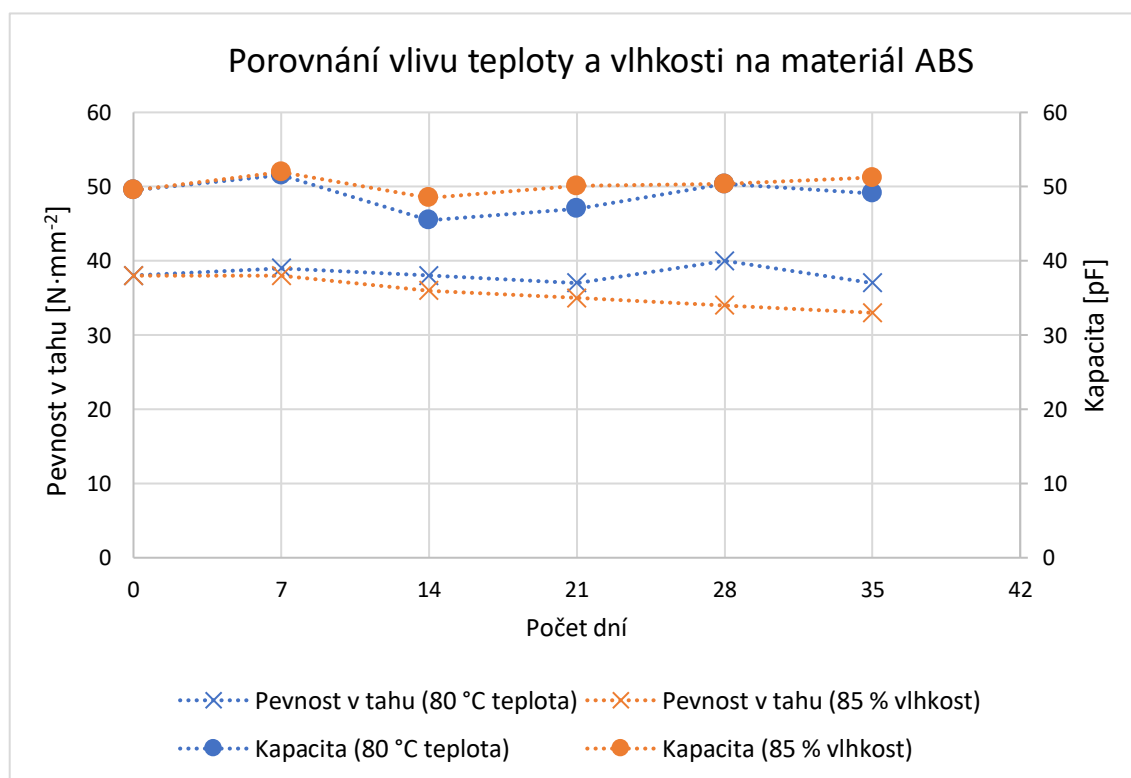
Obrázek 21 - Vliv teploty a vlhkosti na kapacitu materiálu

4.8 Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ABS

Při porovnání degradačního vlivu způsobeného teplem a vlhkostí na pevnost v tahu i kapacitu u materiálu ABS se ukázalo, že oba dva degradační činitelé výrazně neovlivňují vlastnosti materiálu. Pouze 85% vlhkost snižuje pevnost v tahu o 13,2 % po 35 dnech a současně dochází ke zvýšení kapacity o 3,4 %. Ačkoliv ABS je velice odolný vůči teplotě 80 °C nebo 85% vlhkosti, v porovnání s ostatními materiály viz. Tab. 3. má nejnižší mechanickou odolnost a nejnižší kapacitu. Naměřené hodnoty dokládající vlastnosti materiálu ABS jsou uvedeny v Tab. 10 a graficky zobrazeny na Obr. 22.

Tabulka 10 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ABS

		Materiál ABS					
Degradační vliv	Hodnocený parametr	Počet dní					
		0	7	14	21	28	35
Teplota 80 °C	R_m [N·mm ⁻²]	38 ± 0,43	39 ± 0,4	38 ± 0,86	37 ± 1,42	40 ± 1,55	37 ± 2,3
Vlhkost 85 %	R_m [N·mm ⁻²]	38 ± 0,43	38 ± 0,35	36 ± 1,2	35 ± 1,58	34 ± 1,44	33 ± 0,99
Teplota 80 °C	C_x [pF]	49,52 ± 1,62	51,55 ± 3,23	45,46 ± 3,18	47,01 ± 1,5	50,36 ± 2,93	49,09 ± 3,24
Vlhkost 85 %	C_x [pF]	49,52 ± 1,62	51,96 ± 3,88	48,48 ± 5,38	50,08 ± 4,54	50,33 ± 3,02	51,21 ± 0,17



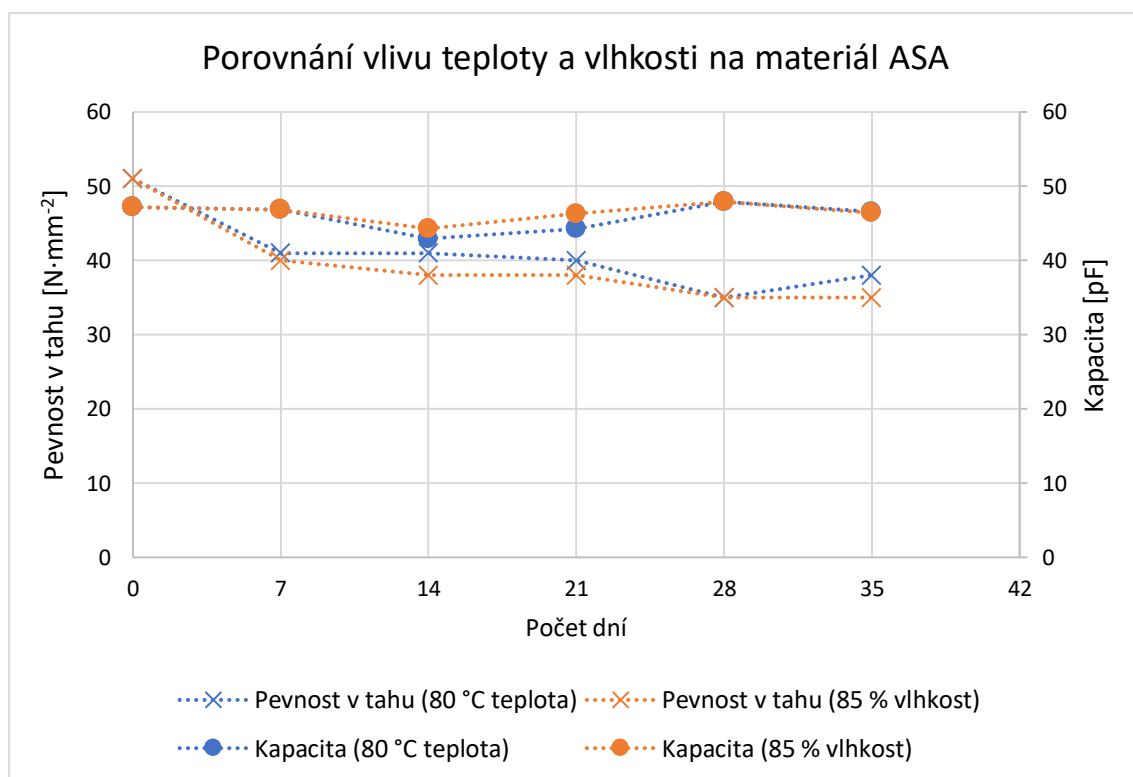
Obrázek 22 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ABS

4.9 Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ASA

Vystavení materiálu ASA teplotě 80 °C nebo 85% vlhkosti se projevilo změnou mechanické vlastnosti, pevnosti v tahu, v případě působení teploty došlo ke snížení hodnoty R_m z $51 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ na $38 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a v případě působení vlhkosti na $35 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ (Tab. 11, Obr. 23). Pevnost v tahu poklesla v obou případech v rozmezí 25,5 – 31,4 %. Působení teploty a vlhkosti nemá výrazný vliv na kapacitu materiálu a tato měřená veličina se v průběhu 35 dní pohybuje kolem průměrné hodnoty 45.95 pF s 5% odchylkou.

Tabulka 11 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ASA

		Materiál ASA					
Degradální vliv	Hodnocený parametr	Počet dní					
		0	7	14	21	28	35
Teplota 80 °C	R_m [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]	$51 \pm 0,49$	$41 \pm 1,21$	$41 \pm 0,6$	$40 \pm 0,47$	$35 \pm 0,70$	$38 \pm 0,25$
Vlhkost 85 %	R_m [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]	$51 \pm 0,49$	$40 \pm 0,57$	$38 \pm 0,62$	$38 \pm 0,38$	$35 \pm 0,26$	$35 \pm 0,36$
Teplota 80 °C	C_x [pF]	$47,21 \pm 1,24$	$46,85 \pm 2,01$	$42,94 \pm 2,12$	$44,27 \pm 1,60$	$47,9 \pm 2,51$	$46,53 \pm 1,98$
Vlhkost 85 %	C_x [pF]	$47,21 \pm 1,24$	$46,85 \pm 2,01$	$44,29 \pm 2,79$	$46,27 \pm 1,6$	$47,9 \pm 2,51$	$46,41 \pm 5,67$



Obrázek 23 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ASA

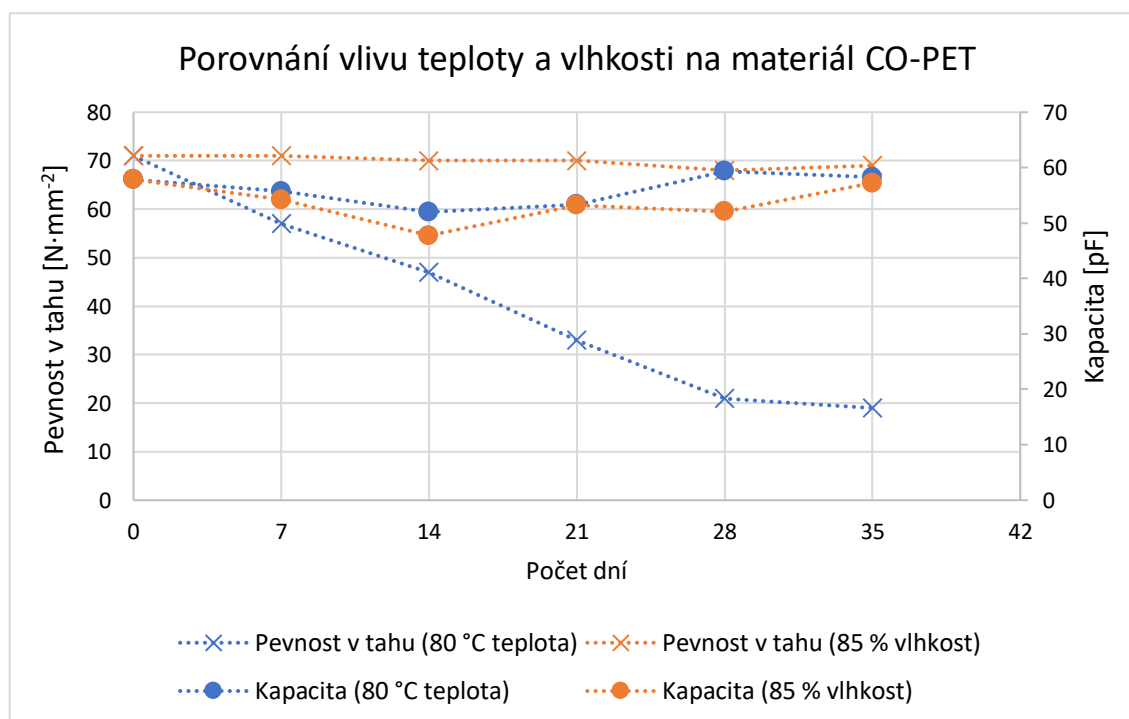
4.10 Porovnání vlivu tepla a vlhkosti na materiál CO-PET

Nejvíce rozdílnou odolnost vůči teplotě a vlhkosti má materiál CO-PET. Obr. 24 ukazuje, že 85% vlhkost nemá vliv na pevnost v tahu. V případě působení vlhkosti došlo pouze k 2,8% snížení pevnosti v tahu. Ale pokud je materiál vystaven teplotě 80 °C dojde k výraznému poklesu pevnosti v tahu. Za 35 dní se zmenšila pevnost v tahu 3,7krát oproti původní hodnotě, poklesla o 73,2 % (Tab. 12).

Z průběhu hodnot kapacit (Tab. 12 a Obr. 24) je patrné, že působení teploty a vlhkosti neovlivňuje kapacitu a naměřené rozdíly jsou nejspíše důsledkem chyby měření.

Tabulka 12 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál CO-PET

		Materiál CO-PET					
Degradací vliv	Hodnocený parametr	Počet dní					
		0	7	14	21	28	35
Teplota 80 °C	R_m [N·mm ⁻²]	71 ± 0,2	57 ± 3,88	47 ± 3,52	33 ± 2,41	21 ± 4,19	19 ± 2,97
Vlhkost 85 %	R_m [N·mm ⁻²]	71 ± 0,2	71 ± 0,61	70 ± 1,53	70 ± 0,73	68 ± 0,3	69 ± 1,44
Teplota 80 °C	C_x [pF]	57,86 ± 5,21	55,71 ± 2,12	52,00 ± 4,29	53,37 ± 4,1	59,33 ± 5,94	58,28 ± 8,38
Vlhkost 85 %	C_x [pF]	57,86 ± 5,21	54,19 ± 5,45	47,77 ± 3,68	53,25 ± 3,29	52,07 ± 3,73	57,25 ± 6,41



Obrázek 24 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál CO-PET

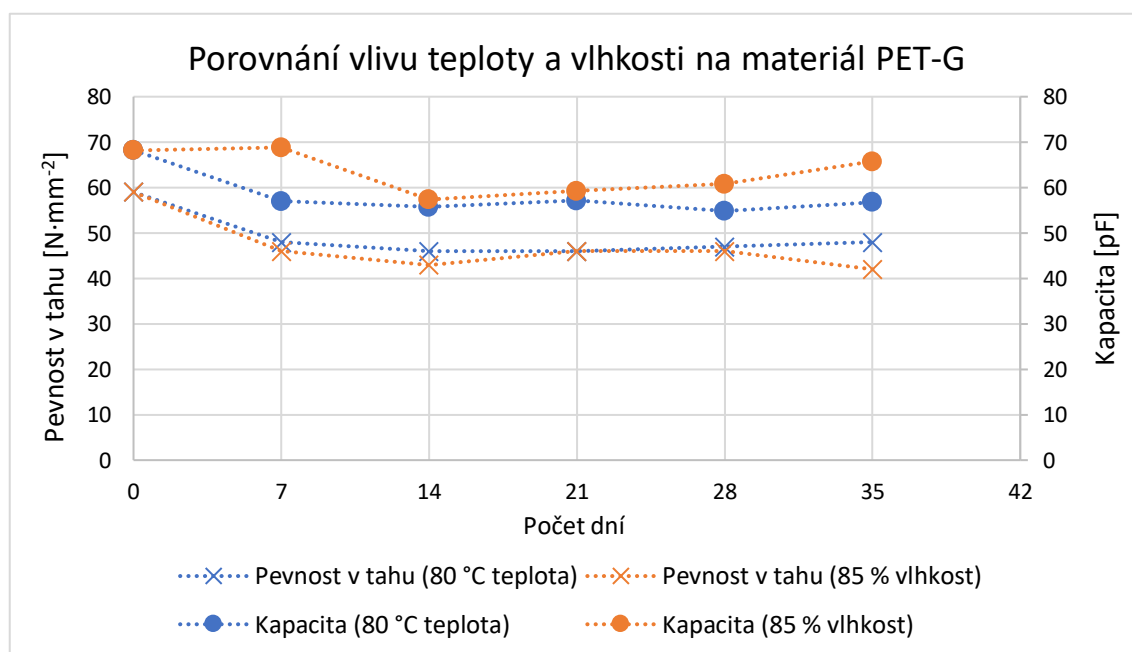
4.11 Porovnání vlivu tepla a vlhkosti na materiál PET-G

Jak v případě působení teploty 80 °C, tak při vystavení 85% vlhkosti došlo mezi 0. a 7. dnem k největšímu poklesu pevnosti v tahu (Tab. 13, Obr. 25), který činí 18,6 % (teplota) a 22 % (vlhkost). Následně se pevnost v tahu materiálu PET-G mezi 7. až 35. dnem ustálila na průměrné hodnotě 47 N·mm⁻² (teplota) s odchylkou 1 N·mm⁻².

Z hodnot kapacit při vystavení materiálu 80 °C je patrné, že mezi 0. a 7. dnem došlo k největšímu poklesu kapacity. Nicméně tato hodnota je ale zatížena velkou chybou měření, převyšující 16 %. Kapacita PET-G se po 35 dnech snížila z výchozí hodnoty 68,22 pF na 56,77 pF. Působení teploty snížilo kapacitu o 16,8 %. Vystavení materiálu 85% vlhkosti se projevilo poklesem kapacity až od 7. dne. Mezi 7. a 28. dnem došlo k poklesu kapacity o 11,6 %. V závěru experimentu dosáhla kapacita hodnoty 65,7 pF, což představuje 3,7 % snížení oproti výchozí hodnotě 68,22 pF.

Tabulka 13 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál PET-G

		Materiál PET-G					
Degradací vliv	Hodnocený parametr	Počet dní					
		0	7	14	21	28	35
Teplota 80 °C	R _m [N·mm ⁻²]	59 ± 0,84	48 ± 1,17	46 ± 1,62	46 ± 0,68	47 ± 2,27	48 ± 3,98
Vlhkost 85 %	R _m [N·mm ⁻²]	59 ± 0,84	46 ± 1,44	43 ± 1,9	46 ± 1,28	46 ± 2,69	42 ± 1,88
Teplota 80 °C	C _x [pF]	68,22 ± 5,14	56,98 ± 9,25	55,74 ± 7,02	57,14 ± 7,06	54,84 ± 3,55	56,77 ± 3,26
Vlhkost 85 %	C _x [pF]	68,22 ± 5,14	68,83 ± 5,62	57,36 ± 3,37	59,21 ± 3,15	60,82 ± 3,03	65,7 ± 3,97



Obrázek 25 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál PET-G

5 Závěr

Cílem práce bylo studium "Degradace materiálů používaných pro technologii 3D tisku". V teoretické části byl popsán vývoj a princip 3D tisku a základní technologické postupy této moderní technologie. Jsou zde detailně shrnuty informace o jednotlivých materiálech, se kterými pracuje technologie FDM, jejich výhody i nevýhody. V další kapitole byl popsán proces degradace polymerů a uvedeny základní degradační činitelé.

V rámci praktické části byly vytisknuty vzorky z materiálů ABS, ASA, CO-PET, PET-G, PLA a PP na 3D tiskárně Prusa I3 MK3. Tyto vzorky byly umístěny do klimatických komor a ve zvolených intervalech se provedla měření pevnosti v tahu a elektrické kapacity. Naměřená data byla následně zpracována a z jejich hodnot určeno, jak se projevila degradace na pevnosti v tahu a elektrické kapacitě materiálu před a po vystavení materiálu degradačním vlivům.

Výsledky vlastní práce jsou rozděleny do tří kapitol, z pohledu vyhodnocení jednotlivých degradačních vlivů; teploty 80 °C a 85% vlhkosti na testované vzorky, které podléhaly degradaci po dobu 35 dnů. Současný vliv teploty (80 °C) a vlhkosti (80 %) na materiály byl sledován po dobu 42 dnů.

Na testované podmínky byl nejméně odolný materiál PLA. U tohoto biologicky rozložitelného produktu vytvořeného z rostlinných materiálů se projevila tak značná míra znehodnocení již po prvním týdnu měření, kdy došlo k rozpadnutí vzorků, že nebylo ani možné provést více zkoušek. Použití PLA pro aplikace, které by byly vystaveny teplotě vyšší než 80 °C a vlhkosti je nevhodné. Zároveň ale vysoká míra degradovatelnosti může být považována za pozitivní vlastnost z ekologického pohledu.

Naopak nejodolnější materiál vůči testovaným podmínkám je materiál ABS, amorfnní termoplastický kopolymer (heteropolymer), vznikající ze styrenu a akrylonitrilu. Materiál ABS s hodnotou pevnosti v tahu $38 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ sice nepatří mezi nejvíce mechanicky odolné, ale projevilo se u něj jen mírné zhoršení pevnosti v tahu, snížení o 2,6 % při 80 °C a 13,2 % snížení při 80% vlhkosti. Při současném působení vlhkosti i teploty na ABS vzrostla kapacita o 15,3 %.

Materiál CO-PET (kopolyester) má největší pevnost v tahu z testovaných látek s hodnotou $71 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, ale jeho odolnost vůči klimatickým podmínkám, kromě materiálu PLA, je nejhorší. Pevnost v tahu poklesla o 73,2 % (při teplotě 80 °C) oproti vzorku, který nebyl vystaven klimatickým podmínkám.

Z výsledků této práce je patrné, že zvolené degradační podmínky nemají zásadní vliv na elektrickou kapacitu většiny testovaných materiálů. Pouze v součinnosti teploty 80 °C a 80% vlhkosti došlo u materiálů PET- G, ze skupiny polyesterů, a PP, ze skupiny polyolefinů, ke snížení hodnot kapacit o 38 a 39 %. Materiál PET-G také vykázal 18% snížení kapacity při 80 °C.

V této práci se podařilo změřit základní vlastnosti, tj. pevnost v tahu a elektrickou kapacitu materiálů (filamentů) používaných pro 3D tisk metodou FDM.

Problematickou otázkou, kterou by bylo třeba vyřešit před dalšími ověřovacími pokusy, je metoda měření kapacity materiálu a ztrátového činitele $\tan \delta$. Nerovnost povrchu tisknutých vzorků a jejich následné umístění mezi elektrody, kdy nemuselo dojít k úplnému kontaktu a tím rovnoměrnému rozložení elektrického náboje na povrch vzorku, může být důvodem velkých odchylek při měření elektrických vlastností.

6 Citovaná literatura

- [1] C. W. Hull, „Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography“. Patent US4575330A, 8 8 1984.
- [2] C. Lonjon, „Sculpteo,“ 1 3 2017. [Online]. Available: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>. [Přístup získán 27 12 2018].
- [3] Chee Kai Chua, Kah Fai Leong a Chu Sing Lim, Rapid Prototyping: Principles and Applications, 2003, p. 124.
- [4] „PROSPECTOR,“ [Online]. Available: <https://plastics.ulprospector.com/generics/1/c/t/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-properties-processing>. [Přístup získán 26 9 2018].
- [5] „Waybackmachine,“ DynalabCorp, 2010. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20100515054832/http://www.dynalabcorp.com/technical_info_abs.asp. [Přístup získán 26 9 2018].
- [6] „Plastic Systems,“ [Online]. Available: <http://tiefziehen.com/cz/ABS>. [Přístup získán 13 9 2018].
- [7] M. Jamshidian, E. A. Tehrany, M. Imran, M. Jacquot a S. Desobry, „Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies,“ 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x>. [Přístup získán 20 9 2018].
- [8] J. Vosynková, „Materialpro3d,“ Solidify 3D, s.r.o., [Online]. Available: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>. [Přístup získán 20 9 2018].
- [9] „Ultimaker B.V.,“ 16 5 2017. [Online]. Available: <https://ultimaker.com/download/67830/TDS%20PP%20v1.006-cze.pdf>. [Přístup získán 20 9 2018].
- [10] I. Kudláček, Degradální procesy I, 1994.
- [11] J. Clark, „Polyamides,“ Chemguide, 2015. [Online]. Available: <http://www.chemguide.co.uk/organicprops/amides/polyamides.html>. [Přístup získán 12 9 2018].
- [12] J. Vosynková, „Materialpro3d,“ Solidify 3D, s.r.o., [Online]. Available: <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/nylon-pa12-cerny-1-75mm-750g-fiberlogy/>. [Přístup získán 12 9 2018].
- [13] V. R. Sastri, Plastics in Medical Devices, 2010.
- [14] J. Vosynková, „Materialpro3d,“ Solidify 3D, s.r.o., [Online]. Available: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>. [Přístup získán 20 9 2018].
- [15] V. Koblížek, Vlastnosti a technologie materiálů, 2004.

- [16] Z. Moravec, „Degradace plastů,“ [Online]. Available: <http://vyuka.z-moravec.net/download/download/koroze-plastu.pdf>. [Přístup získán 02 12 2018].
- [17] L. Běhálek, Polymery, 2015.
- [18] „Degradace stavebních materiál,“ [Online]. Available: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/DSM/DSM_10.pdf. [Přístup získán 02 12 2018].
- [19] L. Zeman, „Vstřikování plastů, teorie a praxe,“ 2018.
- [20] „Deform,“ [Online]. Available: <http://trhacka.cz/>. [Přístup získán 10 04 2019].
- [21] M. Keating, „Moisture Content in Polymers- Estimated by Dielectrometry,“ 1991. [Online]. Available: <http://www.tainstruments.com/pdf/literature/TA124.pdf>. [Přístup získán 03 05 2019].

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Polymerizační proces polyesterů [13].....	14
Obrázek 2 - Nepocházející dielektrikum	15
Obrázek 3 - Polární dielektrikum.....	16
Obrázek 4 - Určení ztrátového úhlu δ	18
Obrázek 5 - Určení ztrátového činitele $\tan \delta$	18
Obrázek 6 - Technologický náčrt vzorku pro měření elektrických vlastností.....	25
Obrázek 7 - Výplň vzorku pro měření kapacity a ztrátového činitele.....	26
Obrázek 8 - Technologický náčrt vzorku pro měření mechanických vlastností.....	26
Obrázek 9 - Výplň vzorku pro měření mechanických vlastností	26
Obrázek 10 - Trhačka použitá pro měření pevnosti v tahu R_m , [20].....	27
Obrázek 11 - Schéma pracoviště pro měření kapacity a ztrátového činitele	27
Obrázek 12 - Klimatická komora CTS.....	28
Obrázek 13 - Teplotní komora Memmert.....	29
Obrázek 14 - Vlhkostní komora – exsikátor.....	29
Obrázek 15 - Degradace materiálu PLA po jednom týdnu; ABS (levá strana) a PLA (pravá strana).....	31
Obrázek 16 - Vliv teploty na pevnost v tahu	32
Obrázek 17 - Vliv vlhkosti na pevnost v tahu	33
Obrázek 18 - Vliv teploty a vlhkosti na pevnost v tahu	34
Obrázek 19 - Vliv teploty na kapacitu materiálu	35
Obrázek 20 - Vliv vlhkosti na kapacitu materiálu.	36
Obrázek 21 - Vliv teploty a vlhkosti na kapacitu materiálu	37
Obrázek 22 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ABS	38

Obrázek 23 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ASA	39
Obrázek 24 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál CO-PET	40
Obrázek 25 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál PET-G.....	41

8 Seznam tabulek

Tabulka 1- Vybrané referenční hodnoty využitých materiálů	24
Tabulka 2 - Použité parametry při tisku vzorků	25
Tabulka 3 - Referenční hodnoty vzorků	30
Tabulka 4 - Vliv teploty na pevnost v tahu	31
Tabulka 5 - Vliv vlhkosti na pevnost v tahu	33
Tabulka 6 - Vliv teploty a vlhkosti na pevnost tahu	34
Tabulka 7 - Vliv teploty na kapacitu materiálu.....	35
Tabulka 8 - Vliv vlhkosti na kapacitu materiálu	36
Tabulka 9 - Vliv teploty a vlhkosti na kapacitu materiálu.....	37
Tabulka 10 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ABS.....	38
Tabulka 11 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál ASA	39
Tabulka 12 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál CO-PET.....	40
Tabulka 13 - Porovnání vlivu teploty a vlhkosti na materiál PET-G	41