

Projekt využití 3D tisku pro výrobu atypických součástí

Bc. František Dynka

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta managementu a ekonomiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta managementu a ekonomiky
Ústav průmyslového inženýrství a informačních systémů

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. František Dynka
Osobní číslo: M200304
Studijní program: N0488P050002 Průmyslové inženýrství
Forma studia: Kombinovaná
Téma práce: Projekt využití 3D tisku pro výrobu atypických součástí

Zásady pro vypracování

Úvod

Definujte cíle práce a použité metody zpracování práce.

I. Teoretická část

- Zpracujte teoretické poznatky z oblasti aditivních technologií, polymerních materiálů a mechanických zkoušek.

II. Praktická část

- Navrhněte, vyrobte a vystavte degradačním vlivům normalizované vzorky a proveďte mechanickou zkoušku statickou tahem.
- Proveďte zpracování a vyhodnocení působení degradačních vlivů u testovaných materiálů.
- Navrhněte východiska pro využití 3D tisku a zhodnotte ekonomické přínosy projektu.

Závěr

Rozsah diplomové práce: **cca 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- DOSKOČIL, Radek. *Metody, techniky a nástroje řízení projektů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 165 s. ISBN 9788072048632.
- GEBHARDT, Andreas, Julia KESSLER a Laura THURN. *3D printing: understanding additive manufacturing*. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, 2019, 204 s. ISBN 9781569907023.
- KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017, 211 s. ISBN 978-80-251-4876-1.
- MCKEEN, Laurence W. *The effect of UV light and weather on plastics and elastomers*. 3rd edition. Amsterdam: Elsevier, 2013, 388 s. ISBN 9781455728510.
- SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, 444 s. ISBN 978-1-4987-1477-8.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Ústav průmyslového inženýrství a informačních systémů

Datum zadání diplomové práce: **11. února 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. dubna 2022**

L.S.

prof. Ing. David Tuček, Ph.D.
děkan

prof. Ing. David Tuček, Ph.D.
garant studijního programu

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na elektronickém nosiči v příruční knihovně Fakulty managementu a ekonomiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

1. že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
2. že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

Jméno a příjmení: František Dynka

.....

podpis diplomanta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá projektovým řešením využití 3D tisku pro výrobu atypických součástí. Teoretická část práce byla zpracována formou rešerše z odborných článků a literatury z oblasti aditivních technologií, polymerních materiálů, mechanických zkoušek a projektového řízení. V praktické části práce byly normalizované zkušební vzorky zhotovené technologií Fused Filament Fabrication vystaveny vybraným degradačním vlivům a následně testovány tahovou zkouškou. Z vyhodnocených parametrů (meze pevnosti, modulu pružnosti a tažnosti) byly navrženy východiska pro využití 3D tisku k výrobě atypických součástí. V závěru byl ve vybrané společnosti zpracován projekt pro využití technologie 3D tisku s jeho ekonomickými přínosy.

Klíčová slova: 3D tisk, degradace polymerů, výroba atypických součástí, Fused Filament Fabrication, aditivní materiál, testování, mechanická zkouška statická tahem.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the project solution of using 3D printing for the production of atypical parts. The theoretical part of the thesis was prepared in the form of a search of articles and literature from the field of additive technologies, polymer materials, mechanical testing and project management. In the practical part of the work, standardized test specimens made by Fused Filament Fabrication technology were exposed to selected degradation effects and subsequently tested by the tensile test. From the evaluated parameters (ultimate strength, modulus of elasticity and ductility), a basis for the use of 3D printing for the production of atypical parts was proposed. Finally, a project for the use of 3D printing with its economic benefits was developed in a selected company.

Keywords: 3D printing, polymer degradation, atypical part manufacturing, Fused Filament Fabrication, additive material, testing, static tensile mechanical testing.

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce

panu doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D.

za odborné vedení, cenné připomínky, rady a pozitivní přístup.

Dále děkuji

panu Ing. Tomáši Urbánkovi za konzultace v rámci statistického zpracování,

společnosti FERPET community s.r.o.

Univerzitě obrany v Brně,

své rodině a přátelům.

Motto

„Ne každý bude chápat vaši cestu, to je v pořádku, není to jejich cesta, je vaše“

OBSAH

ÚVOD	9
CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TECHNOLOGIE 3D TISKU	12
1.1 3D TISKOVÉ TECHNOLOGIE NA BÁZI FOTOPOLYMERŮ	13
1.2 3D TISKOVÁ TECHNOLOGIE NA BÁZI PRÁŠKOVÝCH MATERIÁLŮ	14
1.3 3D TISKOVÁ TECHNOLOGIE NA BÁZI TUHÝCH MATERIÁLŮ	15
2 FUSED FILAMENT FABRICATION / FUSED DEPOSITION MODELING	16
2.1 TISKOVÁ HLAVA FFF / FDM TECHNOLOGIE.....	17
2.2 POST-PROCESSING U FFF / FDM TECHNOLOGIE	18
2.3 TYPY TISKÁREN FFF / FDM.....	18
2.3.1 Typ uspořádání.....	18
2.3.2 Typ extruze.....	19
2.4 VÝHODY A NEVÝHODY FFF / FDM TECHNOLOGIE.....	21
3 CHARAKTERISTIKA APLIKOVANÝCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	22
3.1 STRUKTURA POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	22
3.2 DĚLENÍ POLYMERŮ.....	23
3.3 PLASTY	23
3.4 DEGRADACE POLYMERŮ.....	24
3.4.1 Vliv UV záření	24
3.4.2 Vliv kyslíku.....	25
3.4.3 Vliv ozónu.....	25
3.4.4 Navlhavost.....	25
3.4.5 Vliv teploty.....	25
3.4.6 Odolnost vůči ohni	26
3.4.7 Vliv chemických činidel	26
3.5 APLIKOVANÉ ADITIVNÍ MATERIÁLY	26
3.5.1 Aditivní materiál PLA.....	26
3.5.2 Aditivní materiál ABS.....	27
3.5.3 Aditivní materiál ASA	28
3.5.4 Aditivní materiál PET-G	28
4 ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ	29
4.1 PRUŽNOST	29
4.2 PEVNOST	29
4.3 PLASTICITA (TVÁRNOST MATERIÁLU).....	29
4.4 HOUŽEVNATOST.....	29
4.5 DĚLENÍ MECHANICKÝCH ZKOUŠEK.....	31

5	ZKOUŠKA TAHEM.....	32
5.1	PRINCIP ZKOUŠKY TAHEM A POUŽÍVANÉ ZKUŠEBNÍ VZORKY	32
5.2	PRACOVNÍ DIAGRAM	33
5.3	VÝPOČET NORMALIZOVANÝCH PARAMETRŮ TAHOVÉ ZKOUŠKY	35
5.3.1	Smluvní diagram tahové zkoušky	35
5.3.2	Modul pružnosti v tahu a Hookův zákon	37
5.3.3	Mez pevnosti v tahu	38
5.3.4	Mez kluzu.....	39
5.3.5	Tažnost	40
6	PROJEKTOVÝ MANAGEMENT	41
6.1	DEFINICE PROJEKTU	41
6.2	PROJEKTOVÝ TROJIMPERATIV	41
6.3	METODA SMART	42
6.4	ŽIVOTNÍ CYKLUS PROJEKTU	42
6.5	LOGICKÝ RÁMEC	43
7	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	45
II	PRAKTICKÁ ČÁST	46
8	NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	47
8.1	NÁVRH NORMALIZOVANÝCH ZKUŠEBNÍCH TYČÍ.....	47
8.2	MODEL ZKUŠEBNÍHO VZORKU	48
8.3	VOLBA MATERIÁLŮ PRO ZHOTOVENÍ ZKUŠEBNÍCH TYČÍ.....	49
8.4	NASTAVENÍ TISKOVÝCH PARAMETRŮ.....	49
8.5	TISK ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	50
9	VYSTAVENÍ VZORKŮ DEGRADAČNÍM VLIVŮM.....	51
9.1	VLIV UV ZÁŘENÍ.....	51
9.2	VLIV TEPLOTNÍCH FT CYKLŮ (<i>FREEZE-THAW CYCLE</i>).....	51
9.3	VÝDRŽ NA TEPLOTĚ 60 °C.....	52
9.4	VLIV VLHKÉHO PROSTŘEDÍ.....	53
10	PROVEDENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	54
10.1	VSTUPNÍ PARAMETRY TAHOVÉ ZKOUŠKY	55
10.2	PRŮBĚH ZKOUŠKY TAHEM	55
11	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	57
11.1	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ PŮSOBNÍ DEGRADAČNÍCH FAKTORŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU PLA.....	58
11.1.1	Statistické zpracování působení degradačních faktorů na mez pevnosti v tahu materiálu PLA	58
11.1.2	Statistické zpracování působení degradačních faktorů na modul pružnosti v tahu materiálu PLA	60
11.1.3	Tažnost	61

11.2	STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ PŮSOBNÍ DEGRADAČNÍCH FAKTORŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTÍ OSTATNÍCH TESTOVANÝCH ADITIVNÍCH MATERIÁLŮ	62
11.3	VYHODNOCENÍ PŮSOBNÍ DEGRADAČNÍCH VLIVŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI TESTOVANÝCH ADITIVNÍCH MATERIÁLŮ	63
11.3.1	Vliv degračních faktorů na mez pevnosti v tahu [MPa] testovaných aditivních materiálů.....	63
11.3.2	Vliv degračních faktorů na modul pružnosti v tahu [MPa] testovaných aditivních materiálů.....	64
11.3.3	Vliv degračních faktorů na tažnost [%] testovaných aditivních materiálů.....	65
11.3.4	Východiska využití a celkové zhodnocení vlivu degračních faktorů na mechanické vlastnosti testovaných aditivních materiálů	67
12	SPOLEČNOST FERPET COMMUNITY S.R.O.....	70
12.1	ZÁKLADNÍ ÚDAJE O SPOLEČNOSTI FERPET COMMUNITY S.R.O.	70
12.2	MANAGEMENT KVALITY	70
12.3	HISTORIE SPOLEČNOSTI FERPET COMMUNITY S.R.O.	71
12.4	ORGANIZAČNÍ STRUKTURA SPOLEČNOSTI.....	72
13	PROJEKT ZAVEDENÍ 3D TISKU VE SPOLEČNOSTI FERPET COMMUNITY S.R.O.	73
13.1	DŮVODY PRO POŘÍZENÍ 3D TISKÁRNY VE SPOLEČNOSTI FERPET COMMUNITY S.R.O.	73
13.2	ANALÝZA MOŽNOSTÍ UPLATNĚNÍ 3D TISKU NA STAVEBNÍCH PROJEKTECH.....	73
13.2.1	Stavební projekt RD Kyje	73
13.2.2	Stavební projekt RD Velké Popovice	74
13.3	METODA SMART (DEFINOVÁNÍ CÍLE PROJEKTU).....	76
13.4	LOGICKÝ RÁMEC PROJEKTU	76
13.5	ANALÝZA PROJEKTOVÝCH RIZIK RÍPRAN.....	79
13.6	KALKULACE NÁKLADŮ NA REALIZACI PROJEKTU	80
13.7	REALIZACE PROJEKTU	80
13.7.1	Realizace redukce pro hranaté svody na projektu RD Kyje	80
13.7.2	Realizace výroby prototypu dočasné pažnice prostupu na projektu RD Velké Popovice	84
13.8	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROJEKTU	87
13.8.1	Redukce pro hranaté svody	87
13.8.2	Dočasná pažnice prostupu.....	88
14	SHRNUTÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI	90
	ZÁVĚR	91
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	93
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	97
	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
	SEZNAM TABULEK.....	103
	SEZNAM GRAFŮ	104
	SEZNAM PŘÍLOH.....	105

ÚVOD

Technologie 3D tisku patří v oblasti moderní výroby mezi aktuální trendy. Oproti běžným konvenčním technologiím se vyznačuje schopností efektivně vytvářet velmi složité tvary součástí, a to s nízkou produkcí odpadu. Součásti jsou tvořeny postupným nanášením jednotlivých vrstev aditivního materiálu. Aktuálním trendem je především 3D tisk metodou Fused Filament Fabrication a Fused Deposition Modeling. Tento typ 3D tiskáren je oblíbený jak mezi firmami k profesionálnímu použití, tak mezi neodbornou veřejností k příležitostnému využití, a to zejména díky nízkým nákladům na provoz a pořízení.

Aditivní technologie jsou poměrně ekologické a snižují provozní náklady podniku zejména díky úspoře času a rychlosti výroby atypických dílů. Tyto okolnosti vedou podnik ke zvýšení konkurenceschopnosti a efektivity.

Jedním z klíčových faktorů, který vede ke snížení nákladů při výrobě atypických dílů 3D tiskem, je volba vhodného materiálu. Výběr vhodného aditivního materiálu může být značný problém, a to především z důvodu, že každá součást je jinak namáhána a zároveň může být vystavena odlišným degradačním vlivům. Z toho vyplývá, že u výroby atypických součástí je důležité vybírat vhodný aditivní materiál individuálně s ohledem na to, aby splňoval veškeré podmínky nutné ke správné funkčnosti výrobku. K porovnání mechanických vlastností materiálů, na jejichž základě se společnosti rozhodují pro výběr ideálního materiálu k dané součásti, slouží tzv. zkoušky materiálů.

Se zvyšující se pracností a složitostí provádění změn se zvyšuje i potřeba jejich efektivního plánování a řízení. V tomto směru je projektový management ideálním pomocníkem. Rizika, která plynou z nedodržení rozpočtů či termínů, jsou stále aktuální a pro daný subjekt mohou v případě jejich naplnění představovat nežádoucí ekonomické dopady.

CÍLE A METODY ZPRACOVÁNÍ PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout východiska pro využití 3D tisku k výrobě atypických součástí a zhodnotit jejich ekonomické přínosy.

Úlohou teoretické části práce je zpracování poznatků z odborných článků a literatury z oblastí:

- Aditivních technologií (Fused Filament Fabrication / Fused Deposition Modeling (FFF / FDM)).
- Polymerních materiálů používaných pro technologii 3D tisku FFF / FDM.
- Degradace polymerů.
- Mechanických zkoušek (zkouška tahem).
- Projektového řízení.

V praktické části práce bude v CAD programu vytvořen dle normy ČSN EN ISO 527 model normalizovaných zkušebních vzorků, které se následně vytisknou technologií Fused Filament Fabrication. K testování aditivních materiálů PLA, ABS, ASA a PET-G bude od každého materiálu vytisknuto šest sad vzorků, přičemž každá sada bude obsahovat sedm zkušebních vzorků. Jednotlivé sady vzorků budou vystaveny vybraným degradačním faktorům a následně zkoušeny mechanickou zkouškou statickou tahem.

Vybrané parametry (mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu a tažnost), získané z provedených tahových zkoušek, budou statisticky zpracovány a zaznamenány do tabulek a grafů. V rámci statistického zpracování budou posouzeny a vzájemně porovnány vlivy degradačních faktorů na testované aditivní materiály, ze kterých se stanoví východiska pro využití 3D tisku k výrobě atypických součástí.

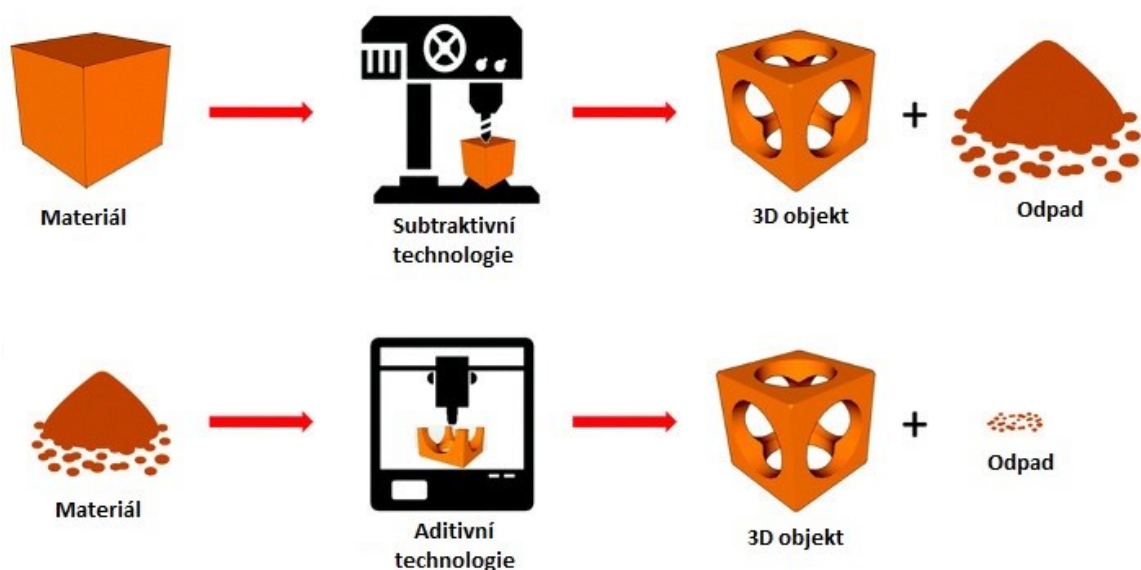
V rámci projektové části diplomové práce bude provedena analýza a zhodnocení ekonomických přínosů využití 3D tisku pro výrobu atypických součástí ve společnosti FERPET community s.r.o.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Technologie 3D tisku, označovaná také jako Rapid Prototyping (RP), se řadí mezi aditivní procesy výroby. Funguje na principu vrstvení aditivního materiálu v dané tloušťce. Vrstvením materiálu se postupně vytvoří výsledný objekt. V průběhu tisku jsou generovány vlastnosti materiálu, přičemž zde záleží na vlivu prostředí, a to nejčastěji na vlhkosti a teplotě. V případě aditivních technologií jsou objekty stavěny na tiskové desce (platformě) a není je tedy potřeba upínat jako u subtraktivní výroby. Proces 3D tisku v některých případech vyžaduje při tvorbě objektů podpurné struktury, které se po vytisknutí musí odstranit.

Modely určené k tisku je nutné předem vytvořit ve vhodném parametrickém CAD programu, umožňujícím převod objektu do formátu, který 3D tiskárna dokáže přečíst. Nejčastěji používaným formátem je STL, z něhož mohou být vytisknuty objekty z různých materiálů na libovolné 3D tiskárně. (Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; Srivatsan a Sudarshan, 2016; Kloski a Kloski, 2017)



Obr. 1 – Subtraktivní x aditivní technologie (3D Printing vs CNC Machining: Which is best for prototyping? 2022)

Aditivní technologie se využívají v mnoha odvětvích jako je letecký a automobilový průmysl nebo medicína. 3D tisk se v průmyslu využívá pro výrobu prototypů nebo atypických součástí v kusovém množství. V případě atypických dílů je díky 3D tisku možné vyrobit v krátkém časovém horizontu téměř jakoukoliv součást, u prototypických součástí

3D tisk slouží zejména k ověření funkčnosti součásti bez nutnosti nákladné výroby forem. V medicíně je využití aditivních technologií zejména pro výrobu protéz a implantátů. (Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019)

1.1 3D tiskové technologie na bázi fotopolymerů

Jsou aditivní technologie, kdy se model tvoří v nádobě naplněné tekutým polymerem, tento materiál se následně pomocí ultrafialového světla v jednotlivých vrstvách vytvrzuje. Po vytvrzení každé vrstvy se stůl s nádobou posune o výšku následující vrstvy dolů. (3D tisk fotopolymerizací, 2022)

Tab. 1 – 3D tiskové technologie na bázi fotopolymerů (3D tisk fotopolymerizací, 2022; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; DLP a LCD 3D tisk, 2022)

3D tiskové technologie na bázi fotopolymerů	
Stereolitografie (SLA)	3D tisková technologie na bázi fotopolymerů byla vyvinutá společností ED Systems. Jedná se o proces, který je založený na vytvrzování tekutého fotopolymeru, a to pomocí ultrafialového paprsku. Předností technologie SLA je rychlost, přesnost a možnost rozměrného tisku. Využití je v modelářství, medicíně či automobilovém průmyslu.
Solid Ground Curing (SGC)	Technologie SGC vytvrzuje fotopolymer pomocí UV světla dle negativních šablon. Šablonová deska je pokryta vrstvou toneru, která tvoří clonu proti UV záření. Vytvrzování tedy probíhá pouze v dané kontuře.
Digital Light Processing (DLP) a Liquid Crystal Display (LCD)	K tvorbě modelu je v tomto případě využito ultrafialové záření, které vytvrzuje jednotlivé vrstvy fotopolymeru. U Digital Light Processingu se využívá ultradetailního projektoru, u Liquid Crystal Display je použita LCD obrazovka. Technologie DLP a LCD tisknou modely s přesností v mikrometrech.

1.2 3D tisková technologie na bázi práškových materiálů

3D tiskové technologie na bázi práškových materiálů se vyznačují vstupním materiálem, který je v podobě jemného prášku. Speciálně upravené materiály (kov, keramika nebo plast) se vytvrzují slinováním (spékáním) nebo tavením. Výhodou popisované metody je zejména použití nespečeného prášku jako podpůrného materiálu, z tohoto důvodu tedy není nutná stavba podpor, čímž se snižuje čas výroby a spotřeba materiálu. Nespečený prášek se po ukončení procesu odsaje a je znovu použitelný. (3D tisk spékáním práškové vrstvy, 2022)

Tab. 2 – 3D tiskové technologie na bázi práškových materiálů (3D tisk spékáním práškové vrstvy, 2022; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; Chua, Leong a Lim, 2010; Srivatsan a Sudarshan, 2016)

3D tiskové technologie na bázi práškových materiálů	
Selective Laser Sintering (SLS)	Proces SLS spéká práškové materiály (kovy, plasty nebo keramiku), využívá k tomu výkonný CO ₂ laser. Na platformu jsou postupně nanášeny rovnoměrné vrstvy práškového materiálu, který je pomocí výkonného laseru spékán, a to těsně pod bodem tání.
Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a Selective Laser Melting (SLM)	Technologie využívají k tisku CO ₂ laser, přičemž nedochází ke slinování, ale k úplnému roztavení materiálu, čímž vzniká homogenní výrobek, který se vyznačuje lepšími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi.
Electronic Beam Melting (EBM)	Jedná se o relativně inovativní proces 3D tisku vyvinutý Švédskou společností Arcam. Proces tisku probíhá ve vakuové komoře, kde je ve vrstvách nanášen materiál v podobě prášku, který je pomocí elektronového paprsku taven při teplotě až 2000 °C. Technologie se používá zejména pro výrobu z drahých materiálů, jako je například titan nebo niob. Výtisky se uplatňují pouze v implantologii, kosmonautice a leteckém průmyslu.

1.3 3D tisková technologie na bázi tuhých materiálů

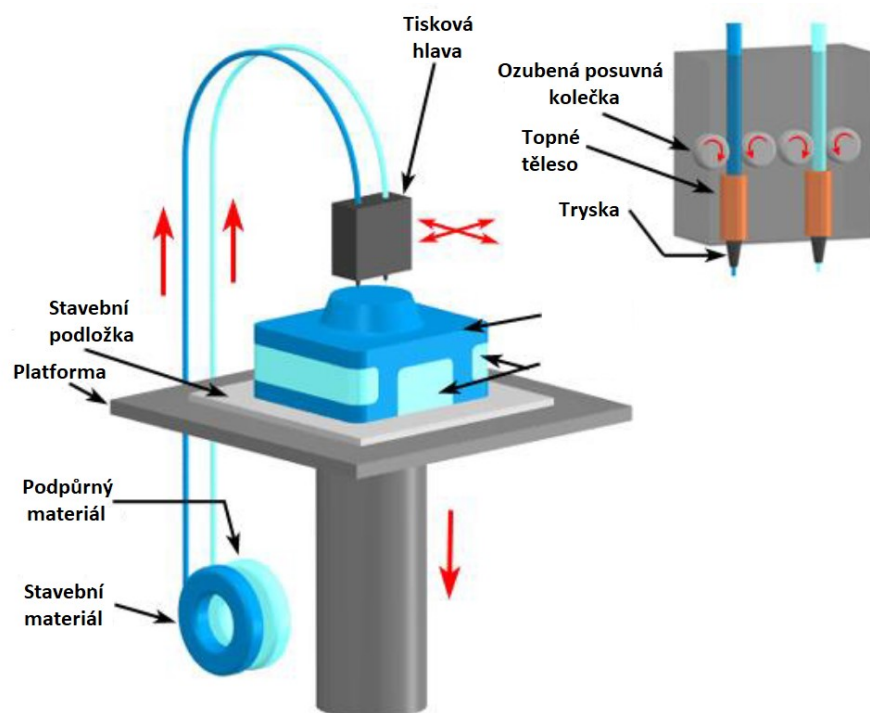
Jedná se o technologie 3D tisku, které využívají aditivní materiál v tuhé bázi. Materiály jsou zpravidla polymery ve formě drátu či fólie. Technologie jsou založeny na principu vrstvení aditivního materiálu. (Chua, Leong a Lim, 2010; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019)

Tab. 3 – 3D tiskové technologie na bázi tuhých materiálů (Chua, Leong a Lim, 2010; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; Srivatsan a Sudarshan, 2016)

3D tiskové technologie na bázi tuhých materiálů	
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Technologie využívají k tvorbě objektu materiál v podobě tenké fólie. Většinou se jedná o papír, plast nebo keramiku. 3D model je tvořen vrstvením jednotlivých fólií, které jsou na jedné straně opatřeny lepidlem, čímž se přilepí k předešlé vrstvě. Následně je pomocí laseru vyřezána do vrstvy kontura modelu.
Multi Jet Modeling (MJM)	Proces tisku u této technologie spočívá v postupném nanášení vrstvy termopolymeru, který se taví v tiskové hlavě a poté se polymerizuje pomocí UV světla. Technologie využívá speciální tiskovou hlavu, která má v řadě uspořádaných 352 trysek.
Fused Filament Fabrication (FFF) a Fused Deposition Modeling (FDM)	Aditivní technologie FFF a FDM vycházejí ze stejného principu, odlišují se pouze v tom, že metoda FFF využívá vyhřívané podložky, zatímco metoda FDM využívá vyhřívanou tiskovou komoru. Principem technologie je natavování vstupního materiálu v tiskové hlavě (extrudéru) a jeho postupné nanášení v jednotlivých vrstvách.

2 FUSED FILAMENT FABRICATION / FUSED DEPOSITION MODELING

Metoda Fused Filament Fabrication (FFF) vychází ze stejného principu jako metoda FDM (Fused Deposition Modeling). FFF tiskárny využívají vyhřívanou podložku, zatímco FDM tiskárny využívají vyhřívanou komoru. FFF metoda je vzhledem k počtu dostupných tiskáren na trhu jedna z nejrozšířenějších technologií 3D tisku. Je využívána zejména k tisku prototypů. Patent na tuto technologii získala společnost Stratasys, která ji vyvíjela od roku 1988. FFF / FDM technologie tisknou především z termoplastických materiálů, mezi které patří např. Polyethylene-terephthalate-glycol (PET-G), polyamid (PA), polylaktid (PLA), polykarbonát (PC), akrylonitril-butadien-styren (ABS), Acrylonitrile-styrene-Acrylate (ASA). (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; Chua, Leong a Lim, 2010)



Obr. 2 – Princip technologie FFF / FDM

(Rychlá výroba prototypů, 2022)

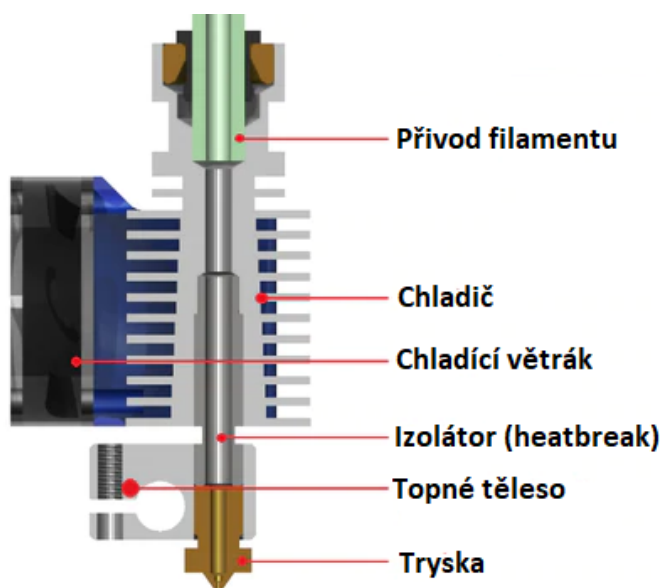
Aditivní technologie FFF / FDM využívají pro stavbu modelu převážně jednu tiskovou hlavu (extrudér). V posledních letech 21. století byla vyvinuta zařízení, která používají více extrudérů. Ve většině případů jeden extrudér slouží pro tisk modelu a druhý extrudér staví podpory z pomocného materiálu (viz obr. 2), ten se bez významného narušení jakosti povrchu post-processingem oddělí od finálního modelu. Termoplastický materiál je při této

aditivní technologii taven v extrudéru a nanášen ve stanovených vrstvách na platformu. Aditivní materiál se v tiskové hlavě zahřívá těsně nad bodem tání, přičemž se následně po nanesení s předchozí vrstvou téměř okamžitě „svaží“. Jakmile je vystavěna celá vrstva, tisková hlava se posune o výšku vrstvy nahoru. Vstupní materiál je většinou ve formě drátu ($\text{\O}1,75\text{mm}$ až $\text{\O}3\text{mm}$). (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; Chua, Leong a Lim, 2010)

2.1 Tisková hlava FFF / FDM technologie

Při procesu tisku u metody FFF / FDM je drát (filament) přiveden do tiskové hlavy (extrudéru). Extrudér (viz obr. 3) se skládá z podávacího mechanismu, který pohání krokový motor a pomocí ozubených koleček vede filament. Další částí je hotend, což je sestava dílů, která slouží k natavení filamentu. Hotend se skládá z chladiče se zásobníkem a topného tělesa s tryskou. Obě tyto části jsou odděleny izolátorem (heatbreak). (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)

Princip extrudéru funguje tak, že podávací mechanismus vtlačuje filament v požadované rychlosti do chladiče se zásobníkem a následně přes izolátor (heatbreak) pokračuje do topného tělesa s tryskou. V topném tělese je materiál nataven na požadovanou teplotu a tryskou je kladen v jednotlivých vrstvách na platformu. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)



Obr. 3 – Extrudér schéma (3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)

2.2 Post-processing u FFF / FDM technologie

Technologie FFF / FDM vyžadují v některých případech stavbu podpor, které je nutné z modelu odstranit. Ke snížení času post-processingu se u 3D tiskáren s více extrudéry využívají aditivní materiály odlišné od těch, ze kterých je model stavěn. Nejčastěji se používají materiály rozpustné ve vodě [polyvinyl alcohol (PVA) nebo butenediol vinyl alcohol co-polymer (BVOH)]. Pro tisk z více materiálů se používají zařízení se dvěma nebo více nezávislými tiskovými hlavami nebo multi-materialní jednotky, které mění materiál na základě řídicího programu. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019; Chua, Leong a Lim, 2010)

2.3 Typy tiskáren FFF / FDM

U technologie FFF a FDM lze rozdělit 3D tiskárny dle typu uspořádání (kartézské, delta, polární nebo SCARA) a typu extruze (přímý extrudér a bowdenový extrudér).

2.3.1 Typ uspořádání

Jednotlivé typy uspořádání jsou znázorněny na obrázku 4.

- **Kartézské uspořádání**

Kartézské 3D tiskárny jsou nejběžnější na trhu. Technologie založená na kartézském souřadnicovém systému využívá k určení správné polohy a směru tři osy: X, Y a Z. (The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained, 2022; 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)

- **Polární uspořádání**

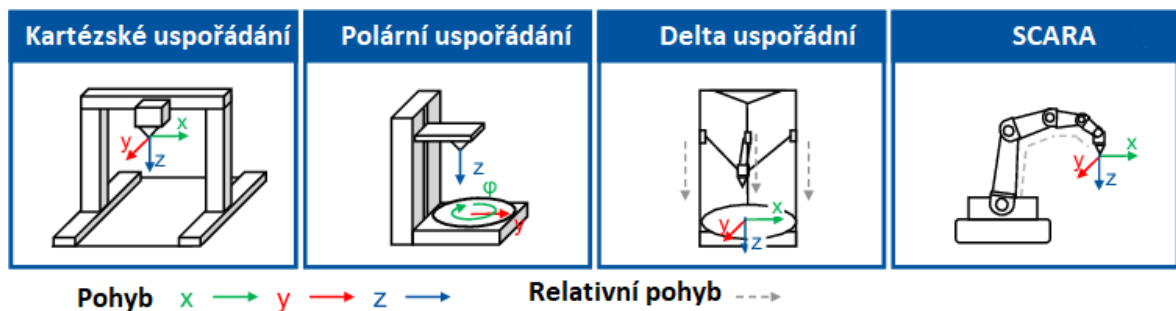
Umístění polárních 3D tiskáren není určeno souřadnicemi X, Y, Z ale úhlem a délkou. V tomto případě se platforma otáčí a extrudér se pohybuje nahoru a dolů. Hlavní výhodou těchto zařízení jsou pouze dva motory, zatímco kartézské tiskárny potřebují alespoň tři. Z dlouhodobého hlediska má polární tiskárna vyšší energetickou účinnost a dokáže vyrobit větší objekty při menším využití prostoru. (The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained, 2022; 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)

- **Delta uspořádání**

Zařízení s delta uspořádáním pracují s kartézskou souřadnou soustavou. Jedná se o kulatou tiskovou desku, která je kombinovaná s extrudérem upevněným ve třech trojúhelníkových bodech. Každý ze tří bodů se pohybuje nahoru a dolů, čímž určuje polohu a směr tiskové hlavy. Delta tiskárny byly navrženy tak, aby urychlily proces tisku. (The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained, 2022; 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)

- **SCARA uspořádání**

Jedná se o 3D tiskárnu s robotickým ramenem, která vypadá a pohybuje se podobně jako průmyslový robot používající se na montážních a výrobních linkách. Tento typ uspořádání je zatím v rámci 3D tisku ve fázi vývoje, nejčastěji se aplikuje při 3D tisku domů a budov. Ačkoli se nejedná o běžně používaný tiskový proces, tato metoda 3D tisku FFF / FDM začíná zaznamenávat nárůst v užívání. Je to proto, že proces není fixován na tiskovou desku, takže je mnohem mobilnější. Navíc díky flexibilitě při polohování hlavy 3D tiskárny je snazší vytvářet složité struktury. (The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained 2022; 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)



Obr. 4 – Typy uspořádání FFF / FDM tiskáren (Machine Designs of 3D Printers, 2022)

2.3.2 Typ extruze

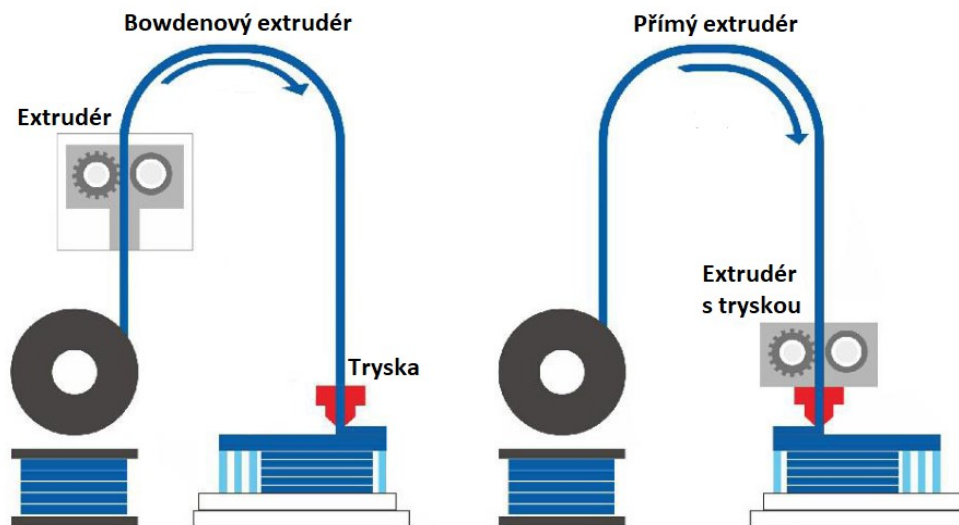
Způsob vedení filamentu je u technologie FFF a FDM důležitým parametrem, díky kterému lze rozdělit tiskárny na dva typy (viz obr. 5), vedení bowdenovým nebo přímým extrudérem. Zásadním rozdílem mezi těmito typy je velikost retrakce. Princip retrakce spočívá ve zpětném vtažení filamentu. (Retrakce, 2019; 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)

- **Přímý extrudér**

V případě přímého extrudéru jsou podávací ozubená kolečka součástí tiskové hlavy a jsou tedy těsně nad místem, kde je filament taven. Přímý extrudér díky menším retrakcím, které se pohybují kolem 1 mm, snižuje dobu tisku. Další výhodou je velmi přesný posun materiálu s minimem prokluzu. Nevýhodou je naopak těžší tisková hlava, neboť musí obsahovat motor pro podávací systém. (3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)

- **Bowdenový extrudér**

Bowdenový extrudér má podávací systém mimo tiskovou hlavu na nepohyblivé části rámu tiskárny. Lehká tisková hlava tak může dosahovat vyšších rychlostí, neboť nemusí řešit vysoké množství energie nutné pro akceleraci a deceleraci, jak je tomu u těžšího přímého extrudéru. Nevýhodou tohoto typu je retrakce, která se pohybuje v rozmezí 3-5 mm. (3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)



Obr. 5 – Typy extruze FFF / FDM tiskárny
(3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? 2022)

2.4 Výhody a nevýhody FFF / FDM technologie

Výhody:

- Výroba funkčních prototypů, které mají obdobné vlastnosti jako originální výrobky.
- Odpad je pouze ve formě podpůrného materiálu.
- Nízké provozní náklady.
- Cenová dostupnost. (Srivatsan a Sudarshan, 2016; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019)

Nevýhody:

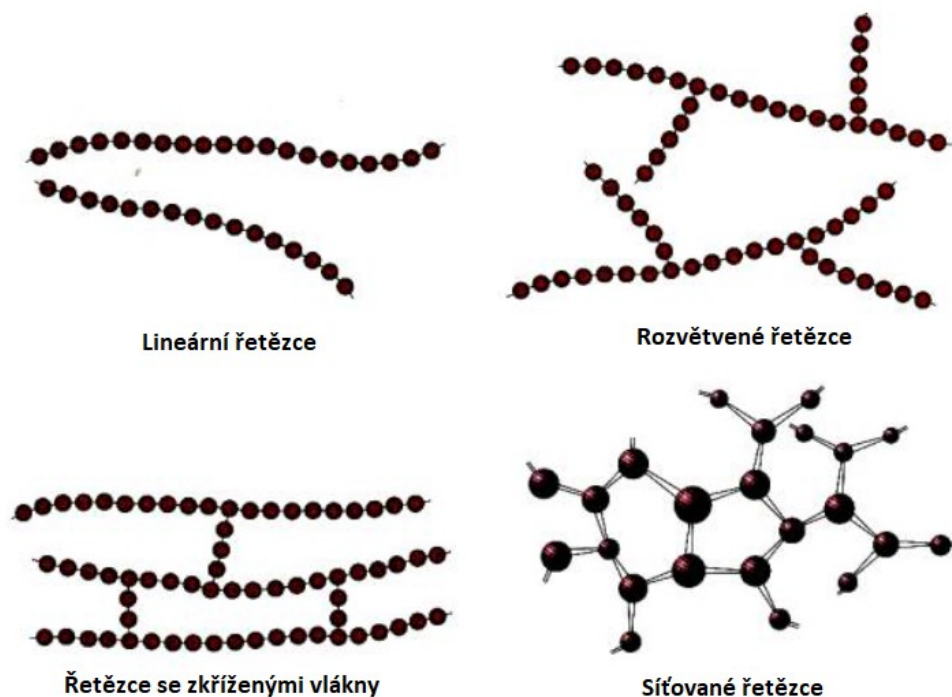
- Vyžaduje stavbu podpor, které je nutné odstranit post-processingem.
- Dlouhá doba výroby.
- Omezená přesnost, která je dána průměrem trysky.
- Průměr trysky ovlivňuje rychlost a přesnost výroby. (Srivatsana Sudarshan, 2016; Gebhardt, Kessler a Thurn, 2019)

3 CHARAKTERISTIKA APLIKOVANÝCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

Polymery jsou chemické látky tvořené makromolekulárními řetězci, které vznikají spojováním nízkomolekulárních látek, tzv. monomerů. Řetězení polymerů vzniká chemickým postupem zvaným polyreakce. Ten může proběhnout třemi základními typy, a to řetězovými polymeracemi, stupňovitými polyadicemi a polykondenzacemi. (Ducháček, 2011; Fyzikální základy vědy o materiálu, 2022)

3.1 Struktura polymerních materiálů

Základní stavební kámen polymerů je makromolekula, která se skládá z jednotlivě opakujících se monomerních jednotek obsahujících většinou atomy uhlíku, vodíku, a kyslíku. Díky schopnosti uhlíku vázat na sebe další atomy vznikají dlouhé řetězce, které se dle seřazení monomerů rozdělují (viz obr. 6) na řetězce lineární, rozvětvené, síťované a řetězce se zkříženými vlákny. (Ducháček, 2011; Fyzikální základy vědy o materiálu, 2022)

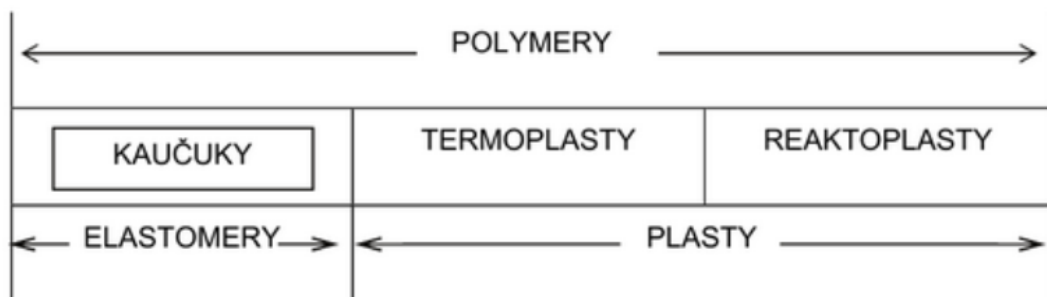


Obr. 6 – Druhy řetězců polymerních materiálů
(Fyzikální základy vědy o materiálu, 2022)

3.2 Dělení polymerů

Ducháček, 2011, s. 10 rozdělil polymery do dvou základních skupiny (viz obr. 7) na:

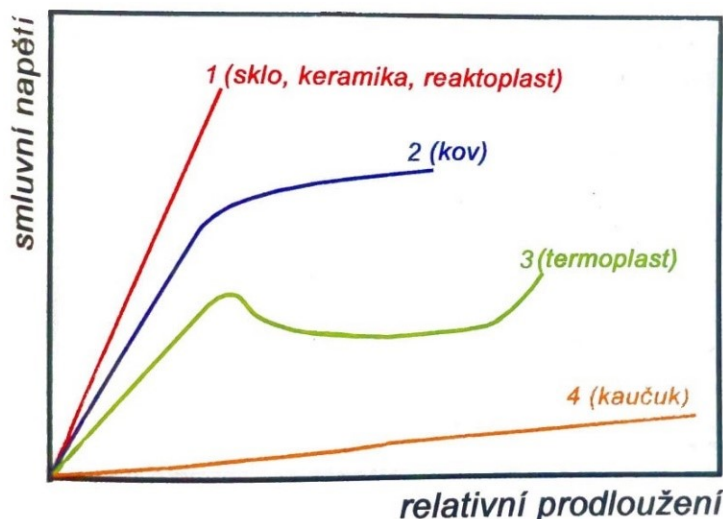
1. **Elastomery** – jsou vysoce elastické polymery, které lze deformovat již při působení poměrně malých vnějších sil oproti ostatním materiálům (viz obr. 8). Deformace je většinou vratná díky tzv. kaučukové elasticitě. Převážně se jedná o přírodní a syntetické kaučuky. (Ducháček, 2011; Vojtěch, 2010)
2. **Plasty** – jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. V případě je-li změna z plastického do tuhého stavu opakovatelná (vratná), nazýváme tyto polymery jako termoplasty. Pokud se jedná o změnu trvalou (nevratnou), která je výsledkem chemické reakce (často probíhající za zvýšené teploty), jedná se o reaktoplasty. (Ducháček, 2011; Vojtěch, 2010)



Obr. 7 – Rozdělení polymerů (Ducháček, 2011, s. 10)

3.3 Plasty

Základní složky plastů tvoří polymery, které mohou obsahovat i jiné přísady sloužící k úpravě jejich vlastností. V porovnání s jinými materiály (viz obr. 8) se plasty vyznačují nízkou pevností v tahu 20 až 130 MPa, nebo také nízkou hustotou, která se pohybuje od 900 do 1500 kg.m³. Ve většině případů mají plasty poměrně nízký modul pružnosti a jsou izolanty. Vlastnosti plastů jsou silně závislé na teplotě, dobře se tvarují, mají nízký koeficient tření a vynikají odolností proti korozi. Při zpracování vždy prochází minimálně jednou plastickým stavem. Výhodou oproti jiným materiálům (sklo, keramika nebo kovy) je nízká energetická náročnost výroby, v porovnání s jinými materiály jsou ovšem obtížně recyklovatelné. (Ducháček, 2011; Vojtěch, 2010;)



Obr. 8 – Tahové diagramy odlišných materiálů (Vojtěch, 2010, s. 99)

3.4 Degradace polymerů

Jsou-li součásti nebo výrobky z polymerů vystaveny účinku povětrnostních vlivů, lze u nich po určité době pozorovat změny vzhledu i mechanických vlastností. Zkoušky tzv. přirozeného stárnutí vystavením povětrnostním vlivům nejsou jednoduché, jsou velmi zdlouhavé a z hlediska geografického mají jen omezenou vypovídající hodnotu. (Běhálek, 2016; Ducháček, 2011)

Degradaci polymerů můžeme definovat jako nežádoucí změnu jejich chemického složení a vlastností způsobenou vnějšími podmínkami vedoucím ke znehodnocení součástí. Degradaci mohou způsobit různé vlivy, jako např. zvýšená teplota, vlhkost, chemická činidla, UV záření, apod. K nežádoucím změnám vlastností polymerů dochází jednak při samotném používání výrobku, jednak již při jeho výrobě či samotném zpracování polymeru, a to nejčastěji vlivem tepelného nebo mechanického namáhání. (Běhálek, 2016; Ducháček, 2011)

3.4.1 Vliv UV záření

Jedním z důležitých faktorů silně ovlivňujících degradaci polymerů je ultrafialové záření, které je součástí světla. Paprsky UV záření porušují vazby v řetězci makromolekuly, následuje rozpadání na menší celky, které pak snadno reagují se vzdušným kyslíkem. Tento jev je známý jako fotooxidace. Proces fotooxidace začíná vždy na povrchu a postupně se dostává do hloubky a způsobuje změny v chemické struktuře polymerního materiálu.

Odolnost proti UV záření lze u polymerů zvýšit přidáním stabilizátorů, které UV záření absorbují. (Mckeen, 2013; Ducháček, 2011)

3.4.2 Vliv kyslíku

Vliv vzdušného kyslíku na polymerní materiály není za normálních podmínek velký a většina polymerů je proti němu odolná. K oxidaci dochází v kombinaci s působením různých faktorů, jako je např. difuze kyslíku do polymeru, rozpustnost kyslíku v polymeru nebo působení slunečního záření. Při skladování polymeru mimo sluneční záření probíhá oxidace pomalu a materiál příliš své vlastnosti nemění. Odolnost polymerních materiálů proti kyslíku může být ovlivněna jejich chemickým složením. (Mckeen, 2013; Ducháček, 2011)

3.4.3 Vliv ozónu

Vliv ozónu na polymerní materiály spadající pod plasty je nevýznamný, negativní vliv může mít na elastomery. U elastomerů ozón reaguje hned na povrchu, kde vytvoří tvrdou a křehkou vrstvu, která následně snadno praská a dochází k mechanickému porušení. (Mckeen, 2013; Ducháček, 2011)

3.4.4 Navlhavost

Navlhavost je obecně schopnost materiálů přijímat vlhkost z okolního prostředí. Proces probíhá do doby, než je dosaženo rovnovážného stavu, kdy vlhkost polymerního materiálu odpovídá vlhkosti okolního prostředí. Doba, po kterou může proces navlhavosti trvat, závisí na faktorech, jako jsou chemické složení, relativní vlhkost, teplota okolí nebo tloušťka součástí. Absorpce vody významně ovlivňuje mechanické vlastnosti polymerních materiálů. Snižuje se pevnost, modul pružnosti a tvrdost. Naopak houževnatost a tažnost polymeru roste. Mimo to má absorpce vody vliv na rozměry součástí, které se zvětšují úměrně absorbovanému množství vody. Navlhavost polymerů závisí především na jejich chemické struktuře a složení. (Běhálek, 2016; Mckeen, 2013; Ducháček, 2011)

3.4.5 Vliv teploty

Zvýšená teplota se může u polymerních materiálů projevit dvěma způsoby. Při prvním materiál měkne, případně se přijatým teplem zvýší kinetická energie makromolekulárního řetězce do takové míry, že dojde ke zkapalnění polymeru. Při druhém způsobu dochází ke změně struktury polymeru, a to štěpením makromolekul, aniž by docházelo ke změně

chemického složení (depolymerizací), změnou chemického složení (destrukcí) nebo vznikem příčných vazeb mezi řetězci (síťování). Ve všech třech případech se jedná o degradaci polymeru. (Běhálek, 2016; Ducháček, 2011)

3.4.6 Odolnost vůči ohni

Ve většině případů jsou polymerní materiály za normálních podmínek hořlavé. Jedná se o omezující faktor při jejich používání pro řadu aplikací. Dokonalé odstranění hořlavosti polymerů je nemožné, ovšem snížení se provádí pomocí chemických přísad. (Ducháček, 2011)

3.4.7 Vliv chemických činidel

V případě působení chemických činidel na polymerní materiály mohou nastat dvě varianty, přičemž záleží především na druhu polymeru a chemické látce. V prvním případě polymer neabsorbuje chemikálii a nejsou tedy způsobeny žádné změny vlastností polymeru. V opačném případě, kdy je chemikálie absorbována, dochází k fyzikálním či chemickým změnám vlastností polymerního materiálu. (Běhálek, 2016; Mckeen, 2013; Ducháček, 2011)

3.5 Aplikované aditivní materiály

Aditivní technologie FFF / FDM využívají materiály ve formě drátu (filamentu), který je obvykle navinut na cívce. Zpravidla jde o plastové materiály, ovšem v některých případech se vyrábí i z dalších druhů materiálů, jako jsou např. dřevo nebo kovy. Tloušťka filamentu je vyráběna v rozměrech 1,75 mm, 2,85 mm a 3 mm. (Balcarová, 2022; Express guide of FDM 3D printing materials, 2022)

Jelikož mají polymerní materiály odlišné vlastnosti, je nutné při výrobě prototypů či funkčních součástí vybrat vhodně materiál tak, aby splňoval požadavky na mechanické vlastnosti a funkčnost součásti. (Balcarová, 2022; Express guide of FDM 3D printing materials, 2022)

3.5.1 Aditivní materiál PLA

PLA patří díky svým tiskovým vlastnostem mezi nejvhodnější materiály pro 3D tisk metodou FFF / FDM. Jelikož má na rozdíl od ostatních aplikovaných aditivních materiálů (ABS, ASA nebo PET-G) nižší teplotu tavení a tepelnou roztažnost, tisknuté součásti se při ochlazování nijak nekroucí a smrštění je při chladnutí minimální, z toho důvodu je materiál

PLA vhodný pro tisk rozměrných i detailních objektů. 3D tisk tímto materiálem je poměrně jednoduchý. Jednotlivé vrstvy aditivního materiálu se poměrně dobře spojují, díky tomu je PLA vhodný i pro tenkostěnné modely. PLA je termoplast vyráběný z cukrové třtiny, bramborového nebo kukuřičného škrobu. Jedná se tedy o materiál získávaný z obnovitelných zdrojů, které jsou biologicky odbouratelné. Jeho nevýhodou je nízký bod tání, začíná se tavit již při teplotě 60 °C, z tohoto důvodu není příliš vhodný ke strojnímu opracování bez chlazení. (Balcarová, 2022; PLA Zelená, 2022)

Teplota trysky se nastavuje na 115 až 210 °C.

Teplota podložky může být u tohoto materiálu bez výhřevu až do 60 °C

3.5.2 Aditivní materiál ABS

ABS je nejčastěji využívaným materiálem pro 3D tisk metodou FFF / FDM. Jedná se o amorfní termoplastický kopolymer. Výhodou jsou dobré mechanické vlastnosti (tvrdost, pružnost, houževnatost) a odolnost vůči vysokým i nízkým teplotám (± 100 °C). Lze z něho vyrábět funkční díly, případně i nástroje pro komerční či běžné použití. Další výhodou ABS je odolnost proti teplotám (± 100 °C) a zdravotní nezávadnost. Jelikož je ABS rozpustný v acetonu, lze jednotlivé tisknuté díly lehce slepovat nebo vyhlazovat a vytvářet tím nižší drsnost povrchu. Nevýhodou je nízká odolnost vůči UV záření a tepelná roztažnost, kvůli které může docházet během tisku k deformacím součástí, proto není příliš vhodný pro tisk rozměrných modelů. Ke snížení možnosti vzniku deformací tisknuté součásti je u tiskáren FFF nutné během tisku platformu vyhřívat na teplotu 100 °C až 110 °C. Při tisku rozměrných či přesných součástí je vhodné využít 3D tiskárnu FDM s uzavřeným vyhřívaným tiskovým prostorem. Při tisku materiálu ABS se uvolňují škodlivé látky (styren), z toho důvodu je žádoucí tento materiál tisknout ve větrané místnosti. (Balcarová, 2022; ABS Bílá, 2022)

Teplota trysky se nastavuje na 210 až 250 °C.

Teplota podložky by měla být nastavená na 90 až 110 °C.

3.5.3 Aditivní materiál ASA

Jde o termoplastický materiál, který byl vytvořen jako alternativa k ABS. Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi, chemickou odolností, tepelnou odolností (až 105 °C) a stabilitou při chladnutí. Materiál je také velmi odolný vůči navlhavosti, povětrnostním podmínkám a UV záření. U materiálu ASA nedochází k postupnému žloutnutí, jak je tomu u ABS, z toho důvodu je vhodný pro použití i ve venkovních prostorech, kde je kladen důraz na dlouhodobý vzhled povrchu. Materiál ASA má nižší tepelnou roztažnost, než je tomu u materiálu ABS, proto je vhodnější i pro tisk rozměrnějších dílů a složitých detailů. Přesto může u tohoto materiálu během tisku docházet k deformacím modelu při chladnutí. K minimalizaci zmíněného nežádoucího jevu je vhodné využít tiskárny FDM s uzavřeným vyhřívaným tiskovým prostorem. Obdobně jako u materiálu ABS se i při tisku ASA uvolňují škodlivé látky a zápach, proto je doporučeno tento materiál tisknout v odvětrávané místnosti. (ASA – natur, 2022; Prusament ASA, 2022)

Teplota trysky se nastavuje na 230 až 255 °C.

Teplota podložky by měla být nastavena na 90 až 110 °C.

3.5.4 Aditivní materiál PET-G

Jedná se o transparentní amorfní kopolyester. PET-G vyniká svou pevností, stálostí, teplotní odolností ± 100 °C, tepelnou roztažností, odolností vůči kyselinám a rozpouštědlům. Svým složením se podobá materiálu PET, který se využívá k výrobě obalů pro potraviny. Znak „G“ je modifikovaný glykol, ten se přidává během polymerace jako přísada. Materiál PET-G se vyznačuje lepšími mechanickými vlastnostmi než jeho základní forma, je recyklovatelný a není toxický. Díky svým vlastnostem je ideální pro tisk velkých objektů a je možné ho používat v interiéru i v exteriéru. (PETG Černá, 2022; Prusament PETG, 2022)

Teplota trysky se nastavuje na 200 až 240 °C.

Teplota podložky by měla být nastavena na 45 až 90 °C.

4 ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ

Mechanické vlastnosti hodnotí kvantitativně chování materiálů při působení vnějších mechanických sil. Znalost mechanických vlastností materiálů je klíčová k výběru vhodného materiálu pro konkrétní aplikace. Zkoušení probíhá tak, že působením vnějších sil se materiál mechanicky zatěžuje, to vede k jeho deformaci nebo úplnému porušení. Mezi nejběžněji testované mechanické vlastnosti materiálů patří pružnost, pevnost a plasticita. Další mechanické vlastnosti, které se testují, jsou například tvrdost nebo odolnost proti únavě. (Čižmárová, Horník, Jeníková a Sobotová, 2014; Vojtěch, 2010)

4.1 Pružnost

Pružnost, také v některých případech označována jako elasticita, je schopnost materiálu, která vykazuje jeho pružnou deformaci. V oblasti pružné deformace se při namáhání mění objem zkoušeného materiálu, po ukončení tohoto namáhání se objem vrátí do jeho původního stavu. Pružnost stanovuje Hookův zákon (viz kap. 5.3.2). (Čižmárová, Horník, Jeníková a Sobotová, 2014; Vojtěch, 2010)

4.2 Pevnost

Jedná se o odpor materiálu bránící k jeho deformaci a případnému porušení při působení vnějších mechanických sil. Je to vlastnost materiálu vyjadřující míru mezního zatížení, při kterém nedojde u testovaného materiálu k porušení. Podle způsobu namáhání je možné pevnost rozlišit (viz obr. 9) na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu. (Čižmárová, Horník, Jeníková a Sobotová, 2014; Vojtěch, 2010)

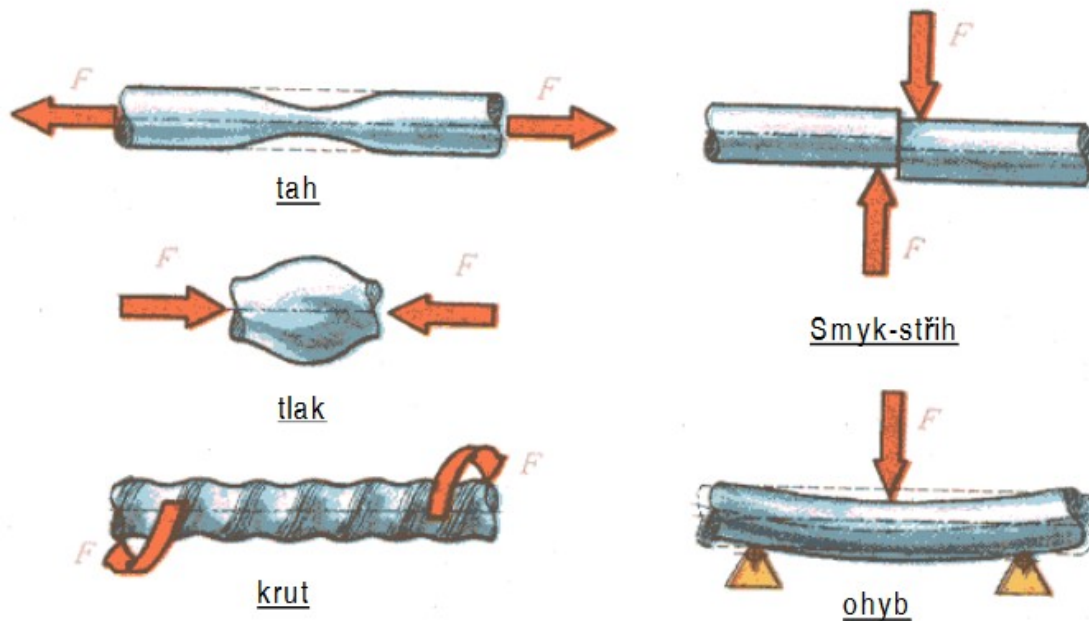
4.3 Plasticita (tvárnost materiálu)

Plasticita nebo také poddajnost či tvárnost je vlastnost materiálu zachovat si při působení vnějších mechanických sil trvalé deformace. Plastická deformace vyvolává změnu tvaru materiálu, přičemž zde není dosaženo porušení materiálu a objem zůstává původní. (Čižmárová, Horník, Jeníková a Sobotová, 2014; Vojtěch, 2010)

4.4 Houževnatost

Jedná se o materiálovou schopnost zůstat při deformaci a nárazech vcelku bez tvorby trhlin či růstu již existujících trhlin. Vznik a růst trhlin závisí na více faktorech, např. tvaru materiálu či vnitřním pnutím, z tohoto důvodu nelze tuto materiálovou vlastnost jednoduše

vyjádřit pomocí jedné fyzikální veličiny. V některých případech je-li geometrie jednoduchá jako např. u zkoušky tahem, tak lze jako měřítko houževnatosti použít celkovou práci spotřebovanou na deformaci a porušení materiálu. Někdy se také využívá materiálová charakteristika známá jako lomová houževnatost, která vyjadřuje odolnost materiálu proti porušení v případě, je-li v materiálu přítomna trhlina. (Čižmárová, Horník, Jeníková a Sobotová, 2014; Vojtěch, 2010)

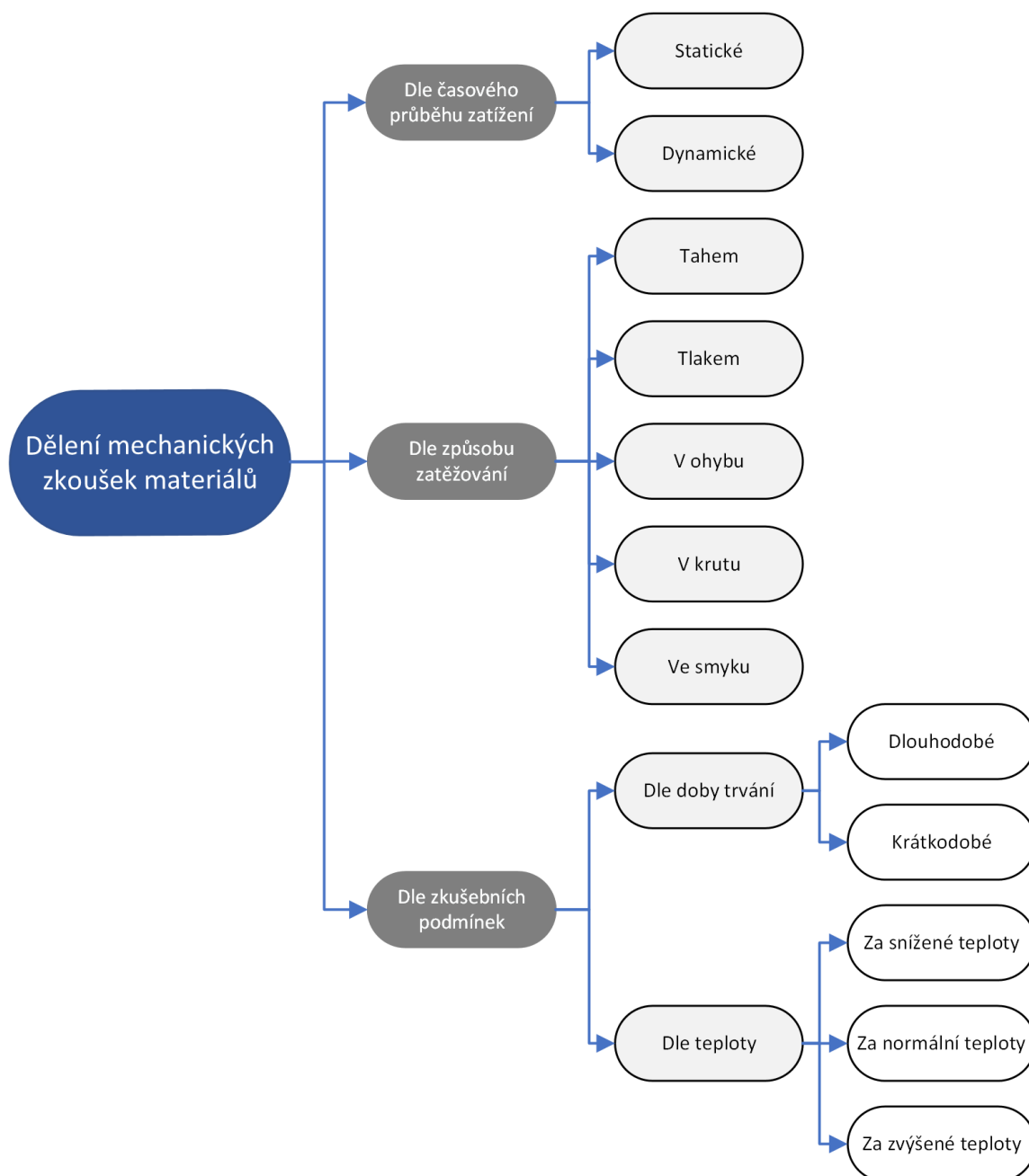


Obr. 9 – Základní druhy namáhání materiálů

(Driml, 2020, s. 3)

4.5 Dělení mechanických zkoušek

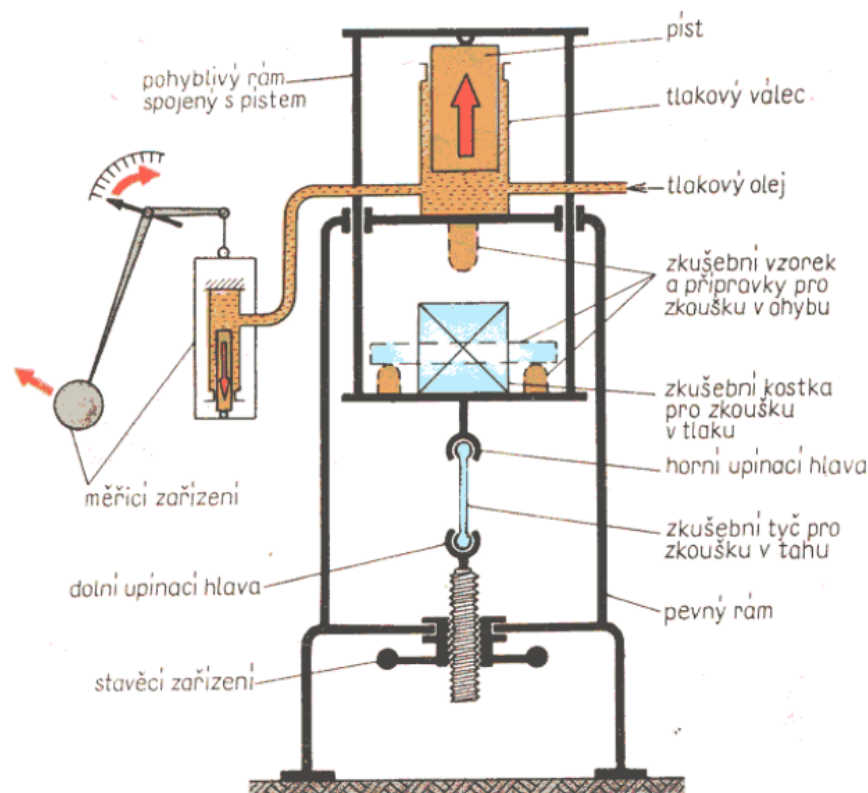
Podle Macka a Zuny, (1996, s. 74) jsou mechanické vlastnosti materiálů stanovovány pomocí normalizovaných mechanických zkoušek, které slouží ke vzájemnému porovnání mechanických vlastností zkoušených materiálů. Normalizované zkoušky mají přesně definované zkušební podmínky.



Obr. 10 – Dělení mechanických zkoušek materiálů (Macek a Zuna, 1996)

5 ZKOUŠKA TAHEM

Mezi jednu z nejstarších a nejpoužívanějších zkoušek materiálů sloužících k hodnocení jejich mechanických vlastností patří zkouška tahem. Při tahové zkoušce dochází k namáhání materiálu silou, dokud nedojde k jeho porušení. (Driml, 2022; Moravčík, 2015)



Obr. 11 – Univerzální zkušební stroj pro zkoušku tahem, tlakem a ohybem (Driml, 2022, s. 4)

5.1 Princip zkoušky tahem a používané zkušební vzorky

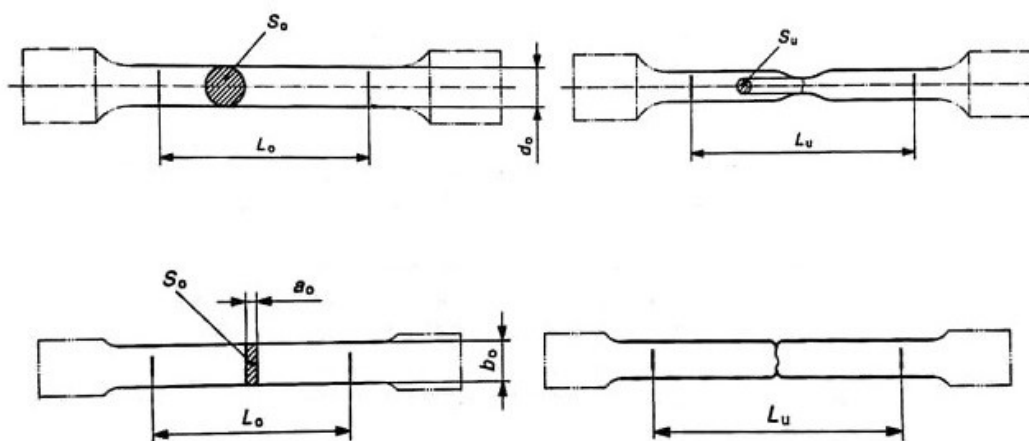
Zkušební vzorky, které se používají pro tahovou zkoušku, se nazývají zkušební tyče. Tvary těchto vzorků mají zpravidla kruhový nebo obdélníkový průřez (viz obr. 12), v některých případech mohou mít i jiný průřez. Rozměry zkušebních tyčí pro testování mechanických vlastností polymerních materiálů jsou stanoveny normou ČSN EN ISO 527. V případě tahové zkoušky jsou zkušební vzorky vystaveny jednoosému namáhání v tahu, dokud nedojde k jejich přetržení. Zkušební tyč se upíná do čelistí trhacího zařízení. Cílem zkoušky je stanovení mechanických vlastností zkoušeného materiálu v tahu. (Machek, 2014)

Před zahájením tahové zkoušky je na zkušební tyči vyznačen úsek „počáteční měřené délky“ L_0 (viz obr. 12), na tomto úseku jsou následně zjišťovány hodnoty, které slouží k určení mechanických vlastností zkoušeného materiálu. Výpočet počáteční měřené délky vychází ze vztahu:

$$L_0 = k * \sqrt{S_0} \text{ [mm]} \quad (1)$$

- L_0 – počáteční měřená délka zkušební tyče v mm ,
- k – součinitel proporcionality,
- S_0 – plocha počátečního průřezu zkušební tyče v mm^2 . (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Součinitel proporcionality k nabývá hodnot 11,3 nebo 5,65. Součinitel proporcionality 5,65 se volí jen v případech, kdy L_0 je větší než 20 mm. (Machek, 2014)



Obr. 12 – Zkušební tyče: před a po přetržení – původní průřezy a měřené délky jsou označeny S_0 a L_0 , konečné S_u a L_u . (Machek, 2014, s. 41)

5.2 Pracovní diagram

V průběhu tahové zkoušky trhací stroj zvyšuje tahovou sílu F , čímž dochází k prodlužování zkušební tyče. Původní měřená délka L_0 se prodlužuje o ΔL na okamžitou délku L_i :

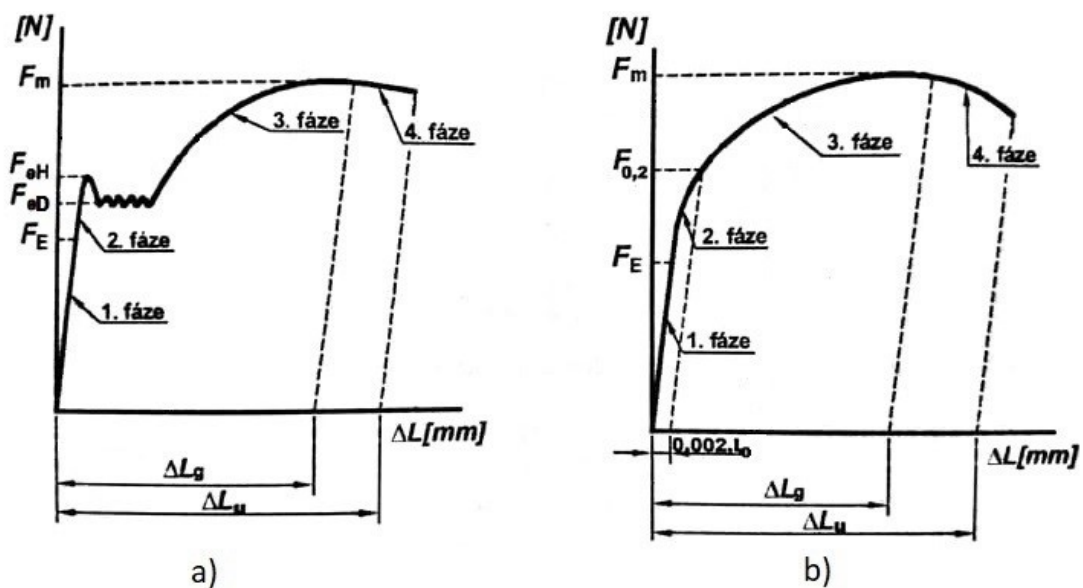
$$L_i = L_0 + \Delta L \text{ [mm]} \quad (2)$$

- L_i – okamžitá délka zkušební tyče v mm ,
- L_0 – počáteční měřená délka zkušební tyče v mm ,
- ΔL – okamžité prodloužení zkušební tyče v mm . (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Na základě snímaných dat je pracovním diagramem znázorňována grafická závislost prodloužení ΔL na vyvozené síle F . Původní průřez S_0 zkušební tyče se v průběhu tahové zkoušky mění na okamžitý průřez zkušební tyče S_i (viz kap. 5.3.1 Smluvní tahový diagram). (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Machek, 2014, s. 43 ve své publikaci rozdělil pracovní diagram na dva typy. (viz obr. 18):

- Pracovní diagram znázorňující výraznou mez kluzu.
- Pracovní diagram znázorňující nevýraznou mez kluzu.



Obr. 13 – Pracovní diagramy s výraznou a nevýraznou mezí kluzu (Machek, 2014, s. 43)

Machek, 2014, s 43-46 rozdělil pracovní diagram na čtyři úseky odpovídající čtyřem fázím tahové zkoušky.

1. Fáze

V oblasti pružných deformací platí Hookeův zákon (viz kap. 5.3.2). Zkoušený materiál se deformuje elasticky a platí lineární závislost mezi zatížením a deformací. Z pracovních diagramů (viz obr. 13) je patrné, že tato fáze je ve tvaru přímky. Po ukončení namáhání se zkušební tyč vrátí do původní délky. Konec pružných deformací je ohraničen silou na mezi úměrnosti F_E . Tato síla se v běžné praxi nezjišťuje, a to zejména z důvodu, že je téměř nepozorovatelná a u většiny polymerů se ani nevyskytuje. (Machek, 2014)

2. Fáze

Machek, 2014, s. 44 ohraničil konec 2. fáze silou na mezi kluzu, po překročení této síly dojde ke vzniku trvalé deformace. Tato deformace může pokračovat dvěma způsoby:

- a) Vznikem výrazné meze kluzu, u které vzniká prodleva, či zlomu. Pokud je úsek prodlevy větší, lze určit horní mez kluzu a dolní mez kluzu (viz obr. 13/a).
- b) Plynulou deformací (viz obr. 13/b), která je ukončena dosažením smluvní meze kluzu s velikostí 0,2 % původní měřené délky zkušební tyče.

3. Fáze

Ve 3. fázi dochází k plastické deformaci zkoušeného materiálu. Dosažením meze kluzu se zkušební vzorek vlivem zvyšujícího zatížení po celé své délce trvale deformuje, a to až do doby poklesu zatěžující síly. Po překročení meze kluzu se začne vytvářet na zkušebním vzorku zúžení (krček). Jako F_m se označuje největší dosažené zatížení (viz obr. 13). (Machek, 2014)

4. Fáze

V poslední fázi klesá zatěžující síla a postupným zužováním průřezu lze jasně identifikovat krček. Zkušební tyč se i přes klesající zátěžové síly prodlužuje, a to výhradně v zúžené oblasti, kde skutečné silové napětí stoupá. Tahová zkouška je po přetržení zkušební tyče v této fázi ukončena. (Machek, 2014)

5.3 Výpočet normalizovaných parametrů tahové zkoušky

V této kapitole jsou popsány základní normalizované parametry, které stanovuje norma ČSN EN ISO 527. Tyto parametry slouží k porovnání mechanických vlastností testovaných materiálů.

5.3.1 Smluvní diagram tahové zkoušky

Pracovní diagramy (viz obr. 13) se pro možnost vzájemného porovnání zkoušených materiálů přepočítávají na smluvní tahové diagramy (viz obr. 14) znázorňující tahové napětí a poměrné prodloužení. Smluvní tahový diagram zohledňuje vyhodnocení zkoušky pro daný původní průřez a délku zkušební tyče (S_0 a L_0). (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Vlivem zatěžování zkušební tyče vzniká tahové napětí. Toto napětí je označováno jako **skutečné napětí** σ . Výpočet vychází ze vztahu:

$$\sigma = \frac{F}{S_i} [MPa] \quad (3)$$

- σ – skutečné tahové napětí v MPa ,
- F – zatěžující síla v N ,
- S_i – aktuální průřez zkušební vzorku v mm^2 . (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Poměrné prodloužení ε se počítá pomocí vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [\%] \quad (4)$$

- ε - poměrné prodloužení zkušební vzorku v $\%$,
- ΔL – změna délky zkušební vzorku v mm ,
- L_0 – počáteční měřená délka zkušební vzorku v mm . (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

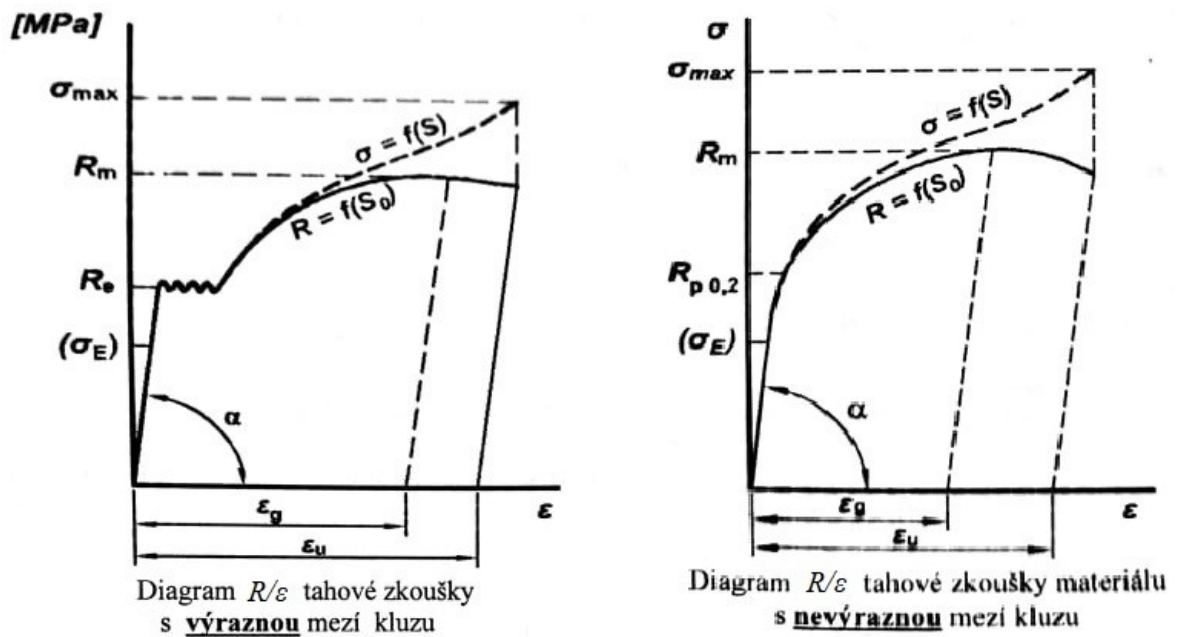
Pro výpočet skutečného napětí je potřeba znát okamžitý průřez S_i . Jelikož se skutečné průřezy v průběhu zkoušky tahem neustále mění, je celosvětově dohodnuto užívání tzv. smluvního napětí R . (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Smluvní napětí R se vypočítá ze vztahu:

$$R = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (5)$$

- R – smluvní napětí v MPa ,
- F – zatěžující síla v N ,
- S_0 - počáteční průřez zkušební vzorku v mm^2 . (Machek, 2014)

K porovnání smluvního napětí R a poměrného prodloužení σ je možné aplikovat smluvní tahový diagram R/ε (viz obr. 14). V průběhu zkoušky tahem skutečné napětí σ oproti smluvním napětí R roste ($\sigma > R$). (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Obr. 14 – Diagramy R/ε (Machek, 2014, s.47)

5.3.2 Modul pružnosti v tahu a Hookův zákon

Hookův zákon vyjadřuje v oblasti pružné deformace vztah mezi skutečným napětím σ a poměrným prodloužením ε . Vzorec lze formulovat následovně:

$$\sigma = \frac{F}{S_i} = E * \frac{\Delta L}{L_0} = E * \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (6)$$

- σ – skutečné tahové napětí v MPa ,
- F – zatěžující síla v N .
- S_i – okamžitý průřez zkušební vzorku v mm^2 ,
- E – modul pružnosti v tahu v MPa (viz vztah 7),
- ΔL – celkové prodloužení zkušební vzorku v mm ,
- L_0 – počáteční měřená délka zkušební vzorku v mm ,
- ε – poměrné prodloužení zkušební vzorku v % (viz vztah 4). (Vojtěch, 2010)

Modul pružnosti v tahu je materiálová vlastnost, která charakterizuje tuhost materiálu. Materiály vyznačující se vysokým modulem pružnosti, se deformují neochotně, patří zde např. keramika nebo sklo. Naopak materiály, které se vyznačují nízkým modulem pružnosti, je možné deformovat působením poměrně malých vnějších sil. Mezi polymerní materiály s nejnižším modulem pružnosti patří elastomery, například kaučuk. (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Hodnota E označována jako směrnice přímky, je konstantou modulu pružnosti v tahu a vyjadřuje ji vztah:

$$E = \tan \alpha \text{ [MPa]} \quad (7)$$

- E – modul pružnosti v tahu v MPa ,
- α – úhel svírající přímku s osou poměrného prodloužení. (Machek, 2014)

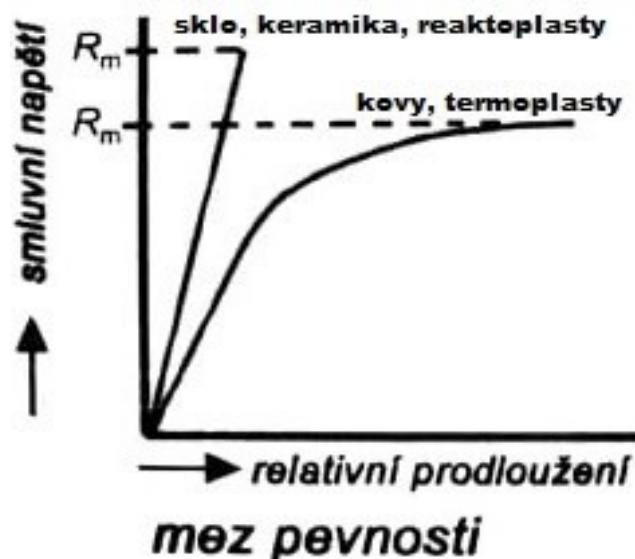
5.3.3 Mez pevnosti v tahu

Mez pevnosti v tahu je největší možné napětí v materiálu při jednoosém silovém namáhání, kterému zkoušený materiál jako celek odolává, a to bez porušení (viz obr. 15). U křehkých polymerních materiálů, mezi které patří např. reaktoplasty, se obvykle testuje pevnost v ohybu a tlaku. Pevnosti u aplikovaných aditivních materiálů dosahují poměrně nízkých hodnot (cca 100 MPa), např. kovy dosahují kolem 3 KPa. (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Vztah pro výpočet meze pevnosti:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (8)$$

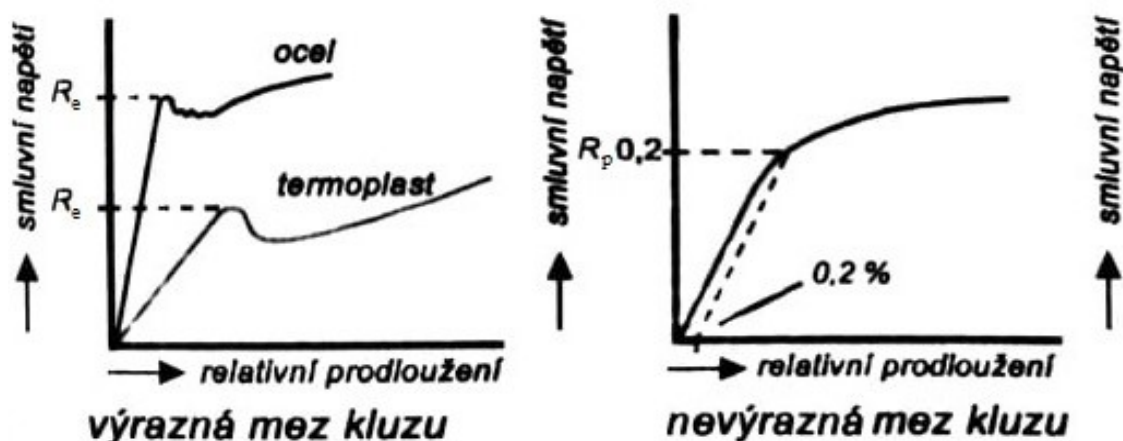
- R_m – maximální dosažené smluvní napětí v MPa ,
- F_m – maximální dosažená síla v N ,
- S_0 – plocha původního průřezu zkušební vzorku v mm^2 .



Obr. 15 – Mez pevnosti (Vojtěch, 2010, s. 107)

5.3.4 Mez kluzu

Jedná se o napětí, po jehož překročení dochází k prvním trvalým deformacím, do této doby platí Hookův zákon. Označuje se jako nevýrazná „Smluvní“ mez kluzu $R_{p0,2}$ nebo výrazná mez kluzu R_e . Výrazná mez kluzu se uvádí u materiálů, u kterých lze hranici trvalé deformace určit (např. kovy a termoplasty). V případě materiálů kde nelze hranice trvalé deformace přesně určit, tj. s nevýraznou mezí kluzu, se mez kluzu stanovuje z předepsaných hodnot smluvní meze kluzu (obvykle 0,2 %). (Moravčík, 2015; Vojtěch, 2010)



Obr. 16 – Mez kluzu (Vojtěch, 2010, s. 107)

Výpočet výrazné meze kluzu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

- R_e – poměr síly na výrazné mezi kluzu v MPa ,
- F_e – síla na výrazné mezi kluzu v N ,
- S_0 – plocha původního průřezu zkušební vzorku v mm^2 . (Moravčík 2015; Machek, 2014)

U výrazné meze kluzu se v některých případech rozlišuje na horní a dolní mez kluzu:

1. Výpočet horní meze kluzu:

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

2. Výpočet dolní meze kluzu:

$$R_{eD} = \frac{F_{eD}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

Výpočet nevýrazné mezi kluzu:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

- $R_{p0,2}$ – poměr síly na výrazné mezi kluzu v MPa ,
- $F_{p0,2}$ – síla na výrazné mezi kluzu v N ,
- S_0 – plocha původního průřezu zkušební vzorku v mm^2 . (Moravčík 2015)

5.3.5 Tažnost

Tažnost (A) je vlastnost materiálu, která v procentech vyjadřuje maximální poměr trvalého prodloužení ε_u . Vypočtená hodnota tažnosti se zaokrouhluje na desetiny procent. U termoplastů a kovů lze pomocí tažnosti určovat jejich tvárnost. U slitin, skla, reaktoplastů nebo keramiky udává tažnost jejich křehkost. (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

Vztah tažnosti:

$$A = 100 * \varepsilon_u = 100 * \frac{\Delta L_u}{L_0} \text{ [%]} \quad (13)$$

- A – tažnost v %,
- ε_u – poměrné trvalé prodloužení v % (viz kap. 4.3.1),
- ΔL_u – absolutní přírůstek původní měřené délky zkušební vzorku po přetržení v mm ,
- L_0 – počáteční měřená délka zkušební vzorku v mm^2 . (Moravčík, 2015)

Tažnost se značí písmenem A . V případě využití zkušebních vzorků se součinitelem proporcionality $k = 11,3$ se značí indexem ($A_{11,3}$). Pokud je součinitel proporcionality $k = 5,3$. Index se neoznačuje. (Machek, 2014)

Standardně je při provádění tahových zkoušek používán průtahoměr, pokud tomu tak není, je nutné konečnou délku tyče zjistit, a to přiložením obou polovin zkušební tyče k sobě a vypočítáním absolutního přírůstku ΔL_u ze vztahu:

$$\Delta L_u = L_u - L_0 \text{ [mm]} \quad (14)$$

- ΔL_u – absolutní přírůstek původní měřené délky zkušební vzorku po přetržení v mm ,
- L_u – konečná délka zkušební vzorku v mm ,
- L_0 – počáteční délka zkušební vzorku v mm . (Moravčík, 2015; Machek, 2014)

6 PROJEKTOVÝ MANAGEMENT

Projektový management je formální proces identifikace, koordinace a nasazení lidských a jiných zdrojů, které jsou zapotřebí k dosažení stanovených projektových cílů. Projektové cíle jsou vždy ohraničeny časovým harmonogramem, náklady a kvantitativními požadavky. (Štefánek, 2011; Chvalovský, 2005)

Podnikové projekty mohou realizovat jak interní kompetentní odborníci prostřednictvím vlastních prostředků společnosti, tak externí subjekty. Podnikové projekty často nepatří mezi krátkodobé záležitosti, nýbrž představují dlouhodobé procesy, které jsou tvořeny fázemi životního cyklu projektu (viz kap. 6.4). (Štefánek, 2011; Chvalovský, 2005)

6.1 Definice projektu

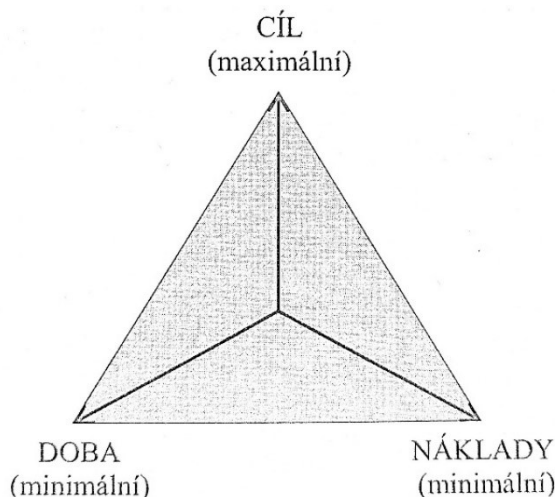
Projekt je nejdůležitějším prvkem projektového managementu, je to dočasná aktivita vedoucí ke vzniku unikátního produktu, služby či jiného výsledku. Každý projekt je jedinečný, přičemž je to zejména sled aktivit a úkolů, které mají specifikovaný cíl, jež je splněn realizací projektu. Projekt je termínově ohraničený, má definovaný začátek a konec, což tvoří harmonogram projektu. Mimo časové omezení je projekt zpravidla limitován v rámci zdrojů dostupných k jeho realizaci. (Doskočil, 2013; Štefánek, 2011; Chvalovský, 2005)

6.2 Projektový trojimperativ

Definice projektu z pohledu projektového managementu zdůrazňuje tři hlavní parametry. Tyto parametry jsou klíčovým východiskem při rozhodování o projektu a zároveň definují výstup projektu. Tato trojice parametrů je označována jak tzv. **trojimperativ** (viz obr. 17):

1. Co má být uděláno (cíl).
2. Kdy to má být uděláno (doba).
3. Kolik to bude stát (náklady). (Doskočil, 2013; Chvalovský, 2005)

Mezi výše uvedenými parametry existuje vzájemný vztah, tj. v případě kdy se jeden z parametrů změní a zároveň musí druhý zůstat nezměněn, pak se nutně musí změnit parametr třetí, a to adekvátním způsobem. Nemůže tedy docházet k protichůdným požadavkům, ale je nutné hledat vhodný kompromis, tím se rozumí identifikace nejvhodnější varianty nákladů, cílů a doby trvání pro konkrétní projekt. (Doskočil, 2013; Chvalovský, 2005)



Obr. 17 – Trojimperativ projektu

(Doskočil, 2013, s. 15)

6.3 Metoda SMART

K definování cílů projektu je vhodné stanovit slovní popis účelu, kterého má být v rámci projektu dosaženo. Pro správnou definici projektových cílů se využívá metoda SMART.

U této metody je každý cíl podroben následujícím otázkám:

S – Specifický (specifický a konkrétní).

M – Měřitelný (měřitelný k identifikaci dosažení cíle).

A – Akceptovatelný (přijatelný).

R – Realistický (realistický a dosažitelný s použitím disponibilních zdrojů).

T – Časově ohraničený. (Doskočil, 2013; Chvalovský, 2005)

6.4 Životní cyklus projektu

Projekt je proces, který se vyvíjí a v průběhu se nachází v několika různých životních fázích.

Z hlediska časové dimenze se skládá z následujících fází:

1. Výběr projektu
2. Plánování a koncepce
3. Implementace
4. Ukončení projektu
5. Audit projektu (Chvalovský, 2005)

Doskočil, 2013, s. 16 ve své publikaci charakterizuje tři základní fáze životního cyklu projektu:

1. Předprojektová fáze – analýzy, studie (studie příležitosti, studie proveditelnosti), strategické úvahy.
2. Projektová fáze – plánování (struktura projektu, činnosti, vazby, optimalizace), řízení (realizace projektu).
3. Poprojektová fáze – ukončení projektu.

6.5 Logický rámec

Jedou z metod jak jednoduše a přehledně zmapovat záměry a očekávání, která chceme uvést do souladu s konkrétními výstupy a činnostmi v průběhu realizace projektu, je metoda logického rámce. Pomocí logického rámce lze stručně, srozumitelně a přehledně popsat projekt. Logický rámec je na jedné straně vhodný pro identifikaci a analýzu problémů a na straně druhé, je vhodný k definování cílů a stanovení konkrétních aktivit k jejich řešení. Podoba logického rámce je jasně ohraničená tabulka (matice), která se skládá ze čtyř sloupců a čtyř řádků (viz obr. 18 a 19). (Štefánek, 2011)

Popis	Objektivně ověřitelné ukazatele	Prostředky k ověření	Předpoklady/rizika
	Objektivně ověřitelné ukazatele vyjadřují odpovědi na otázky typu: co, kolik, kdy, pro koho, kde? Tyto ukazatele vytvářejí základ pro měření efektivitu a účelnosti projektu. Počet ukazatelů pro měření jedné činnosti, výsledku nebo cíle projektu se zpravidla pohybuje mezi dvěma až třemi ukazateli.		
Záměr <ul style="list-style-type: none"> • Cíl vyššího stupně, k jehož dosažení je projekt jen jednou z předběžných podmínek. 	<ul style="list-style-type: none"> • Jaké jsou konkrétní kvantitativní měřítka nebo kvalitativní posudky, které nám umožní zhodnotit úspěšnost naplňování záměru. • Měřitelné indikátory (počet, délka, obsah...). • Způsoby, kterými lze měřit splnění záměru. 	Jaký druh informací bude potřeba a kde je najdeme, abychom ověřili, zda se nám stanovený záměr podařilo naplnit (statistiky, monitorovací zprávy...).	

Obr. 18 – Matice logického rámce 1/2 (Štefánek, 2011, s. 46)

Popis	Objektivně ověřitelné ukazatele	Prostředky k ověření	Předpoklady/rizika
<p>Cíl</p> <p>Změna, kterou chceme dosáhnout projektem. Projekt může mít jenom jediný jasný cíl.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Měřitelné indikátory na úrovni výsledků – konkrétní hodnoty jednotlivých cílů projektu (počet, délka, obsah). Způsoby, kterými lze měřit splnění cíle. 	<p>Jaký druh informací bude potřeba a kde je najdeme, abychom ověřili, zda se nám stanovený cíl podařilo naplnit (statistiky, monitorovací zprávy...).</p>	<p>Jakým rizikům je nutno předejít, abychom byli schopni naplnit záměr projektu.</p>
<p>Výstupy</p> <ul style="list-style-type: none"> Očekávané produkty či služby dosažené realizací projektu, tak aby byl naplněný cíl. Výstupů by nemělo být více než 10. Co bylo vytvořeno: <ol style="list-style-type: none"> 	<ul style="list-style-type: none"> Měřitelné indikátory na úrovni výstupů: konkrétní hodnoty jednotlivých cílů projektu (počet, délka, obsah). Způsoby, kterými lze měřit splnění účelu. Do kdy (konkrétní datum) a kolik (počet kusů, množství). 	<p>Jaký druh informací bude potřeba a kde je najdeme, abychom ověřili, zda se nám stanovený cíl podařilo naplnit (statistiky, monitorovací zprávy...).</p>	<p>Jakým rizikům je nutno předejít, abychom byli schopni naplnit cíl projektu.</p>
<p>Činnosti</p> <ul style="list-style-type: none"> Činnosti patřící k jednotlivým výstupům, které mají být vykonány spolu se zdroji, které musí být dostupné pro vytvoření těchto výstupů. Ke každému výstupu stanovíme dvě až čtyři činnosti projektu, jež podle nás povedou k jejich dosažení a jsou nezbytnou součástí daných výstupů. Uvádějí se pouze činnosti, které mají být financovány či spolufinancovány v rámci tohoto projektu. Veškeré činnosti musí mít přímou vazbu na jednotlivé výstupy. 	<ul style="list-style-type: none"> Doba trvání jednotlivých činností (udává se vždy ve stejné jednotce, např. dny). Časový rámec činností: ke každé činnosti se uvede časový údaj, kdy daná činnost bude provedena. 	<ul style="list-style-type: none"> Lidské, finanční nebo materiální zdroje potřebné pro realizaci činností. Podklady pro vyhotovení rozpočtu projektu. 	<p>Jakým rizikům je nutno předejít, abychom byli schopni realizovat výstupy projektu.</p>
		<p>Předběžné podmínky</p> <ul style="list-style-type: none"> Co všechno je nutné udělat před zahájením práce na projektu. 	

Obr. 19 – Matice logického rámce 2/2 (Štefánek, 2011, s. 46)

7 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části diplomové práce byly stručně rozebrány principy aditivních technologií 3D tisku a jejich výhody a nevýhody. Dále byl popsán princip aditivní technologie Fused Filament Fabrication (FFF), včetně jejího využití, výhod a nevýhod, typů uspořádání (kartézské, polární, delta, SCARA), typů extruze nebo post-processingu. V této části práce byl také popsán rozdíl mezi aditivními technologiemi Fused Filament Fabrication (FFF) a Fused Deposition Modeling (FDM).

Další část se zabývá charakteristikou polymerních materiálů. Zde jsou stručně popsány jejich dvě základní skupiny, a to elastomery a plasty. Autor se zaměřuje především na plasty, které jsou aplikované v praktické části práce. Popisuje jejich použití, ale také výhody a nevýhody. Dále se zde zabýval příčinami degradace polymerních materiálů.

V teoretické části se dále autor zabývá rozborem mechanických vlastností materiálů, mezi které patří zejména pevnost, pružnost, houževnatost a plasticita. Dále popisuje dělení mechanických zkoušek. Podrobně je zde rozebrána mechanická zkouška statická tahem, kde je popsán její princip, používané typy zkušebních vzorků, pracovní diagram a výpočet základních normalizovaných parametrů.

Poslední část je věnována projektovému managementu. Je zde popsán proces projektového managementu, projektové cíle a základní prvky projektu. Dále se autor stručně věnuje projektovému trojimperativu a logickému rámci projektu.

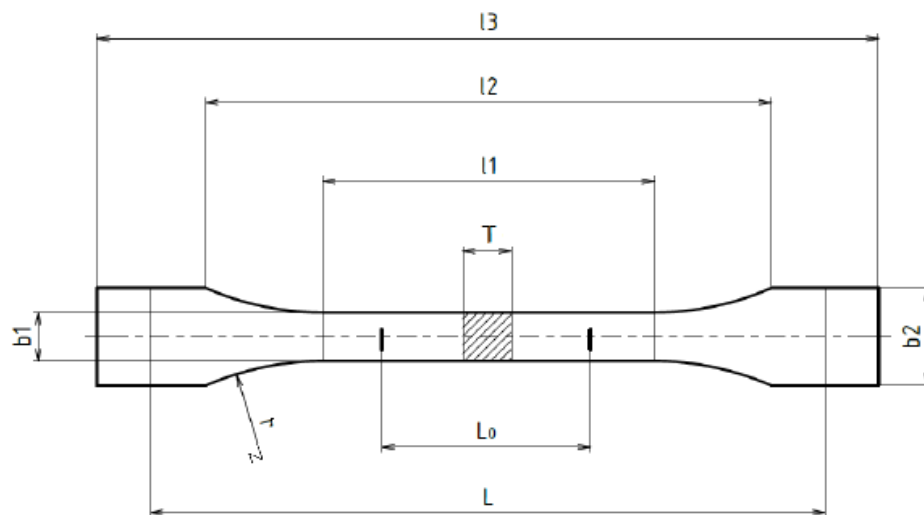
II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Tato část práce zahrnuje návrh normalizovaných zkušebních vzorků v CAD programu, zhotovení vzorků pomocí 3D tiskárny a jejich vystavení degradačním vlivům.

8.1 Návrh normalizovaných zkušebních tyčí

Tvar a rozměr zkušebního tělesa byl stanoven dle normy ČSN EN ISO 527, tato norma určuje zkušební podmínky ke stanovení mechanických vlastností polymerů. Norma ČSN EN ISO 527 je určena pro zkoušení zkušebních tyčí, vyrobených odléváním, lisováním, vstřikováním nebo vytlačováním. Norma byla použita, jelikož pro zkoušení mechanických vlastností materiálů vyrobených aditivní technologií jiná neexistuje. Pro stanovení mechanických vlastností aplikovaných aditivních materiálů bylo zvoleno zkušební těleso/tyč typu 1BA (viz obr. 20). Rozměry zkušební tyče 1BA jsou uvedeny v tabulce č. 4. Normou je stanoveno, že v případě není-li z jakýchkoliv důvodů možné použít standardní zkušební tyče typu 1A a 1B, je doporučeno využít některou ze zmenšených zkušebních tyčí typu 1BA, 1BB, 5A nebo 5B. Ke snížení nákladnosti tisku a úspoře času výroby, byla vybrána zkušební tyč typu 1BA. (ČSN EN ISO 527-1, 2012; ČSN EN ISO 527-2, 2012)



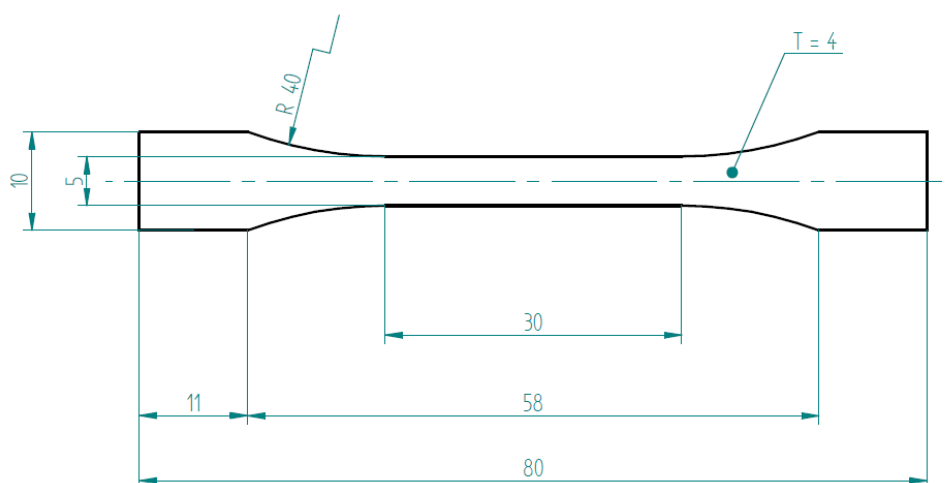
Obr. 20 – Zkušební těleso 1BA (ČSN EN ISO 527-2, 2012)

Tab. 4 – Rozměry zkušební tyče 1BA (ČSN EN ISO 527-2, 2012)

Název	Parametr	Rozměr (mm)
Počáteční vzdálenost mezi čelistmi trhačímho stroje	L	$l_2 + 0$ až 2
Počáteční měřená délka zkušební tyče	L_0	$25,0 \pm 0,5$
Délka zúžené části s rovnými hranami zkušební tyče	l_1	$30,0 \pm 0,5$
Vzdálenost mezi osazeními zkušební tyče	l_2	58 ± 2
Celková délka zkušební tyče	l_3	≥ 75
Šířka zúžené části zkušební tyče	b_1	$5,0 \pm 0,5$
Šířka upínací části zkušební tyče	b_2	$10,0 \pm 0,5$
Tloušťka zkušební tyče	T	≥ 2
Poloměr mezi zúženou a upínací částí	r	≥ 30

8.2 Model zkušební tyče

K výrobě vzorků pomocí 3D tisku bylo nutné vytvořit model ve CAD programu. Model zkušební tyče byl vytvořen v parametrickém CAD programu SolidEdge, který umožnil převod modelu do formátu STL. Tento formát je vhodný pro export dat do Sliceru. Model (viz obr. 21) byl vymodelován o rozměrech, které stanovuje umožňuje norma ČSN EN ISO 527 (viz tab. 4).



Obr. 21 – Výkres zkušební tyče (Dynka, 2020, s. 46)

8.3 Volba materiálů pro zhotovení zkušebních tyčí

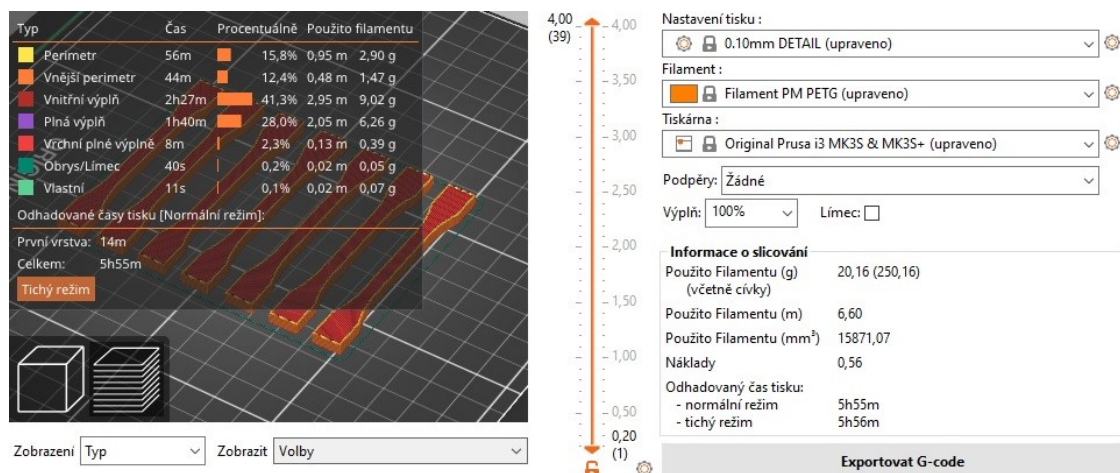
Pro výrobu zkušebních tyčí byly zvoleny běžně dostupné materiály pro FFF / FDM technologie. Jedná se o materiály PLA, ABS, ASA a PET-G, přičemž testovány byly aditivní materiály od výrobce Filament-PM, a to na základě výsledků z provedených analýz publikace Dynka (2022, str. 73). Od každého materiálu bylo vyrobeno sedm zkušebních vzorků pro každou sérii testování. Jedna testovací sada tvořila dohromady šest skupin o 42 vzorcích. Pro lepší přehlednost byla vytvořena tabulka 5 obsahující přehled použitých materiálů od vybraného výrobce.

Tab. 5 – Seznam aditivních materiálů (vlastní zpracování)

Materiál	Výrobce	Barva	Označení zkušebních tyčí (kód)
PLA	Filament-PM	Zelená	PLA 1 až PLA 7
ABS	Filament-PM	Bílá	ABS 1 až ABS 7
ASA	Filament-PM	Modrá	ASA 1 až ASA 7
PET-G	Filament-PM	Černá	PET-G 1 až PET-G 7

8.4 Nastavení tiskových parametrů

Modely vytvořené parametrickými CAD programy jsou pro aditivní technologie standardně převedeny do formátu STL. Jelikož je tento typ souboru pro 3D tiskárnu Prusa i3 MK3 nesrozumitelný, je nutné provést převod souboru do srozumitelného formátu tiskárny, kterým je G-code. Tento převod se provádí programem zvaným Slicer. V případě této diplomové práce autor použil PrusaSlicer (viz obr. 22).



Obr. 22 – PrusaSlicer (vlastní zpracování)

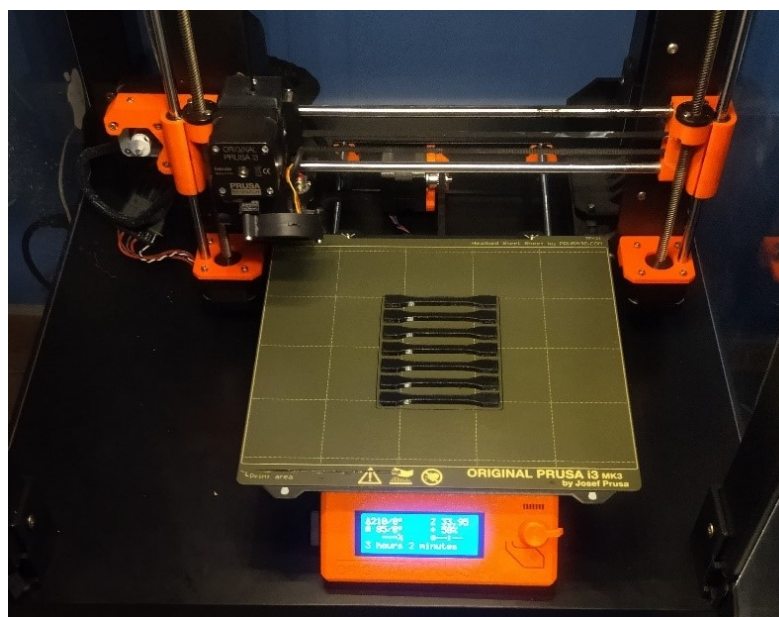
Tento program umožňuje nastavení veškerých potřebných parametrů tisku (viz tab. 6) a převod modelu do G-code.

Tab. 6 – Tiskové parametry (vlastní zpracování)

Tiskové parametry				
Materiál	PLA	ABS	ASA	PET-G
Průměr trysky	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm	0,25 mm
Tloušťka vrstvy	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,1 mm
Procento výplně	100 %	100 %	100 %	100 %
Vnitřní vzor výplně	Přímočarý	Přímočarý	Přímočarý	Přímočarý
Rychlost tisku	180 mm/s	180 mm/s	180 mm/s	180 mm/s
Teplota tisku	210 °C	230 °C	240 °C	235 °C
Teplota podložky	55 °C	100 °C	110 °C	80 °C
Chlazení	ANO	NE	NE	ANO

8.5 Tisk zkušebních vzorků

Tisk zkušebních vzorků probíhal na 3D tiskárně Prusa i3 MK3 od výrobce Prusa Research (viz obr. 23). Jedná se o zařízení, které spadá do kategorie hobby, v porovnání s profesionálními 3D tiskárnami dosahuje nižších přesností, ale jeho hlavní výhodou je cenová dostupnost. K testování bylo zhotoveno celkem 168 zkušebních vzorků.



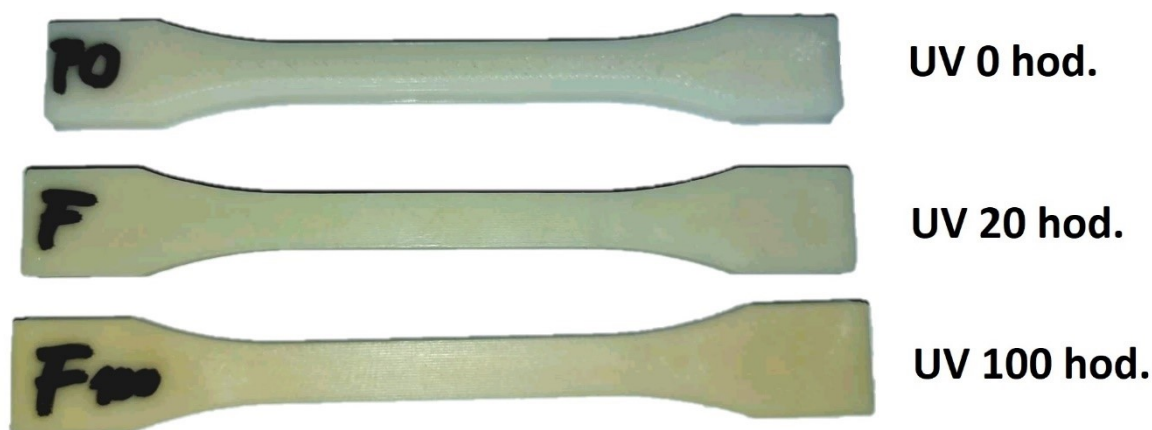
Obr. 23 – Tisk zkušebních vzorků (vlastní zpracování)

9 VYSTAVENÍ VZORKŮ DEGRADAČNÍM VLIVŮM

Až na kontrolní sadu, byly jednotlivé sady zkušebních vzorků vystaveny degradačním vlivům, které byly vybrány dle dostupných možností v laboratorních a domácích podmínkách. Vystavení vzorků degradačním vlivům a jejich testování probíhalo ve spolupráci s autorem publikace Jiroušek (2021, s. 37-42).

9.1 Vliv UV záření

Ozařování zkušebních vzorků sloužící k určení působení UV záření na testované materiály probíhalo v domácích podmínkách, a to pomocí infračervené lampy s rtuťovou výbojkou o výkonu 125 W. K testování byly použity dvě sady vzorků, kdy první sada byla vystavena záření po dobu 20 hodin a druhá sada po dobu 100 hodin. Zkušební vzorky byly vystaveny UV záření ze vzdálenosti přibližně 40 cm. Aby byla zajištěna rovnoměrnost ozařování, byly vzorky otáčeny v pravidelných intervalech jedné hodiny. U první testovací sady bylo po 20 hodinách možné na vzorcích materiálu ABS pozorovat mírné žloutnutí. Povrch materiálu PLA se stal lepkavým, u vzorků z materiálů ASA a PETG nebyly zaznamenány žádné viditelné změny. U druhé sady vzorků byly po 100 hodinách ozařování patrnější barevné změny u vzorků ABS (viz obr. 24).



Obr. 24 – Vliv UV záření ABS (Jiroušek, 2021, s. 38)

9.2 Vliv teplotních FT cyklů (*freeze-thaw cycle*)

Testování teplotních FT cyklů probíhalo střídáním působení mrazu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pokojové teploty $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každý cyklus trval 15 hodin, přičemž vzorky byly vystaveny celkově 100 takovýmto cyklům.

9.3 Výdrž na teplotě 60 °C

Pro testování degradace vybraných materiálů vlivem působení teploty byla zvolena teplota 60 °C, a to z důvodu minimalizace možné tvarové deformace vzorků, která by bránila následnému testování mechanickou zkouškou statickou tahem. U materiálů PLA je obecná oblast skelného přechodu 60 °C, u ostatních testovaných materiálů je teplota skelného přechodu vyšší. Sada vzorků byla v tomto případě vložena do pece při teplotě 60 °C po dobu 100 hodin (viz obr. 25)

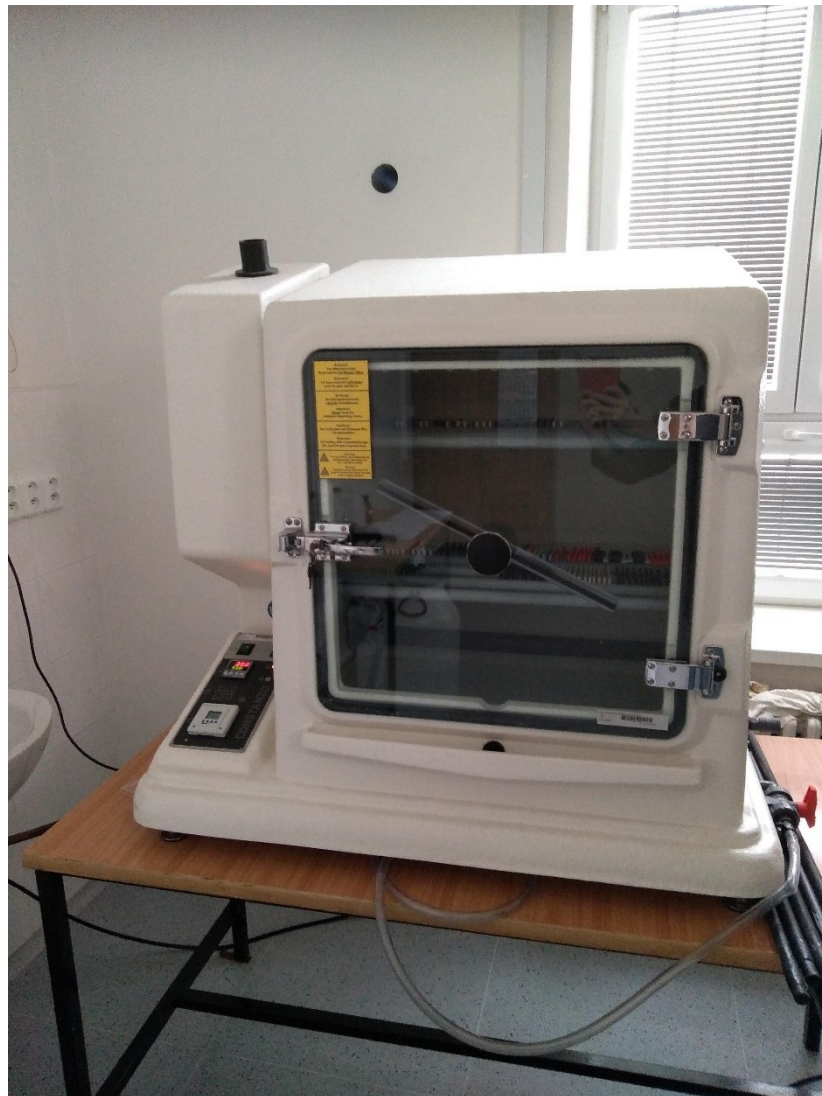


Obr. 25 – Testování výdrže na teplotě 60 °C

(Jiroušek, 2021, s. 39)

9.4 Vliv vlhkého prostředí

K dalšímu testování byla využita kondenzační komora KB300 CONSTANZO (viz obr. 26), toto zařízení v našem případě sloužilo k určení vlivu navlhavosti a nasákavosti na mechanické vlastnosti testovaných materiálů. Před umístěním sady vzorků do zařízení musely být všechny vzorky zváženy, aby po ukončení testování bylo možné na základě změny jejich hmotnosti odhadnout množství absorbované vody. Po umístění vzorků do kondenzační komory byla nastavena vlhkost prostředí na 100 % a teplota na 55 °C, vzorky byly vyjmuty po 100 hodinách, přičemž po vyjmutí byly ihned podrobeny testování mechanickou zkouškou statickou tahem.



Obr. 26 – Kondenzační komora (Jiroušek, 2021, s. 38)

10 PROVEDENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Zwick Z100 (viz obr. 27). Na tomto zkušebním zařízení je možné provádět zkoušky při pokojové teplotě do maximální zkušební síly 100 kN. Stroj je vybaven upínacími čelistmi, které umožňují uchycení plochých zkušebních vzorků. Měřená data jsou zasílána ze zkušebního stroje přes datový kabel do počítače, kde jsou vyhodnocována programem testXpert.



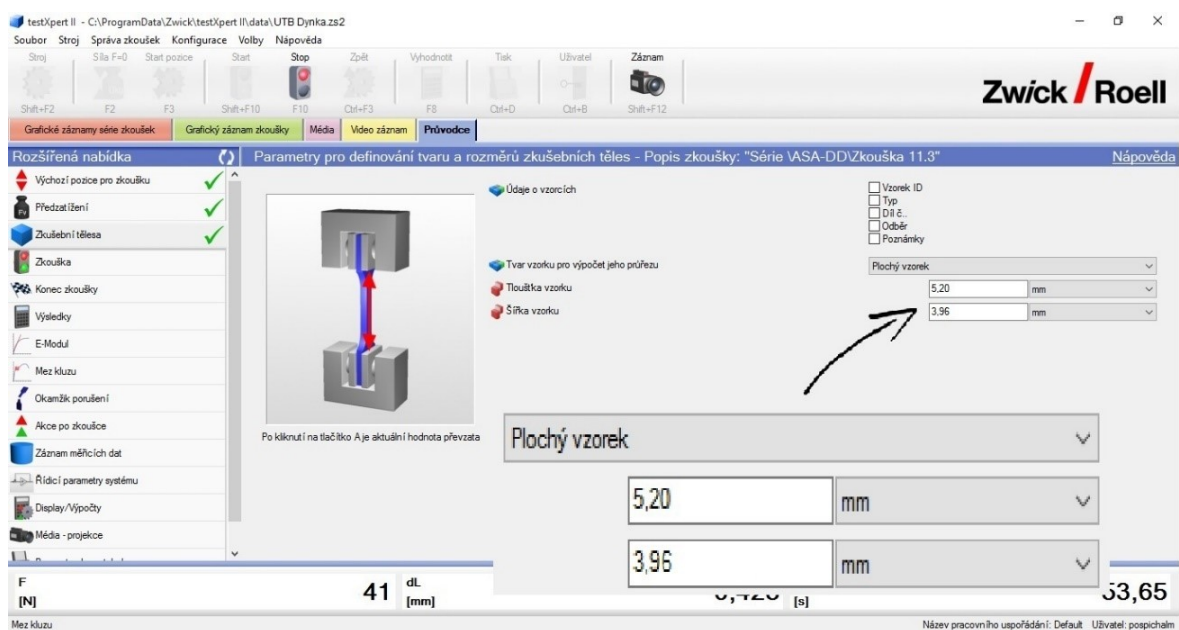
Obr. 27 – Zkušební trhací stroj Zwick Z100

(vlastní zpracování)

Před provedením tahové zkoušky je v první řadě nutné v programu testExpert nastavit vstupní parametry zkoušky. Mezi nastavované parametry patří například rychlost zatěžování, počáteční rozměry zkušebního vzorku nebo vzdálenost upínacích čelistí. TestExpert v průběhu zkoušky automaticky vyhodnocuje jednotlivé normalizované parametry, ze kterých se následně stanoví mechanické vlastnosti testovaného materiálu.

10.1 Vstupní parametry tahové zkoušky

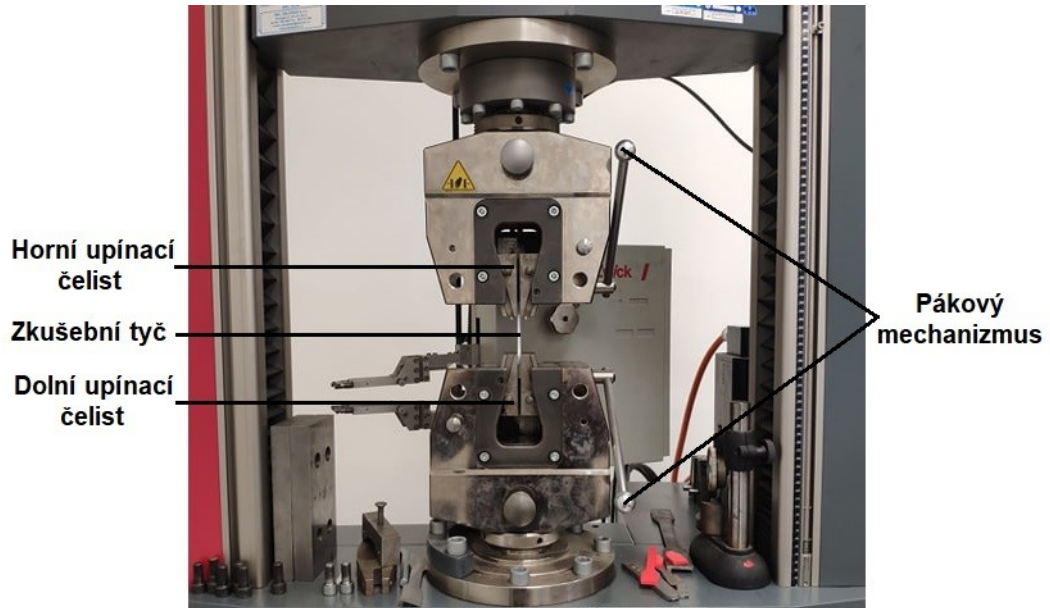
K dosažení správných výsledků testování tahové zkoušky je důležité nastavit program testXpert dle odpovídajících norem. Autor práce provedl veškeré nastavení zkušebního zařízení Zwick Z100 tak, aby odpovídalo normě ČSN EN ISO 527. Před zahájením jednotlivých tahových zkoušek bylo vždy provedeno kontrolní měření skutečným hodnot tloušťky a šířky zúžené části zkušební vzorku. Skutečné hodnoty byly následně přepsány do programu testExpert (viz obr. 28), v opačném případě by získané výsledky provedených zkoušek nebyly korektní.



Obr. 28 – Nastavení průřezu zkušební tyče (Dynka, 2020, s. 51)

10.2 Průběh zkoušky tahem

Jakmile jsou v programu testExpert nastaveny všechny vstupní parametry, je možné začít provádět zkoušku. Před upnutím zkušební vzorku do trhačického zařízení je vhodné zkontrolovat, zda je vzorek označen kódem (viz tab. 5) tak, aby bylo po ukončení zkoušky rozpoznatelné, které dvě části zkušebních vzorků patří k sobě. Vzorek je následně upnut pomocí pákového mechanismu (viz obr. 29) do čelistí trhačického zařízení. Při upínání bylo zajištěno, že podélná osa zkušebního zařízení je totožná s osou zkušební tyče.

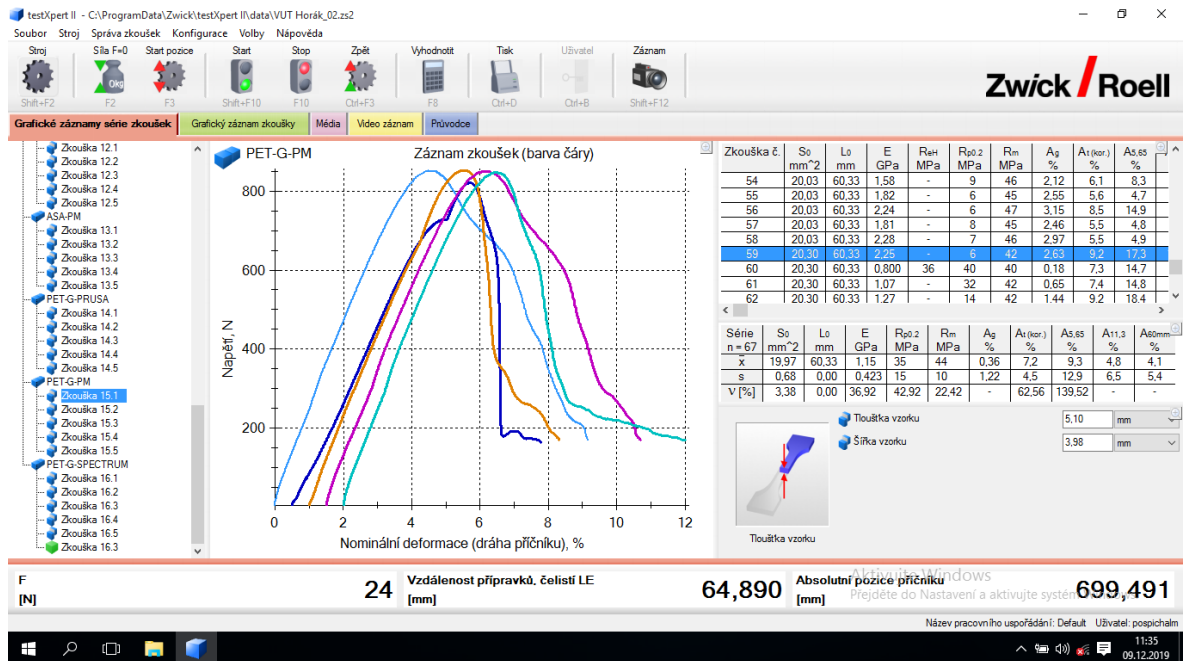


Obr. 29 – Upínací mechanismus (Dynka, 2020, s. 52)

Pokud je zkušební vzorek upnut správně, může být pomocí programu testXpert spuštěna tahová zkouška. Programem je v průběhu zkoušky zobrazována působící síla v N , vzdálenost čelistí v mm a grafická závislost prodloužení/deformace v $\%$.

Zkouška je v okamžiku přetržení zkušebního tělesa ukončena. Programem testExpert jsou vyhodnocena naměřená data a zobrazeny výsledky tahové zkoušky (viz obr. 30).

Proces zkoušení se opakuje, a to až do otestování všech zkušebních vzorků. Po dokončení testování lze výsledky z programu testExpert exportovat do programu Excel.

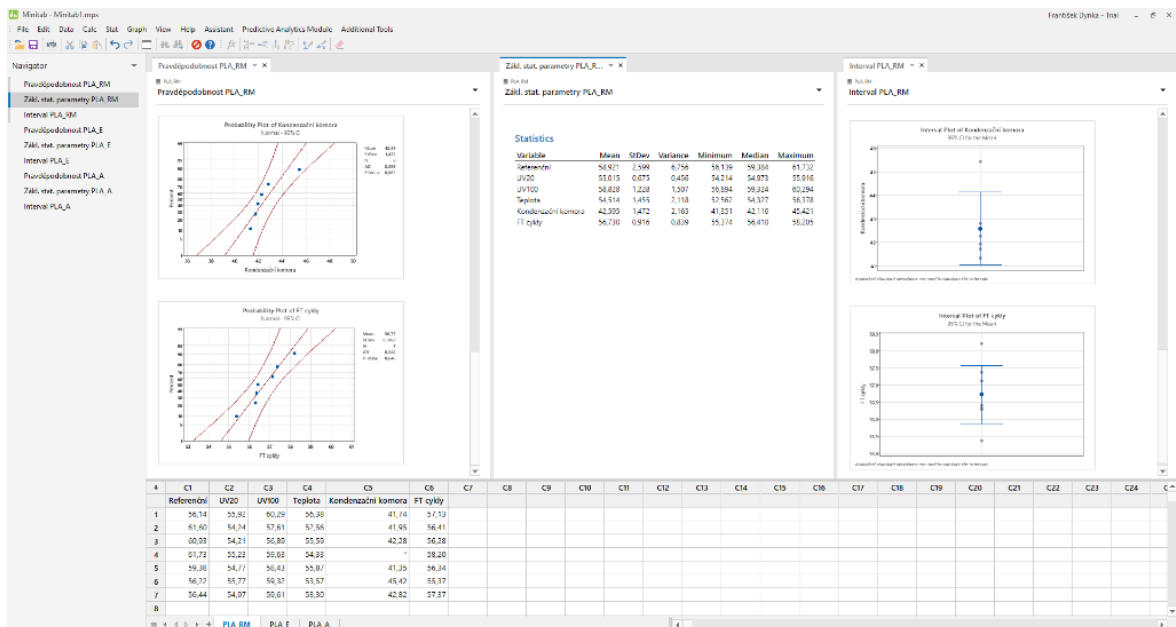


Obr. 30 – Program testExpert (vlastní zpracování)

11 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V této části diplomové práce jsou zpracována a vyhodnocena data, která byla získána z provedených tahových zkoušek. K vyhodnocení experimentálně získaných dat byly zvoleny základní normalizované parametry (viz kap. 5.3), a to modul pružnosti v tahu (viz kap. 5.3.2), mez pevnosti v tahu (viz kap. 5.3.3) a tažnost (viz kap. 5.3.5).

K vyhodnocení naměřených dat byl použit program Minitab (viz obr. 31), který umí zpracovat základní statistické parametry, analýzu rozptylu (ANOVA) a Anderson Darlingův test normality. U tohoto typu vyhodnocení obecně platí, jestliže je P-hodnota větší než 0,05 mají data se spolehlivostí větší než 95 % normální rozdělení.



Obr. 31 – Prostředí Minitab (vlastní zpracování)

K vyhodnocení vlivu degradačních faktorů byly získané základní normalizované parametry porovnány vždy s kontrolními hodnotami pomocí statisticky zpracovaných středních hodnot, analýzy rozptylu a Dunnettova vícenásobného srovnávacího testu, který slouží k porovnání experimentálních skupin s kontrolní skupinou (v případě této diplomové práce byly porovnávány sady vzorků vystavené degradačním vlivům s kontrolní sadou).

V závěru této části diplomové práce bylo provedeno stanovení východisek pro využití aplikovaných aditivních materiálů z hlediska vlivu degradačních faktorů na jejich mechanické vlastnosti.

11.1 Statistické zpracování působení degradačních faktorů na mechanické vlastnosti materiálu PLA

Až na kontrolní sadu byly zkušební vzorky materiálu PLA od výrobce Filament-PM vystaveny vybraným degradačním vlivům a následně testovány zkouškou tahem. Z naměřených dat bylo provedeno statistické zpracování působení degradačních vlivů na mechanické vlastnosti aditivního materiálu PLA.

11.1.1 Statistické zpracování působení degradačních faktorů na mez pevnosti v tahu materiálu PLA

V tabulce 7 lze vidět zpracované základní statistické parametry meze pevnosti v tahu u materiálu PLA od výrobce Filament-PM. Parametry byly určeny z výsledků tahových zkoušek jednotlivých sad vzorků, zpracování dat proběhlo ve statistickém programu Minitab. Grafické znázornění intervalů spolehlivosti a pravděpodobnostní grafy Anderson Darlingova testu normálního rozdělení s pravděpodobností 95 % obsahuje příloha V.

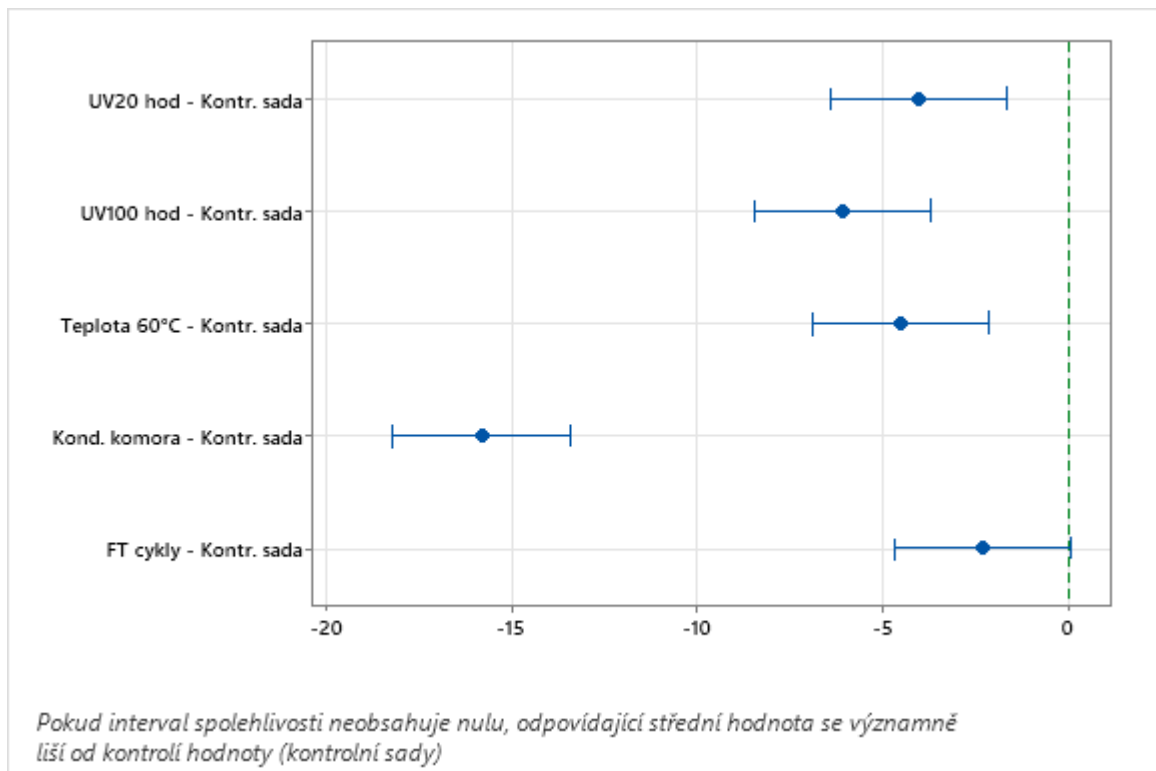
Tab. 7 – Základní statistické parametry meze pevnosti v tahu materiálu PLA (vlastní zpracování)

PLA – Mez pevnosti v tahu [MPa]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	59,06	2,8	7,833	56,14	62,73	0,19	[56,4747; 61,6516]
UV 20 hod	55,015	0,675	0,456	54,214	55,916	0,631	[54,3906; 55,6397]
UV 100 hod	52,931	1,228	1,273	51,11	54,26	0,464	[51,8878; 53,9751]
Výdrž na teplotě 60°C	54,514	1,455	2,118	52,562	56,378	0,559	[53,1684; 55,86]
Kondenzační komora	43,225	2,142	4,59	41,351	47,01	0,064	[41,2441; 45,2068]
FT cykly	56,73	0,916	0,839	55,374	58,205	0,648	[55,8824; 57,5768]

Provedení testu ANOVA

Na základě provedené analýzy rozptylu v programu Minitab bylo zjištěno, že P-hodnota je menší než 0,05. To znamená, že minimálně jeden z testovaných degradačních faktorů byl významně ovlivněn.

Pro podrobnější zkoumání byl proveden Dunnettův test, kterým byly porovnány testované degradační vlivy vůči kontrolní skupině (kontrolní sada). Z grafického znázornění (viz graf 1) lze vidět, že jediný testovaný faktor, u kterého nebyla významně ovlivněna mez pevnosti, je degradace FT cykly. U ostatních faktorů je degradace významná. Nejvíce ovlivněna byla mez pevnosti vlivem vlhkého prostředí kondenzační komory.



Graf 1 – Dunnettův test meze pevnosti materiálu PLA (vlastní zpracování)

11.1.2 Statistické zpracování působení degradačních faktorů na modul pružnosti v tahu materiálu PLA

Základní statistické parametry modulu pružnosti v tahu u materiálu PLA od výrobce Filament-PM, které byly určeny z výsledků provedených tahových zkoušek, lze vidět v tabulce 8. Grafické znázornění intervalů spolehlivosti a pravděpodobnostní grafy Anderson Darlingova testu normálního rozdělení (95 % CI) obsahuje příloha V.

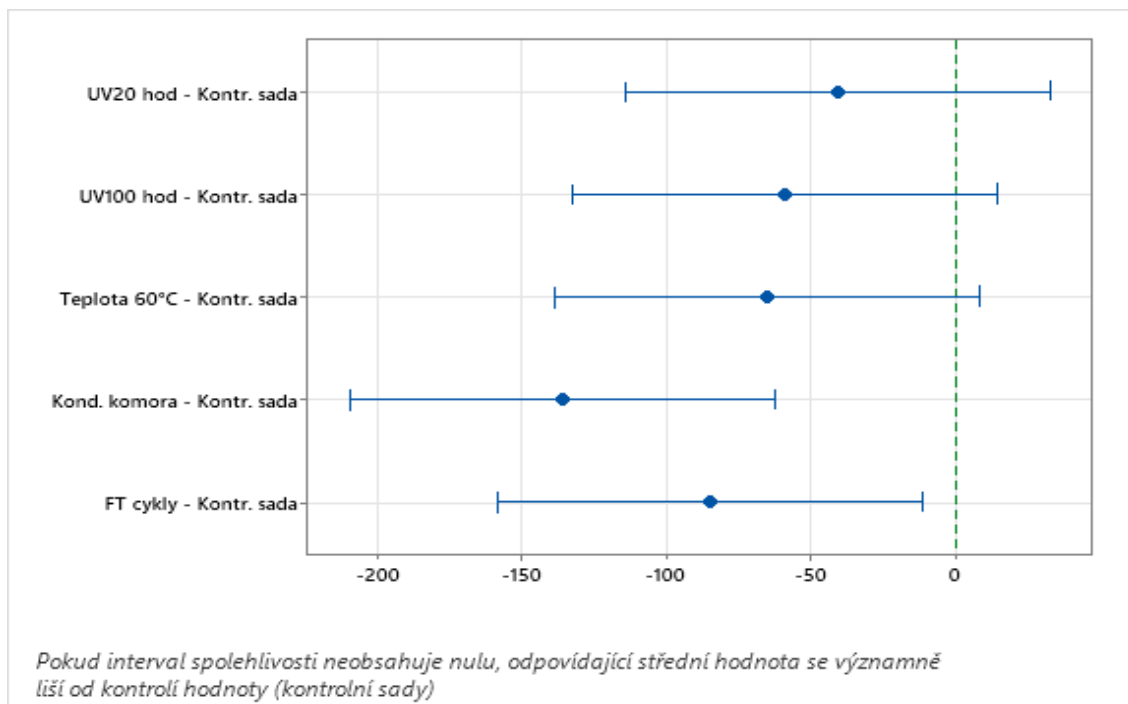
Tab. 8 – Základní statistické parametry modulu pružnosti v tahu materiálu PLA (vlastní zpracování)

PLA – Modul pružnosti v tahu [MPa]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	742,7	46,9	2198,9	660,6	801,5	0,771	[699,326; 786,063]
UV 20 hod	701,85	24,11	581,39	657,61	733,48	0,656	[679,555; 724,155]
UV 100 hod	683,2	45,5	2067	621,7	752,7	0,631	[641,122; 725,216]
Výdrž na teplotě 60°C	677,1	54,7	2991,9	594,8	772,4	0,26	[626,527; 727,702]
Kondenzační komora	606,3	86,3	7446,2	481,8	736,8	0,943	[526,498; 686,111]
FT cykly	657,5	32,9	1085	614,1	717,9	0,275	[627,074; 688,003]

Provedení testu ANOVA

V programu Minitab bylo provedenou analýzou rozptylu (ANOVA) zjištěno, že v případě modulu pružnosti byla P-hodnota rovněž menší než 0,05. Z tohoto důvodu bylo provedeno podrobnější zkoumání pomocí Dunnettova vícenásobného srovnávacího testu.

Na základě tohoto testu byly porovnány vlivy testovaných degradačních faktorů, a to vůči kontrolní skupině / sadě. Z grafického znázornění (viz graf 2) lze vidět, že na modul pružnosti v tahu materiálu PLA mělo vliv umístění zkušebních vzorků do kondenzační komory a testování teplotními FT cykly. U ostatních zkoumaných degradačních faktorů nebyl významný vliv prokázán.



Graf 2 – Dunnnettův test modulu pružnosti materiálu PLA (vlastní zpracování)

11.1.3 Tažnost

V tabulce 9 lze vidět zpracované základní statistické parametry meze pevnosti v tahu materiálu PLA od výrobce Filament-PM. Ostatní statistické informace obsahuje příloha V.

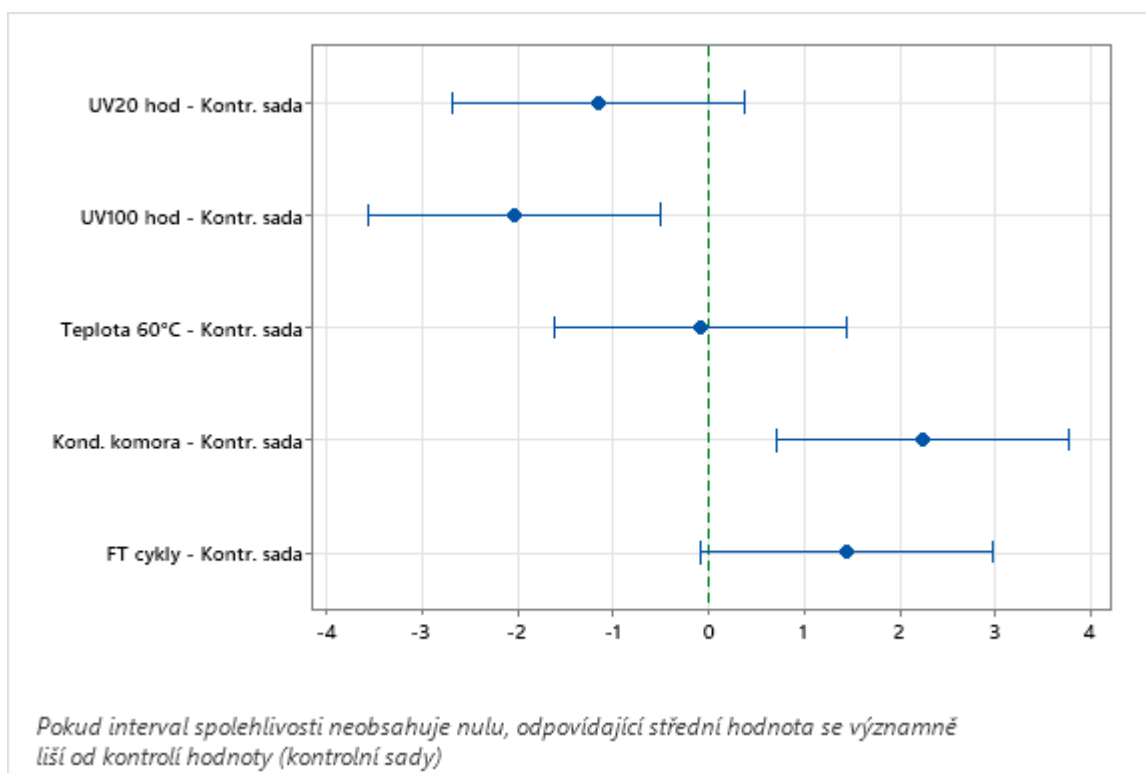
Tab. 9 – Zákl. statistické parametry tažnosti materiálu PLA (vlastní zpracování)

PLA – Tažnost [%]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	9,746	0,72	0,518	8,8	10,99	0,684	[9,07998; 10,4115]
UV 20 hod	8,5914	0,1813	0,0329	8,39	8,82	0,325	[8,42373; 8,75913]
UV 100 hod	7,704	0,668	0,446	6,83	8,57	0,602	[7,08646; 8,32211]
Výdrž na teplotě 60°C	9,66	0,84	0,706	8,5	10,82	0,872	[8,88307; 10,4369]
Kondenzační komora	11,984	2,06	4,245	9,63	15,85	0,11	[10,0787; 13,8898]
FT cykly	11,173	1,076	1,158	9,69	12,93	0,837	[10,1778; 12,1679]

Provedení testu ANOVA

Testováním ANOVY byla u tažnosti materiálu PLA od výrobce Filament-PM zjištěna P-hodnota menší než 0,05. To znamená, že minimálně jeden z testovaných degradačních faktorů byl významně ovlivněn.

Na základě Dunnettova testu lze z grafického znázornění (viz graf 3) pozorovat, že na tažnost aditivního materiálu PLA mělo významný vliv umístění zkušebních tyčí do kondenzační komory. Dále se projevil vliv UV záření, a to v případě, kdy byly vzorky vystaveny UV záření na 100 hodin. U ostatních zkoumaných degradačních faktorů nebyl významný vliv prokázán.



Graf 3 – Dunnettův test tažnosti materiálu PLA (vlastní zpracování)

11.2 Statistické zpracování působení degradačních faktorů na mechanické vlastnosti ostatních testovaných aditivních materiálů

Statistické zpracování působení degradačních vlivů na mechanické vlastnosti aditivních materiálů ABS, ASA a PET-G (viz přílohy V až VII) bylo realizováno stejným způsobem jako u materiálu PLA.

11.3 Vyhodnocení působení degradačních vlivů na mechanické vlastnosti testovaných aditivních materiálů

Tato kapitola se zabývá vyhodnocením dosažených výsledků z testování vlivu degradačních faktorů na aplikované aditivní materiály PLA, ABS, ASA a PET-G od společnosti Filament-PM

Na základě provedeného statistického zpracování bylo zjištěno, že naměřená data z tahových zkoušek odpovídají normálnímu rozdělení s pravděpodobností 95 %. Veškeré intervaly spolehlivosti testovaných aditivních materiálů obsahují přílohy V až VIII. Ke vzájemnému porovnání testovaných aditivních materiálů byly použity střední hodnoty.

11.3.1 Vliv degradačních faktorů na mez pevnosti v tahu [MPa] testovaných aditivních materiálů

Pro posouzení vlivu degradačních faktorů na mez pevnosti v tahu aplikovaných aditivních materiálů (viz tab. 10), bylo využito porovnání středních hodnot a vícenásobného srovnávacího Dunnettova testu, na jehož základě jsou barevně označeny významně působící degradační vlivy. V tabulce 10 jsou porovnávány degradační faktory vůči kontrolní sadě.

Aditivní materiál PLA

U materiálu PLA lze na základě provedeného srovnání vidět, že mez pevnosti v tahu až na FT cykly negativně ovlivnily všechny testované degradační faktory.

Aditivní materiál ABS

U materiálu ABS došlo při testování výdrže na teplotě 60 °C k významnému navýšení meze pevnosti v tahu, to samé platilo i v případě testování v kondenzační komoře. Ostatní degradační faktory nebyly významně ovlivněny.

Aditivní materiál ASA

U materiálu ASA došlo při testování v kondenzační komoře a výdrži na teplotě 60 °C k mírnému, ale na základě Dunnettova testu významnému poklesu meze pevnosti v tahu. U ostatních degradačních faktorů nebyl významný vliv prokázán.

Aditivní materiál PET-G

U materiálu PET-G lze pozorovat, že vlivem degradačních faktorů došlo k navýšení meze pevnosti v tahu.

Tab. 10 – Vliv degradačních faktorů na mez pevnosti v tahu [MPa]
(vlastní zpracování)

Mez pevnosti v tahu [MPa]					
Sada vzorků	Jednotka	PLA	ABS	ASA	PET-G
Kontrolní sada	MPa	59,06	37,171	46,189	49,88
UV 20 hod	MPa	55,015	37,13	46,526	51,857
	Změna v %	- 6,85 %	- 0,11 %	0,73 %	3,96 %
UV 100 hod	MPa	52,931	36,584	46,239	54,259
	Změna v %	- 10,38 %	- 1,58 %	0,11 %	8,78 %
Výdrž na teplotě 60 °C	MPa	54,514	45,116	44,336	56,196
	Změna v %	- 7,7 %	21,37 %	- 4,01 %	12,66 %
Kondenzační komora	MPa	43,225	44,949	44,291	52,49
	Změna v %	- 27,81 %	20,92 %	- 4,11 %	5,23 %
FT cykly	MPa	56,73	36,036	46,411	51,649
	Změna v %	- 3,95 %	- 3,05 %	0,48 %	3,55 %

11.3.2 Vliv degradačních faktorů na modul pružnosti v tahu [MPa] testovaných aditivních materiálů

Pro posouzení vlivu degradačních faktorů na modul pružnosti v tahu aplikovaných aditivních materiálů (viz tab. 11) bylo využito porovnání středních hodnot a vícenásobného srovnávacího Dunnettova testu, na jehož základě jsou barevně označeny významně působící degradační vlivy. Degradační faktory jsou porovnány vůči kontrolní sadě.

Aditivní materiál PLA

U materiálu PLA lze na základě provedeného srovnání vidět, že v případě vystavení vzorků vlhkému prostředí kondenzační komory a teplotním FT cyklům, byl modul pružnosti v tahu negativně ovlivněn. Ostatní degradační faktory nebyly významně ovlivněny.

Aditivní materiál ABS

U materiálu ABS došlo při testování výdrže na teplotě 60 °C k významnému navýšení modulu pružnosti v tahu, to samé platilo i v případě testování v kondenzační komoře. U ostatních degradačních faktorů nebyl prokázán významný vliv.

Aditivní materiál ASA

U materiálu ASA došlo při testování vlivu UV záření po 100 hodinách a výdrži na teplotě 60 °C k významnému navýšení modulu pružnosti. Ostatní degradační faktory nebyly významně ovlivněny.

Aditivní materiál PET-G

U materiálu PET-G lze pozorovat, že vlivem degradačních faktorů UV záření 100 hodin, výdrže na teplotě 60 °C a kondenzační komoře došlo k významnému navýšení modulu pružnosti v tahu.

Tab. 11 – Vliv degradačních faktorů na modul pružnosti v tahu [MPa]
(vlastní zpracování)

Modul pružnosti v tahu [MPa]					
Sada vzorků	Jednotka	PLA	ABS	ASA	PET-G
Kontrolní sada	MPa	742,7	481,65	542,32	492,74
UV 20 hod	MPa	701,85	511,63	562,29	504,82
	Změna v %	- 5,5 %	6,22 %	3,68 %	2,45 %
UV 100 hod	MPa	683,2	527,1	605,9	522,28
	Změna v %	- 8,01 %	9,44 %	11,72 %	5,99 %
Výdrž na teplotě 60 °C	MPa	677,1	667,1	616,93	561,34
	Změna v %	- 8,83 %	38,5 %	13,76 %	13,92 %
Kondenzační komora	MPa	606,3	635,4	557,9	550,26
	Změna v %	- 18,37 %	31,92 %	2,87 %	11,67 %
FT cykly	MPa	657,5	438,22	510,4	493,78
	Změna v %	- 11,47 %	- 9,02 %	- 5,89 %	0,21 %

11.3.3 Vliv degradačních faktorů na tažnost [%] testovaných aditivních materiálů

Pro posouzení vlivu degradačních faktorů na tažnost u aplikovaných aditivních materiálů (viz tab. 12) bylo využito porovnání středních hodnot a vícenásobného srovnávacího Dunnettova testu, na jehož základě jsou významně působící degradační vlivy barevně označeny. V tabulce 12 jsou porovnávány degradační faktory vůči kontrolní sadě.

Aditivní materiál PLA

U materiálu PLA lze na základě provedeného srovnání vidět, že v případě vystavení vzorků UV záření na 100 hodin byla negativně ovlivněna tažnost materiálu. Dále bylo v případě vystavení vzorků vlhkému prostředí kondenzační komory prokázáno významné zvýšení tažnosti. Ostatní degradační faktory nebyly významně ovlivněny.

Aditivní materiál ABS

U materiálu ABS lze na základě provedeného srovnání vidět, že tažnost byla až na FT cykly významně ovlivněna všemi testovanými degradačními faktory.

Aditivní materiál ASA

U materiálu ASA došlo při testování k významnému zvýšení tažnosti, a to vlivem teplotních FT cyklů. U ostatních degradačních faktorů nebyl významný vliv prokázán.

Aditivní materiál PET-G

U materiálu PET-G lze pozorovat, že došlo k významnému snížení tažnosti u všech testovaných degradačních faktorů.

Tab. 12 – Vliv degradačních faktorů na tažnost [%] (vlastní zpracování)

Tažnost [%]					
Sada vzorků	Jednotka	PLA	ABS	ASA	PET-G
Kontrolní sada	%	9,746	36,4	15,547	136,7
UV 20 hod	%	8,5914	17,596	13,071	76,8
	Změna v %	- 11,85 %	- 51,66 %	- 15,93 %	- 43,82 %
UV 100 hod	%	7,704	14,657	13,783	25,26
	Změna v %	- 20,95 %	- 59,73 %	- 11,35 %	- 81,52 %
Výdrž na teplotě 60 °C	%	9,66	25,17	18,23	21,74
	Změna v %	- 0,88 %	- 30,85 %	17,26 %	- 84,1 %
Kondenzační komora	%	11,984	14,45	14,35	26,11
	Změna v %	22,96 %	- 60,3 %	- 7,7 %	- 80,9 %
FT cykly	%	11,173	26,16	20,92	92,85
	Změna v %	14,64 %	- 28,13 %	34,56 %	- 32,08 %

11.3.4 Východiska využití a celkové zhodnocení vlivu degradačních faktorů na mechanické vlastnosti testovaných aditivních materiálů

V této kapitole je provedeno vzájemné porovnání degradačních vlivů na testované aditivní materiály. Posouzení vlivu degradačních faktorů na mechanické vlastnosti testovaných materiálů (viz tab. 13 a tab. 14) bylo provedeno pomocí středních hodnot získaných ze statistického zpracování a vícenásobného Dunnettova testu, na jehož základě jsou barevně označeny degradační vlivy, které jsou ze statistického hlediska významné. Degradační vlivy byly porovnány s kontrolní skupinou. Dále jsou zde stanoveny doporučení a východiska pro využití testovaných aditivních materiálů.

Aditivní materiál PLA

U aditivního materiálu PLA došlo k významnému snížení meze pevnosti v tahu, a to u všech testovaných degradačních vlivů, kromě teplotních FT cyklů. U ostatních testovaných aditivních materiálů neměly degradační faktory na mez pevnosti prokazatelný vliv. Z dlouhodobého hlediska tento materiál tedy není vhodné vystavovat UV záření, teplotě ani vlhkosti, jelikož materiál může degradovat a ztrácet požadovanou pevnost.

Při vystavení materiálu PLA degradačním vlivům kondenzační komory je patrné, že došlo k významnému snížení modulu pružnosti v tahu a naopak navýšení tažnosti. Tento jev naznačuje, že materiál je nasákavý, z toho důvodu není vhodný pro využití v prostředí se zvýšenou vlhkostí. Materiál PLA by se měl skladovat v suchém prostředí.

Z hlediska mechanických vlastností autor nedoporučuje používat aditivní materiál PLA na výrobu funkčních součástí. Materiál je vhodný na výrobu prototypových součástí, které nebudou dlouhodobě vystaveny vysokým teplotám, UV záření nebo vlhkosti.

Aditivní materiál ABS

V rámci testování meze pevnosti v tahu u materiálu ABS prokazatelně nedošlo k žádným významným degradačním vlivům.

U modulu pružnosti ovšem došlo při vystavení vlivům kondenzační komory, teplotě 60 °C či UV záření k výraznému zvýšení modulu pružnosti v tahu a naopak snížení tažnosti. Tento jev může zapříčinit, že materiál bude při dlouhodobém působení uvedených degradačních faktorů ztrácet schopnost pružné deformace a houževnatosti.

S ohledem na mechanické vlastnosti aditivního materiálu ABS autor nedoporučuje používat tento materiál na výrobu funkčních součástí, které budou dlouhodobě vystaveny UV záření,

vysoké teplotě či vlhkému prostředí. Aditivní materiál ABS lze použít na výrobu funkčních součástí, které nebudou uvedeným vlivům vystaveny.

Aditivní materiál ASA

Testováním meze pevnosti v tahu u materiálu ASA nedošlo dle Dunnettova testu k žádným významným degradačním vlivům.

Testováním modulu pružnosti v tahu u materiálu ASA došlo dle Dunnettova testu k významnému navýšení v rámci vystavení degradačním vlivům UV záření a teplotě 60 °C, ovšem nedošlo k významným degradacím v rámci tažnosti, z tohoto důvodu lze brát informace o navýšení modulu pružnosti v tahu jako pozitivní.

V případě tažnosti došlo také k významnému navýšení při vystavení zkušebních vzorků teplotním FT cyklům, což může signalizovat, že vlivem dlouhodobých změn teplot se může u materiálu zvyšovat houževnatost.

Z hlediska mechanických vlastností je tento materiál vhodný pro využití výroby funkčních dílů, které budou krátkodobě či dlouhodobě vystaveny UV záření, vlhkosti či teplotě do 60 °C.

Aditivní materiál PET-G

V rámci testování meze pevnosti v tahu u materiálu PET-G nedošlo prokazatelně k žádným významným degradačním vlivům.

Při vystavení materiálu PET-G degradačním vlivům UV záření, kondenzační komory a výdrži na teplotě 60 °C je patrné, že došlo k významnému zvýšení modulu pružnosti v tahu a naopak u všech testovaných degradačních faktorů došlo k razantnímu snížení tažnosti. To může zapříčinit, že materiál PET-G bude při dlouhodobém působení uvedených degradačních faktorů ztrácet schopnost pružné deformace a houževnatosti.

S ohledem na mechanické vlastnosti aditivního materiálu PET-G autor nedoporučuje používat tento materiál na výrobu funkčních součástí, které budou dlouhodobě vystaveny UV záření, vysoké teplotě či vlhkému prostředí. Aditivní materiál PET-G lze použít na výrobu prototypů a také na výrobu funkčních součástí, které nebudou vystaveny vlivu UV záření, vysoké teplotě nebo vlhkosti.

Tab. 13 – Celkové zhodnocení vlivu degračních faktorů na mechanické vlastnosti aplikovaných aditivních materiálů – část 1. (vlastní zpracování)

		Kontr. sada	UV20 hod		UV100 hod		Výdrž na teplotě 60 °C	
Mez pevnosti v tahu	Materiál	MPa	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %
		PLA	59,06	55,015	- 6,85 %	52,931	- 10,38 %	54,514
	ABS	37,171	37,13	- 0,11 %	36,584	- 1,58 %	45,116	21,37 %
	ASA	46,189	46,526	0,73 %	46,239	0,11 %	44,336	- 4,01 %
	PET-G	49,88	51,857	3,96 %	54,259	8,78 %	56,196	12,66 %
Modul pružnosti v tahu	Materiál	MPa	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %
		PLA	742,7	701,85	- 5,5 %	683,2	- 8,01 %	677,1
	ABS	481,65	511,63	6,22 %	527,1	9,44 %	667,1	38,5 %
	ASA	542,32	562,29	3,68 %	605,9	11,72 %	616,93	13,76 %
	PET-G	492,74	504,82	2,45 %	522,28	5,99 %	561,34	13,92 %
Tažnost	Materiál	%	%	Změna v %	%	Změna v %	%	Změna v %
		PLA	9,746	8,5914	- 11,85 %	7,704	- 20,95 %	9,66
	ABS	36,4	17,596	- 51,66 %	14,657	- 59,73 %	25,17	- 30,85 %
	ASA	15,547	13,071	- 15,93 %	13,783	- 11,35 %	18,23	17,26 %
	PET-G	136,7	76,8	- 43,82 %	25,26	- 81,52 %	21,74	- 84,1 %

Tab. 14 - Celkové zhodnocení vlivu degračních faktorů na mechanické vlastnosti aplikovaných aditivních materiálů – část 2. (vlastní zpracování)

		Kontr. sada	Kondenzační komora		Teplotní FT cykly	
Mez pevnosti v tahu	Materiál	MPa	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %
		PLA	59,06	43,225	- 27,81 %	56,73
	ABS	37,171	44,949	20,92 %	36,036	- 3,05 %
	ASA	46,189	44,291	- 4,11 %	46,411	0,48 %
	PET-G	49,88	52,49	5,23 %	51,649	3,55 %
Modul pružnosti v tahu	Materiál	MPa	MPa	Změna v %	MPa	Změna v %
		PLA	742,7	606,3	- 18,37 %	657,5
	ABS	481,65	635,4	31,92 %	438,22	- 9,02 %
	ASA	542,32	557,9	2,87 %	510,4	- 5,89 %
	PET-G	492,74	550,26	11,67 %	493,78	0,21 %
Tažnost	Materiál	%	%	Změna v %	%	Změna v %
		PLA	9,746	11,984	22,96 %	11,173
	ABS	36,4	14,45	- 60,3 %	26,16	- 28,13 %
	ASA	15,547	14,35	- 7,7 %	20,92	34,56 %
	PET-G	136,7	26,11	- 80,9 %	92,85	- 32,08 %

12 SPOLEČNOST FERPET COMMUNITY S.R.O.

V této kapitole autor charakterizuje základní informace, historii a organizační strukturu společnosti FERPET community s.r.o.

12.1 Základní údaje o společnosti FERPET community s.r.o.

Název společnosti: FERPET community s.r.o.

Sídlo: Na Výsluní 862, 766 01 Valašské Klobouky.

Spisová značka: C 115646 vedená u Krajského soudu v Brně.

Předmět podnikání: Provádění staveb, jejich změn a odstraňování; zámečnictví nástrojářství; výroba, obchod a služby neuvedené v přílohách 1 až 3 živnostenského zákona.

Počet zaměstnanců v roce 2022: 5

Aktiva v roce 2021: 5 640 tis. Kč

Obrat za rok 2021: 15 312 tis. Kč (Interní dokumenty a zdroje společnosti; FERPET community s.r.o. 2022)



Obr. 32 – Logo společnosti
(FERPET community s.r.o. 2022)

12.2 Management kvality

Společnost FERPET community s.r.o. se neustále přizpůsobuje rostoucím požadavkům zákazníků a pro jejich uspokojení zdokonaluje veškeré služby a procesy napříč podnikem. Ke zlepšování procesů společnost implementuje moderní způsoby řízení výroby, jako jsou projektové řízení nebo Kaizen.

12.3 Historie společnosti FERPET community s.r.o.

Společnost FERPET community s.r.o. byla založena 2. ledna 2020 dvěma společníky, na základě nabytých zkušeností z předchozího živnostenského podnikání a dlouhodobě trvajících obchodních vztahů se společností EBM Construct, s.r.o. V rámci této spolupráce následně proběhla mezi lety 2020 a 2021 výstavba několika stavebních projektů, jako například Centrum bydlení pro seniory v Pardubicích, bytový dům Panna a Baba nebo Rodinné domy Kolovraty. (Interní dokumenty a zdroje společnosti; FERPET community s.r.o. 2022)

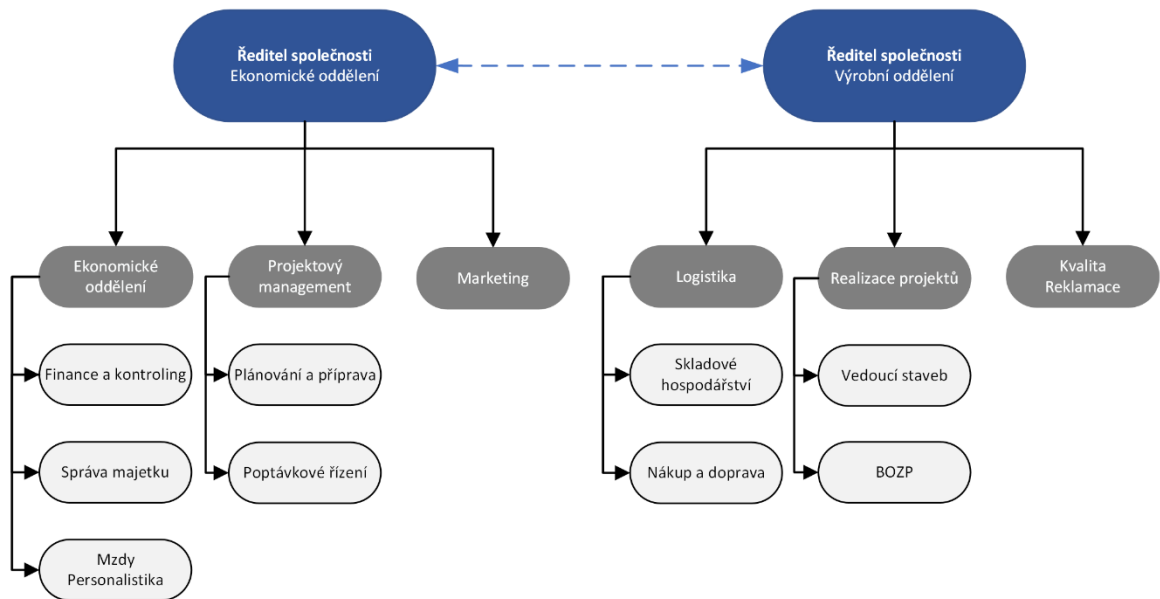
Dále se společnost FERPET community s.r.o. specializuje na výstavbu rodinných domů jako generální dodavatel pro koncové zákazníky nebo také na různé stavební práce dle požadavků zákazníků. Mezi lety 2020 a 2021 byl úspěšně dokončen např. projekt RD Kyje v Praze 10 (viz obr. 33). (Interní dokumenty a zdroje společnosti; FERPET community s.r.o. 2022)



Obr. 33 – Projekt RD Kyje (vlastní zpracování)

12.4 Organizační struktura společnosti

Společnost FERPET community s.r.o. je tvořena základními organizačními jednotkami, jimiž jsou zejména ekonomické oddělení, projektový management, marketing, logistika, realizace projektů, kvalita a reklamace. Tyto organizační jednotky jsou rozděleny mezi dvě oddělení, kdy každé oddělení má na starost jeden z jednatelů společnosti.



Obr. 34 – Organizační struktura společnosti FERPET community s.r.o.
(Interní dokumenty a zdroje společnosti)

13 PROJEKT ZAVEDENÍ 3D TISKU VE SPOLEČNOSTI FERPET COMMUNITY S.R.O.

Tato část diplomové práce se zabývá projektovým řešením využití 3D tisku pro výrobu atypických součástí ve společnosti FERPET community s.r.o.

13.1 Důvody pro pořízení 3D tiskárny ve společnosti FERPET community s.r.o.

Společnost FERPET community s.r.o. mezi lety 2020 a 2021 narážela při realizaci stavebních projektů na problémy při zajištění některých atypických součástí, které byly potřebné k dokončení projektu. V případě zakázkové výroby atypických součástí nebo nástrojů se v tomto období pohybovaly termíny dodání od 3 do 12 týdnů. Tato skutečnost měla značný vliv na dílčí i konečné termíny projektů, které se realizovaly.

K zajištění potřebných atypických součástí byla v rámci průzkumu trhu nalezena možnost výroby pomocí některé z aditivních technologií. Dle dostupných znalostí, informací a doporučení, byla pro tento projekt vybrána aditivní technologie Fused Filament Fabrication od společnosti Prusa Research a.s.

Cílem tohoto projektu je najít řešení, které umožní společnosti efektivně vyrábět funkční nástroje a součásti, jenž budou snižovat rizika a náklady vznikající v průběhu výstavby stavebních projektů.

13.2 Analýza možností uplatnění 3D tisku na stavebních projektech

Před samotným plánováním tohoto projektu byly provedeny analýzy možností využití 3D tisku na několika stavebních projektech.

13.2.1 Stavební projekt RD Kyje

V průběhu výstavby projektu RD Kyje došlo k požadavku investora na realizaci hranatých svodů. Pro tyto svody nejsou standardně vyráběny lapače střešních splavenin s hranatým vstupem. Existují pouze lapače střešních splavenin s redukcemi pro kulaté svodové potrubí (viz obr. 35). Pro dodržení konečného termínu projektu, bylo nutné vymyslet adekvátní a rychlé řešení výroby. Možnost 3D tisku metodou FFF se jeví jako rychlá alternativa výroby.



Obr. 35 – Lapač střešních splavenin
(HORNBAACH - projektový hobbymarket. 2022)

13.2.2 Stavební projekt RD Velké Popovice

Při realizaci projektu RD Velké Popovice bylo v rámci výstavby monolitického stropu nutno vybednit či vyvrtat několik stavebních prostupů pro zdravotechniku, vzduchotechniku a komín. V případě kdy jsou prostupy dostatečně velké a je možné je tzv. „vybednit“ pomocí dřevěných prken (viz obr. 36), není potřeba prostupy jádrově vrtat.



Obr. 36 – Bednění stavebních prostupů (vlastní zpracování)

Prostupy, které jsou menší velikosti a nelze je vybednit dřevěnými deskami, se dodatečně jádrově vrtají (viz obr. 37).



Obr. 37 – Jádrové vrtání

(Půjčovna stavebních strojů MITOP HB. 2022)

Například stavební prostup pro kanalizaci (viz obr. 38) byl dodatečně jádrově vrtán. Vrtání tohoto prostupu stálo v roce 2021 dle ceníku stavebních prací RTS (Dashöfer Holding, Ltd., Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. @ 2022.) 3 560 Kč bez DPH. Z tohoto důvodu může být levnější alternativou výroba dočasné pažnice prostupu aditivní technologií FFF.



Obr. 38 – Prostup kanalizace (vlastní zpracování)

13.3 Metoda SMART (definování cíle projektu)

S – Specifický

Účelem projektu je kalkulace nákladů na realizaci a zavedení komplexního řešení pro výrobu atypických součástí, které je možné vyrobit pomocí 3D tisku FFF.

M – Měřitelný

Mezi hlavní kritéria k realizaci projektu patří zajištění vhodné místnosti v budově společnosti, pořízení 3D tiskárny a zajištění zaškolení pracovníka pro obsluhu.

A – akceptovatelný

Projekt byl navrhnout vedení společnosti, která jej akceptovala. Zároveň byl odsouhlasen požadavek na nalezení vhodné místnosti pro realizaci projektu.

R – reálný

Cíl projektu je splnitelný. Společnost má dostatek potřebných zdrojů k realizaci projektu. Výsledek projektu zvýší schopnost společnosti vlastními prostředky flexibilně reagovat a vyrábět atypické součástky.

T – Termín

V průběhu roku 2021

13.4 Logický rámec projektu

Definice projektu

Předmětem projektu je zřízení odloučeného střediska pro výrobu atypických součástí ve společnosti FERPET community s.r.o. Středisko bude vybaveno 3D tiskárnou a počítačem s programem k tvorbě CAD modelů s možností převodu do formátu STL a programem Slicer, který slouží k vytvoření G-code. Středisko se má stát alternativním prostředkem k řešení výroby prototypů a atypických součástí potřebných k realizaci stavebních projektů.

Název projektu

Projekt zavedení 3D tisku FFF ve společnosti FERPET community s.r.o.

Navrhovatel projektu

Bc. František Dynka

Tab. 15 – Matice logické rámce projektu (vlastní zpracování)

Logický rámec projektu			
	Objektivně ověřitelné ukazatele	Zdroje informací k ověření	Předpoklady a rizika
Hlavní cíl (přínosy)			Nevyplňuje se
<ul style="list-style-type: none"> - Soběstačnost, snížení závislosti v rámci dodavatelského řetězce. - Flexibilně reagovat na specifické požadavky - Růst konkurenceschopnosti společnosti - Snižování nákladů výstavby 	<ul style="list-style-type: none"> - Splnění požadovaných termínů výstavby - Dodržení projektových rozpočtů - Snížení nákladů 	<ul style="list-style-type: none"> - Spokojenost investora - Řádné předání díla - Funkční provedení - Diplomová práce 	
Projektový cíl			
<ul style="list-style-type: none"> - Zavedení 3D tisku a možnosti jeho využití 	<ul style="list-style-type: none"> - Výběr vhodného materiálu - Výroba atypických součástí - Výroba prototypů - Návrhy možností využití 3D tisku 	<ul style="list-style-type: none"> - Realizace projektu - Foto dokumentace - Diplomová práce 	<ul style="list-style-type: none"> - Zajištění udržitelnosti projektu - Aдекватnost využití
Výstupy projektu			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Zajištění prostor (místnosti pro 3D tiskárnu) 2. Získání finančních prostředků k realizaci 3. Zakoupení potřebných zařízení 4. Vybavení místnosti 5. Realizace projektu 	<ul style="list-style-type: none"> - Získání finančních prostředků a jejich vyčlenění - Zakoupení/zajištění potřebného zařízení a vybavení - Lidské zdroje (obsluha nového pracoviště) - Zajištění školení 	<ul style="list-style-type: none"> - Evidence nákladů - Evidence majetku - Fotodokumentace 	<ul style="list-style-type: none"> - Zajištění vhodných prostor k realizaci projektu - Zajištění finančních prostředků - Realizace projektu v požadovaném čase a kvalitě - Zajištění udržitelnosti projektu - Volba kvalitního dodavatele zařízení a aditivních materiálů

Aktivity (hlavní činnosti)	Prostředky	Časový rámec	Předběžné podmínky
1. Zajištění prostor (místnosti pro 3D tiskárnu) - Výběr místnosti pro realizaci - Konzultace s vedením společnosti 2. Získání finančních prostředků k realizaci - Předběžná kalkulace nákladů - Dostupné finanční zdroje - Konzultace s vedením společnosti 3. Zakoupení potřebných zařízení - Výběr dodavatele tiskárny - Výběr dodavatele materiálů 4. Vybavení místnosti 5. Realizace projektu	- Analýza potřeb - Finanční zdroje - Školení - Lidské zdroje - Projektová dokumentace - Počítač - CAD program - Slicer - 3D tiskárna - Aditivní materiál - Energie	Průběh roku 2021	- Zvolení témata projektu - Přijetí návrhu na řešení stanovené problematiky - Analýza důvodů pro zavedení 3D tisku - Zahájení projektu

13.5 Analýza projektových rizik RIPRAN

Tab. 16 – Analýza RIPRAN (vlastní zpracování)

Poř.	Hrozba	Scénář	Celková pravděp.	Dopad	Hodnota rizika	Opatření
1.	Nekvalitní výstup projektu	Výrobky budou nefunkční, výroba bude neefektivní.	NP 0,2	SD 6	NHR 1,2	Výběr vhodného materiálu, kalkulace nákladů na výrobu
2.	Nedostatečné školení	Nedostatečná kvalifikace zaměstnance, znemožnění tvorby složitějších modelů či sestav v CAD programu.	SP 0,4	SD 8	SHR 3,2	Zajištění pravidelných kurzů na tvorbu modelů v CAD programu
3.	Nemožnost zakoupení potřebného zařízení	Znemožnění výroby atypických součástí či prototypů.	SP 0,5	VD 10	VHR 5	Ověření dostupnosti potřebných zařízení k realizaci projektu.
4.	Nedodržení rozpočtu	Vzniklé vedlejší náklady, zdražení se kterým nebylo v rámci projektu počítáno.	SP 0,3	SD 5	NHR 1,5	Důsledné provedení a kontrola cen rozpočtu, ověření cen u dodavatelů
5.	Nedostatek finančních prostředků	Společnost nebude disponovat dostatečnými finančními zdroji k realizaci projektu.	NP 0,1	VD 8	NHR 0,8	Stanovení předpokládané výše rozpočtu s finanční rezervou
6.	Nemožnost využít prostory pro 3D tisk	Společnost neposkytne vhodné prostory pro umístění 3D tiskárny.	NP 0,15	VD 8	NHR 1,2	Vysvětlení a odůvodnění podstaty k poskytnutí prostoru
7.	Nákup služeb profesionální firmy zabývající se výrobou atypických součástí	Zbytečnost projektu, najatá služba bude levnější než interní výroba.	NP 0,2	SD 5	NHR 1	Ověření cen dodavatelů
8.	Ukončení činnosti společnosti	Nemožnost realizace projektu.	NP 0,1	VD 10	NHR 1	Hrozba může zásadně ovlivnit průběh projektu, ovšem pravděpodobnost výskytu je nízká.
9.	Nezájem vedení společnosti o projekt.	Nemožnost realizace projektu	NP 0,15	VD 10	NHR 1,15	Hrozba může zásadně ovlivnit průběh projektu, ovšem pravděpodobnost výskytu je nízká.

13.6 Kalkulace nákladů na realizaci projektu

Nezbytnou součástí projektu je kalkulace nákladů potřebných k realizaci projektu.

Tab. 17 – Náklady na realizaci projektu (vlastní zpracování)

Položka	Cena bez DPH	Poznámka
3D tiskárna Průša i3 MK3S	22 305 Kč	
PrusaSlicer		Program je ke stažení zdarma
Počítač	0 Kč	Společnost má jeden počítač, který je nevyužitý k dispozici
SD CARD	156 Kč	
CAD program Solid Edge (roční licence)	19 900 Kč	
Univerzální nářadí pro běžnou údržbu 3D tiskárny	2 000 Kč	
Odpadkový koš	300 Kč	
Vyhlazovací box	3 000 Kč	
Režie 15 %	7 149 Kč	
Celkové náklady	54 810 Kč	

Ceny jsou uvedeny bez DPH, společnost FERPET community s.r.o. je plátcem daně z přidané hodnoty, z toho důvodu tato položka nevstupuje do nákladů.

13.7 Realizace projektu

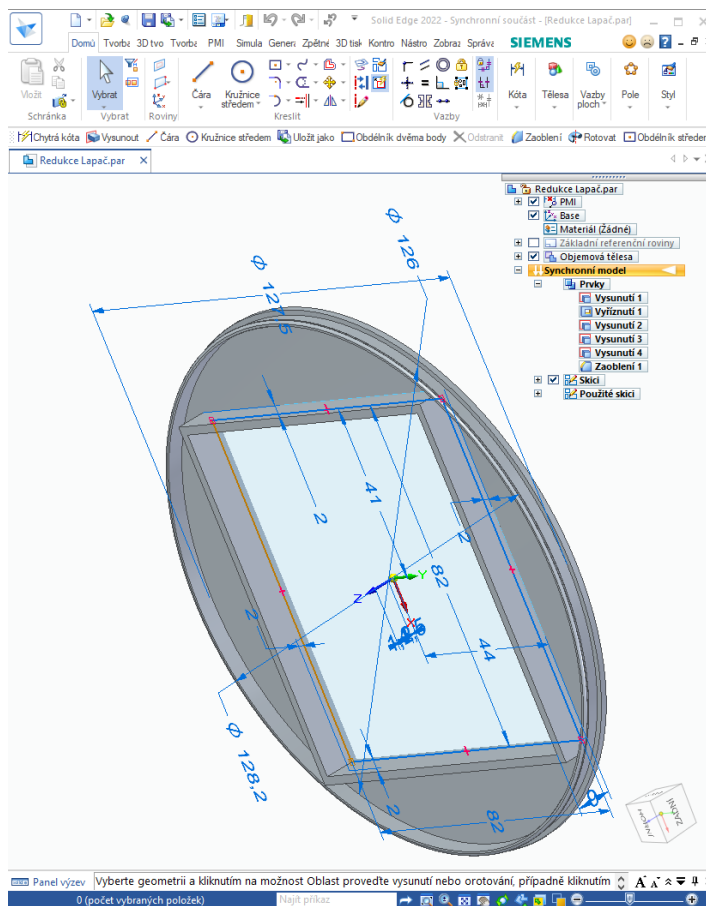
V rámci diplomové práce došlo při výstavbě projektu RD Kyje k realizaci výroby redukce pro hranaté svody a výrobě prototypové součásti „dočasná pažnice prostupu“, která bude následně testována na projektu RD Velké Popovice, a to během června roku 2022.

13.7.1 Realizace redukce pro hranaté svody na projektu RD Kyje

V rámci výstavby projektu RD Kyje proběhla koncem roku 2021 realizace výroby atypické součásti. Jednalo se o redukci na lapače střešních splavenin pro hranaté svody. Redukce byla vyrobena z materiálu ASA, a to na základě vyhodnocení vlivu degradačních faktorů na aditivní materiál (viz kap. 11.3.4).

Vymodelování redukce pro hranaté svody

Redukce byla vymodelována v parametrickém CAD programu SolidEdge (viz obr. 39). Byly použity jednoduché funkce vysunutí a zaoblení. Program SolidEdge umožňuje převod modelu do formátu STL, který byl následně importován do Sliceru.



Obr. 39 – Model redukce pro hranaté svody
(vlastní zpracování)

Nastavení Sliceru a převod do G-code.

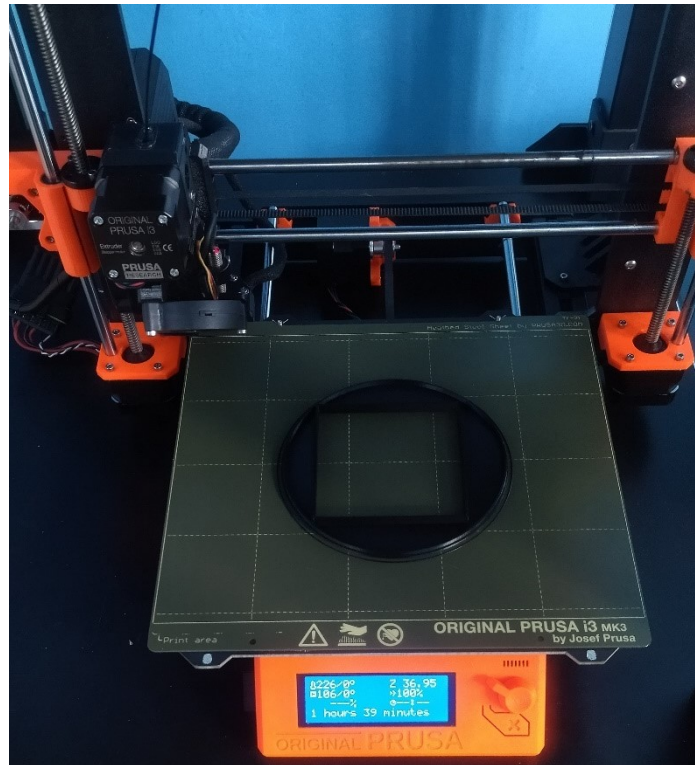
V programu PrusaSlicer byly nastaveny vstupní parametry tisku (viz tab. 18), následně byl programem model převeden do G-code, který byl pomocí SD karty přenesen do tiskárny.

Tab. 18 – Vstupní parametry tisku redukce (vlastní zpracování)

Materiál	ASA Filament-PM
Průměr trysky	0,25 mm
Tloušťka vrstvy	0,1 mm
Procento výplně	80 %
Vnitřní vzor výplně	Výchozí (Gyroid)
Rychlost tisku	200 mm/s
Teplota trysky v první vrstvě	255 °C
Teplota podložky v první vrstvě	100 °C
Teplota trysky v ostatních vrstvách	240 °C
Teplota podložky v ostatních vrstvách	110 °C
Podpěry	NE
Chlazení	NE

Tisk redukce pro hranaté svody

Tisk redukce probíhal na 3D tiskárně Průša i3 MK3s (viz obr. 40)



Obr. 40 – Tisk redukce (vlastní zpracování)

Post-processing redukce pro hranaté svody

Post-processing probíhal působením acetonových par ve vyrobeném vyhlazovacím boxu (viz obr. 41).



Obr. 41 – Post-processing redukce (vlastní zpracování)

Aplikace redukce na místě

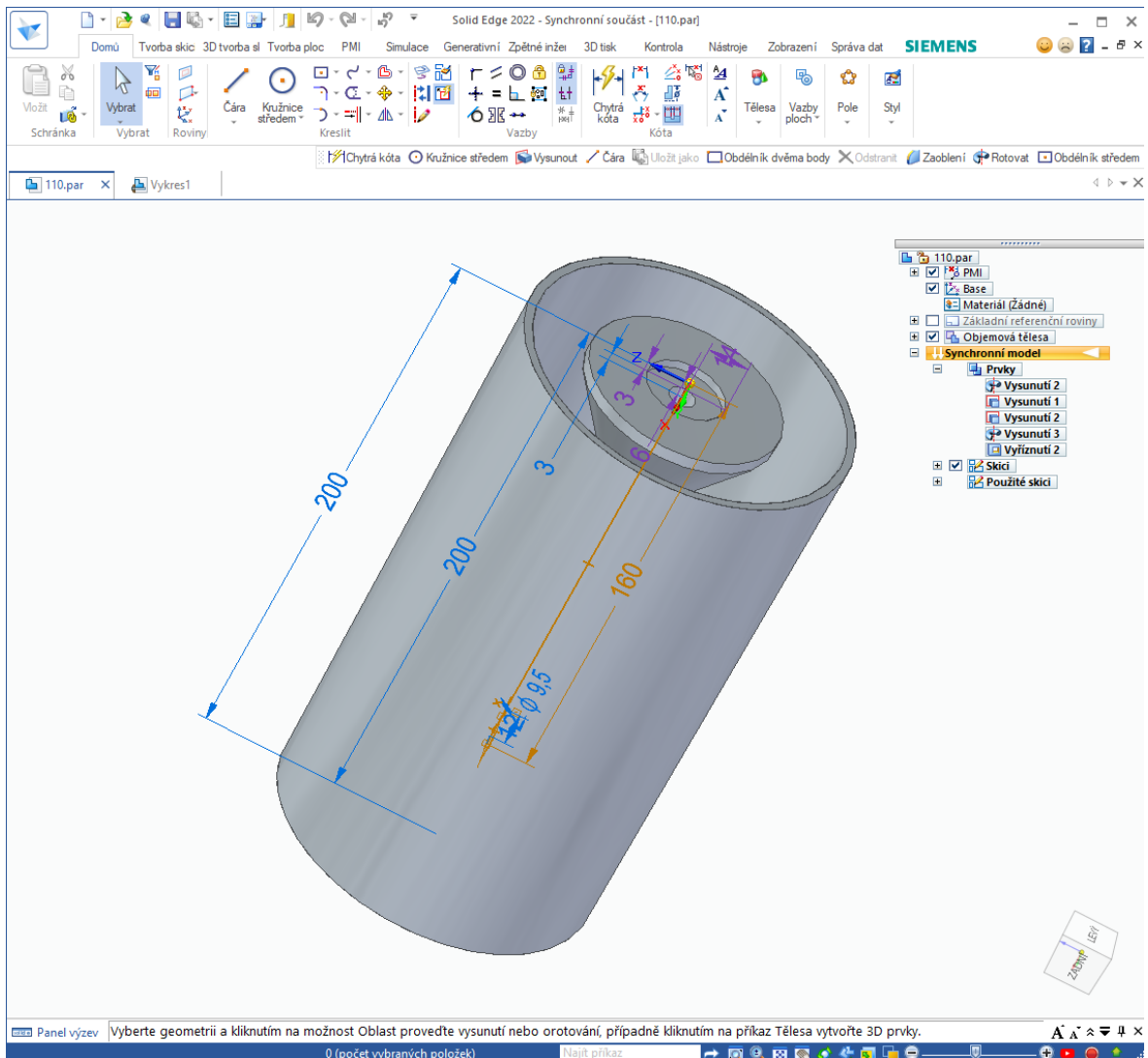
Po provedení post-processingu byla otestována přesnost redukce v místě výroby. Následně byla redukce převezena a aplikována na projektu RD Kyje (viz obr. 42). Celkem bylo pro celý projekt vyrobeno pět redukcí. Redukce splnily veškeré požadavky.



Obr. 42 – Aplikace redukce pro hranaté svody (vlastní zpracování)

13.7.2 Realizace výroby prototypu dočasné pažnice prostupu na projektu RD Velké Popovice

Dočasná pažnice byla vymodelována v parametrickém CAD programu SolidEdge (viz obr. 43). Byly použity jednoduché funkce vysunutí, rotace, zaoblení a zkosení. Program SolidEdge umožňuje převod modelu do formátu STL, který byl následně importován do Sliceru.



Obr. 43 – Model dočasné pažnice prostupu (vlastní zpracování)

Nastavení Sliceru a převod do G-code

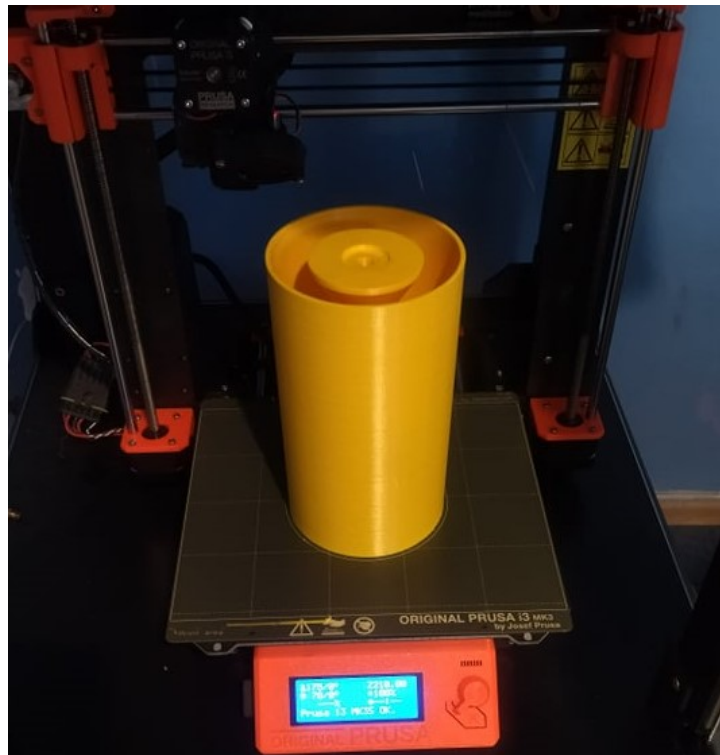
V programu PrusaSlicer byly nastaveny vstupní parametry tisku (viz tab. 19), následně byl programem model převeden do G-code, který byl pomocí SD karty přenesen do tiskárny.

Tab. 19 – Vstupní parametry tisku pažnice (vlastní zpracování)

Materiál	ASA Filament-PM
Průměr trysky	0,6 mm
Tloušťka vrstvy	0,3 mm
Procento výplně	20 %
Vnitřní vzor výplně	Výchozí (Gyroid)
Rychlost tisku	200 mm/s
Teplota trysky v první vrstvě	255 °C
Teplota podložky v první vrstvě	100 °C
Teplota trysky v ostatních vrstvách	240 °C
Teplota podložky v ostatních vrstvách	110 °C
Podpěry	NE
Chlazení	NE

Tisk redukce pro hranaté svody

Tisk pažnice probíhal na 3D tiskárně Průša i3 MK3s (viz obr. 44)



Obr. 44 – Tisk pažnice (vlastní zpracování)

Aplikace dočasné pažnice na místě

Aplikace dočasné pažnice (viz obr. 45) proběhla na projektu RD Velké Popovice. Prostup byl přimontován pomocí vrutu do dřeva Fischer FPF-WT 8,0x240 na stropní bedně. Pažnice bude po vybetonování stropní konstrukce odmontována.



Obr. 45 – Aplikace pažnice na místě (vlastní zpracování)

13.8 Ekonomické zhodnocení projektu

V této části diplomové práce bylo provedeno ekonomické zhodnocení realizovaných projektů RD Kyje (viz kap. 13.7.1) a RD Velké Popovice (viz kap. 13.7.2).

13.8.1 Redukce pro hranaté svody

V tabulce 20 byly vypočítány celkové náklady na výrobu, dodání a montáž lapačů střešních splavenin na projektu RD Kyje. Celkové náklady dosáhly 5 726 Kč, přičemž společnost měla na kompletní dodání 6 310 Kč. Zisk společnosti z dodání těchto komponentů dosáhl 584 Kč.

Realizace měla pro společnost hodnotu zejména z pohledu rizik, která plynou z nedodržení termínů předání. V případě jejich naplnění by mohl být projekt opožděn, a to by mohlo vést k nežádoucím ekonomickým dopadům.

Tab. 20 – Celkové náklady na dodání lapače střešních splavenin (vlastní zpracování; Interní zdroje a dokumenty společnosti)

Položka	Množství	Jednotka	Cena za jednotku bez DPH	Cena celkem bez DPH	Poznámka
Lapač střešních splavenin	5	Ks	211,58 Kč	1057,9 Kč	
Tvorba modelu	0,5	Hod	500 Kč	250 Kč	
Práce spojené s přípravou a tiskem	2	Hod.	500 Kč	1000 Kč	
Spotřeba el. energie	5	Ks	1,66 Kč	8,3 Kč	příkon spotřebiče (120 W) × 0,001 × doba provozu v hodinách (2 hod.) × cena za 1 kWh v korunách (6,9 Kč)
Spotřeba mat. ASA 1,75mm	92	g	0,73 Kč	67,16 Kč	
Post-processing práce	1	Hod.	500 Kč	500	
ACETON	2	L	98 Kč	196 Kč	
Montáž na místě	5	Ks	200 Kč	1 250 Kč	
Likvidace odpadu	1	Kpl	150 Kč	150 Kč	
Doprava	1	Kpl	500 Kč	500 Kč	
Režie 15 %	15	%	746,9 Kč	746,9 Kč	
Celkové náklady na výrobu a montáž – 5 ks lapač střešních splavenin				5 726 Kč	
Rozpočtová cena na kompletní dodání – 5 ks lapač střešních splavenin				6 310 Kč	
Zisk společnosti				584 Kč	

13.8.2 Dočasná pažnice prostupu

Autor v této kapitole spočítal celkové náklady na výrobu a aplikaci jednoho kusu dočasné pažnice, která byla vyrobena pro projekt RD Velké Popovice (viz kap. 13.7.2). V rámci ekonomického zhodnocení tohoto výrobku byl vypočítán bod zvratu, který představuje situaci, kdy tržby pokrývají veškeré výdaje podniku.

Celkové náklady (viz tab. 21) počítají s vymodelováním pažnice a veškerými ostatními výdaji na výrobu a aplikaci jednoho kusu dočasné pažnice. Rozdělení na fixní a variabilní náklady bylo provedeno v tabulce 22. V případě výroby a aplikace pouze jednoho kusu je možné z vypočítaných nákladů vidět, že výroba by v tomto případě byla neekonomická. Z tohoto důvodu byl vypočítán bod zvratu a srovnání nákladů na provedení jádrových vrtů s aplikací dočasných pažnic prostupů.

Tab. 21 – Celkové náklady na výrobu jednoho kusu dočasné pažnice prostupu
(vlastní zpracování; Interní zdroje a dokumenty společnosti)

Položka	Množství	Jednotka	Cena za jednotku bez DPH	Cena celkem bez DPH	Poznámka
Tvorba modelu pažnice	4	Hod.	500 Kč	2 000 Kč	
Práce spojené s přípravou a tiskem	1	Hod.	500 Kč	500 Kč	
Spotřeba el. energie	1	Ks	20,7 Kč	20,7 Kč	příkon spotřebiče (120 W) × 0,001 × doba provozu v hodinách (25 hod.) × cena za 1 kWh v korunách (6,9 Kč)
Spotřeba mat. ASA 1,75mm	500	g	0,73 Kč	365 Kč	
Post-processing práce	0,5	Hod.	500 Kč	250 Kč	
Vrut do dřeva Fischer FPF-WT 8,0x240	1	Ks	22,98 Kč	22,98 Kč	
Podložka DIN 440 M8	1	Ks	5,55 Kč	5,55 Kč	
Montáž na místě	1	Ks	200 Kč	200 Kč	
Demontáž na místě	1	Kpl	200 Kč	200 Kč	
Doprava	1	Kpl	500 Kč	500 Kč	
Režie 15 %	15	%	609,60 Kč	609,60 Kč	
Celkové náklady na výrobu a montáž jednoho kusu dočasné pažnice prostupu				4 673,83 Kč	
Rozpočtová cena na provedení jednoho jádrového vrtu (viz kap. 13.2.2)				3 560 Kč	
Ztráta společnosti při výrobě jednoho ks				1 113,83 Kč	

Bod zvratu

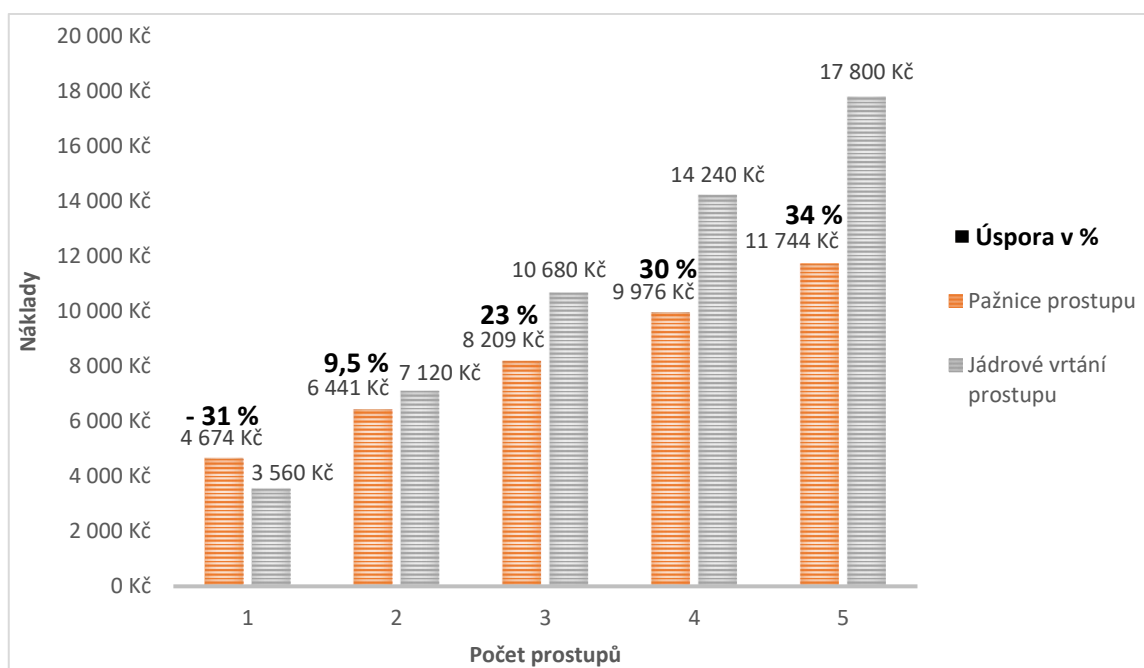
Tab. 22 – Rozdělení nákladů dočasné pažnice prostupu (vlastní zpracování; Interní zdroje a dokumenty společnosti)

Fixní náklady		Variabilní náklady na kus	
Tvorba modelu pažnic DN 50 až 160	2000 Kč	Práce spojené s přípravou a tiskem	500 Kč
Doprava	500 Kč	Spotřeba el. energie	20,7 Kč
Režie 10 %	406,4 Kč	Spotřeba mat. ASA 1,75mm	365 Kč
		Post-processingové práce	250 Kč
		Vrut RAPI-TEC SK T40 8×220 mm	22,98 Kč
		Podložka DIN 440 M8	5,55 Kč
		Montáž na místě	200 Kč
		Demontáž na místě	200 Kč
		Režie 5 %	203,2 Kč
Celkem	2 906,40 Kč	Celkem	1 767,43 Kč

- Bod zvratu = Fixní náklady / (Rozpočtová cena za vstup – variabilní náklady na výrobu a aplikaci jednoho kusu)
- Bod zvratu = 2 906,4 / (3560 – 1767,43)
- Bod zvratu = 1,62 ks pažnic

Tento výsledek lze interpretovat tak, že použití dočasné pažnice prostupu se vyplatí při výrobě a aplikaci alespoň dvou kusů (úspora 9,5 %).

Z grafického znázornění (viz graf 4) lze vidět srovnání nákladů včetně potenciální úspory na výrobu a aplikaci různého množství dočasných vstupů s možností jádrového vrtání.



Graf 4 – Srovnání nákladů na aplikaci různého množství vstupů (vlastní zpracování)

14 SHRNU TÍ PRAKTICKÉ ČÁSTI

V praktické části diplomové práce byly dle normy ČSN EN ISO 527 v CAD programu navrženy normalizované zkušební vzorky pro tahovou zkoušku. Následně proběhla aditivní technologií Fused Filament Fabrication výroba zkušebních vzorků z materiálů PLA, ABS, ASA a PET-G od výrobce Filament-PM. Až na kontrolní sadu vzorků, byly ostatní sady vystaveny vybraným degradačním vlivům:

- UV záření po dobu 20 hodin.
- UV záření po dobu 100 hodin.
- Teplotě 60 °C po dobu 100 hodin.
- 100% vlhkosti po dobu 100 hodin.
- Teplotním FT cyklů (*freeze-thaw cycle*).

Vybrané normalizované parametry (mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu a tažnost), získané z provedených tahových zkoušek, byly statisticky zpracovány a zaznamenány do tabulek a grafů. V rámci statistického zpracování byly pomocí Dunnettova testu posouzeny a vzájemně porovnány vlivy degradačních faktorů na testované aditivní materiály, ze kterých byla stanovena východiska pro využití 3D tisku k výrobě atypických součástí.

V rámci projektové části diplomové práce byly popsány základní informace, historie a organizační struktura společnosti FERPET community s.r.o. Následně byla provedena analýza možností využití 3D tisku v uvedené společnosti, na jejímž základě byl projekt realizován. V závěru praktické části bylo provedeno ekonomické zhodnocení projektu.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout východisek pro využití 3D tisku k výrobě atypických součástí a zhodnocení jejich ekonomických přínosů.

Teoretická část popisuje základní poznatky z oblasti aditivních technologií, polymerních materiálů, degradace polymerů, tahové zkoušky a projektového řízení.

Prvním krokem praktické části bylo navrhnout normalizovaných zkušebních vzorků v CAD programu, a to dle normy ČSN EN ISO 527. Zkušební vzorky byly následně z vybraných aditivních materiálů (PLA, ABS, ASA a PET-G) vytisknuty aditivní technologií FFF na 3D tiskárně PRUSA i3 MK3s. Vytisknuto bylo celkem šest sad od každého materiálu, přičemž každá sada obsahovala sedm zkušebních vzorků.

Jedna sada vzorků byla stanovena jako kontrolní, ostatních pět sad bylo vystaveno vybraným degradačním vlivům:

- UV záření po dobu 20 hodin.
- UV záření po dobu 100 hodin.
- Teplotě 60 °C po dobu 100 hodin.
- 100% vlhkosti po dobu 100 hodin.
- Teplotním FT cyklů (*freeze-thaw cycle*).

Jednotlivé sady vzorků byly následně testovány tahovou zkouškou, ze které proběhlo vyhodnocení základních normalizovaných parametrů:

- Mez pevnosti v tahu [MPa],
- modul pružnosti v tahu [MPa],
- tažnost [%].

K vyhodnocení vlivu degradačních faktorů byly získané základní normalizované parametry porovnávány vždy s kontrolními hodnotami pomocí statisticky zpracovaných středních hodnot, analýzy rozptylu a Dunnettova vícenásobného srovnávacího testu, který sloužil k porovnání experimentálních skupin s kontrolní skupinou.

V rámci statistického zpracování byla navržena východiska využití testovaných aditivních materiálů, přičemž z hlediska mechanických vlastností se jako nejvhodnější aditivní materiál pro výrobu atypických součástí projevil materiál ASA, na který nemělo působení

degradačních faktorů významný negativní vliv. U ostatních materiálů se provedením statistických testů významný vliv degradačních faktorů potvrdil.

V projektové části práce byla provedena analýza a zhodnocení ekonomických přínosů využití 3D tisku pro výrobu atypických součástí ve společnosti FERPET community s.r.o.

V rámci výstavby projektu RD Kyje proběhla koncem roku 2021 realizace výroby atypické součásti (redukce lapače střešních splavenin pro hranaté svody). Celkové náklady pro realizaci činili 5 726 Kč, společnost měla dle rozpočtu projektu k dispozici 6 310 Kč. Celková úspora tedy činila 584 Kč. Realizace měla pro společnost hodnotu zejména z pohledu rizik, která plynou z nedodržení termínů předání. V případě jejich naplnění by mohl být projekt opožděn, a to by mohlo vést k nežádoucím ekonomickým dopadům.

Autor se dále zabýval výrobou dočasné pažnice prostupu, která by v budoucnu mohla ekonomicky zlepšit proces provádění stavebních prostupů monolitických stropů. V rámci projektu byly spočítány celkové náklady na výrobu jednoho prostupu. Dále byl vypočítán bod zvratu výroby, z něhož je patrné, že proces použití dočasné pažnice prostupu by byl výhodný již při aplikaci dvou prostupů. V tomto případě by se jednalo o úporu ve výši 9,5 % nákladů ve srovnání s jádrovým vrtáním. Pokud by bylo použito více prostupů, úspory by se úměrně zvyšovaly. Při aplikaci pěti pažnic by úspora činila 34 % nákladů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1 BALCAROVÁ, Kateřina. *Co je to filament?* © 2022. Miroluk [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.miroluk.cz/clanky-jake-je-zakladni-rozdeleni-materialu-filamentu-pro-3d-tiskarny-a-jake-jsou-v-nich-rozdily.html>
- 2 BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Svitavy: Střední odborné učiliště Svitavy, 2016, [online]. [cit. 2022-04-16]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- 3 ČIŽMÁROVÁ, Elena, Jakub HORNÍK, Zdeňka JENÍKOVÁ, Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: Cvičení*. Praha: ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- 4 ČSN EN ISO 527-1, 2012. *Plasty – Stanovení tahových vlastností: Část 1: Obecné principy*. 1. Zlín: Institut pro testování a certifikaci.
- 5 ČSN EN ISO 527-2, 2012. *Plasty – Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. 1. Zlín: Institut pro testování a certifikaci.
- 6 DOSKOČIL, Radek. *Metody, techniky a nástroje řízení projektů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 165 s. ISBN 9788072048632.
- 7 DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 9788070807880. Dostupné také z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/uid_isbn-978-80-7080-788-0/anotace/
- 8 DRIML, Bohuslav. *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení*, © 2022. UPOL [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- 9 Dynka, František. *Stanovení mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk*. Zlín, 2020. [online]. [cit. 2022-3-26]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/48857/dynka_2020_dp.pdf?sequence=-1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Fakulta managementu a ekonomiky. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
- 10 GEBHARDT, Andreas, Julia KESSLER a Laura THURN. *3D printing: understanding additive manufacturing*. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, 2019, 204 s. ISBN 9781569907023.
- 11 CHUA, Che Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

- 12 CHVALOVSKÝ, Václav. *Řízení projektů, aneb, Překážkový běh na dlouhou trať*. Praha: ASPI, 2005, 132 s. Lidské zdroje. ISBN 8073570858.
- 13 JIROUŠEK, Jan. *Analýza mechanických vlastností plastových vzorků zhotovených technologií 3D tisku*. Brno, 2021. [online]. [cit. 2022-3-29]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/132590>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.
- 14 KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017, 211 s. ISBN 978-80-251-4876-1.
- 15 MACEK, Karel, Petr ZUNA a kol., *Nauka o materiálu*. Praha: ČVUT, 1996, 209 s. ISBN 80-010-1507-6.
- 16 MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. Praha: ČVUT, 2014, 139 s. ISBN 978-80-01-05527-4.
- 17 MCKEEN, Laurence W. *The effect of UV light and weather on plastics and elastomers*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013, 388 s. ISBN 9781455728510.
- 18 MORAVČÍK, Roman. *Úvod do materiálového inženýrství I*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015. Edícia vysokoškolských učebnic (Slovenská technická univerzita). ISBN 978-80-227-4405-8.
- 19 SRIVATSAN, T. S. a T. S. SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, 444 s. ISBN 978-1-4987-1477-8.
- 20 ŠTEFÁNEK, Radoslav. *Projektové řízení pro začátečníky*. Brno: Computer Press, 2011, 304 s. ISBN 9788025128350.
- 21 VOJTĚCH, Dalibor. *Materiály a jejich mezní stavy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2010, 212 s. ISBN 978-80-7080-741-5.
- 22 3D tisk fotopolymerizací, © 2022. *cotu.cz* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/151/3d-tisk-fotopolymerizaci>
- 23 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? © 2022. Svět hardware [online]. [cit. 23.03.2022]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- 24 3D tisk spékáním práškové vrstvy, © 2022. *cotu.cz* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/90/praskovy-3d-tisk>

- 25 3D Printing vs CNC Machining: Which is best for prototyping? © 2022 *3Dnatives*. [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.filamentone.com/blogs/3d-printing-blog/what-is-3d-printing>
- 26 ABS Bílá, © 2022 *Plasty Mladeč* [online]. [cit. 22.03.2022]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/abs-bila-1-75-mm-1-kg/p6>
- 27 ASA – natur, © 2022 *Plasty Mladeč* [online]. [cit. 22.04.2022]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/asa-natur-1-75-mm-2-kg/p284>
- 28 Dashöfer Holding, Ltd., Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. @ 2022. *Ceník stavebních prací* [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: http://www.cenikstavebnichpraci.cz/cenik-stavebnich-praci-product-csp/?wa=WWW22GPC&gclid=EAIAIQoChMlIfTK7JOW9wIV4I1oCR35VQXhEAAYASAAEgKgdfD_BwE
- 29 Express guide of FDM 3D printing materials. © 2022. *Treatstock.com* [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.treatstock.com/guide/article/118-epressguide-of-fdm-3d-printing-materials>
- 30 FERPET community s.r.o. @ 2022. [online]. [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.ferpet.cz/>
- 31 Fyzikální základy vědy o materiálu, © 2022. *Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity* [online]. [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>
- 32 HORNBAACH - projektový hobbymarket. @ 2022. [online]. [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: https://cdn.hornbach.cz/data/shop/D04/001/780/491/478/890/DV_8_8444981_03_4c_CZ_20181206051651.jpg
- 33 Interní dokumenty a zdroje společnosti, @ 2022. *FERPET community s.r.o.*
- 34 Machine Designs of 3D Printers, © 2022. *ResearchGate GmbH*. [online]. [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Machine-Designs-of-3D-Printers9_fig1_333989749
- 35 PETG Černá © 2022 *Plasty Mladeč* [online]. [cit. 22.04.2022]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg-cerna-1-75-mm-2-kg/p152>
- 36 PLA Zelená, © 2022. *Plasty Mladeč* [online]. [cit. 22.03.2022]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/pla-zelena-1-75-mm-1-kg/p74>

- 37 Prusament ASA, © 2022. *Prusament* [online]. [cit. 22.03.2022].
Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-asa/>
- 38 Prusament PETG, © 2022. *Prusament* [online]. [cit. 22.03.2022]. [cit. 22.04.2022].
Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- 39 Půjčovna stavebních strojů MITOP HB. @ 2022 [online]. [cit. 2022-04-05].
Dostupné z: <https://www.mitophb.cz/wp-content/uploads/2019/06/jadrove-vrtani-mitophb-01-min.jpg>
- 40 Retrakce, © 2019. *3D-tisk.cz* [online]. [cit. 23.03.2022].
Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/retrakce/>
- 41 Rychlá výroba prototypů, © 2022. *FINEWS* [online]. [cit. 2022-03-23].
Dostupné z: <https://flnews.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypu-klic-kintenzivnim-aerodynamickym-programum-v-f1-video>
- 42 The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar), © 2022. *3Dnatives* [online]. [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/#!>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
3D	Trojdimenzionální (trojrozměrný)
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
Aj.	A jiné
ASA	Akrylonitrilstyrenakryl
CAD	Computer-aided design
CO ₂	Oxid uhličitý
Č.	Číslo
ČSN EN ISO	Česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou normu identickou s mezinárodní normou ISO
DLP	Digital light processing
DMLS/SLM	Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting
Doc.	Docent
DPH	Daň z přidané hodnoty
Dr.	Doktor
EBM	Electron beam melting
FAME	Fakulta managementu a ekonomiky
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
Ing.	Inženýr
Kč	Koruna česká
LCD	Liquid crystal display
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJM	Multi Jet Modeling
Např.	Například

Obr.	Obrázek
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PET-G	Polyethylentereftalát-1,4-cyklohexylendimethyltereftalát
Ph.D.	Doktor
PLA	Polylaktid
RP	Rapid Prototyping
S.	Strana
SD CARD	Secure Digital Card
SGC	Solid Ground Cutting
SLA	Stereo Lithography Apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
S.R.O.	S ručením omezeným
STL	Stereolitografie
Tab.	Tabulka
Tzv.	Tak zvaný
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultrafialové záření

Symbol	Popis [jednotka]
A	Tažnost [%]
A_t	Tažnost měřená v zatíženém stavu pod napětím [%]
$A_{11,3}$	Tažnost pro dlouhé zkušební tyče [%]
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
F	Zatěžující síla [N]

F_E	Mez úměrnosti [MPa]
F_e	Síla na mezi kluzu [N]
F_{eD}	Síla na dolní mezi kluzu [N]
F_{eH}	Síla na horní mezi kluzu [N]
F_m	Síla na mez pevnosti [N]
$F_{p0,2}$	Síla na nevýrazné mezi kluzu [N]
k	Součinitel proporcionality [-]
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi trhačického zařízení [mm]
L_i	Okamžitá délka zkušební tyče [mm]
L_0	Počáteční měřená délka zkušební tyče [mm]
L_u	Konečná délka zkušební tyče [mm]
R	Smluvní napětí [MPa]
R_e	Výrazná mez kluzu [MPa]
R_{eD}	Dolní mez kluzu [MPa]
R_{eH}	Horní mez kluzu [MPa]
R_m	Mez pevnosti [MPa]
$R_{p0,2}$	Nevýrazná mez kluzu [MPa]
S_i	Okamžitý průřez zkušební tyče [mm]
S_u	Plocha konečného průřezu zkušební tyče [mm]
S_0	Plochá počátečního průřezu zkušební tyče [mm]
T	Tloušťka zkušební tyče [mm]
b_1	Šířka zúžené části zkušební tyče [mm]
b_2	Šířka upínací části zkušební tyče [mm]
l_1	Délka zúžené části zkušební tyče [mm]
l_2	Vzdálenost mezi osazeními zkušební tyče [mm]
l_3	Celková délka zkušební tyče [mm]

n	Počet prvků statistického souboru [-]
r	Poloměr mezi upínací a zúženou zkušební tyče [mm]
x	Hodnoty uspořádané podle velikosti [-]
x_i	Prvek statistického souboru [-]
s	Směrodatná odchylka [-]
s^2	Rozptyl [-]
\bar{x}	Střední hodnota [-]
ε	Poměrné prodloužení [%]
ε_u	Poměrné trvalé prodloužení [%]
σ	Skutečné tahové napětí [MPa]
ΔL_u	Absolutní přírůstek počáteční měřené délky po přetržení zkušební tyče [mm]
ΔL	Okamžité prodloužení zkušební tyče [mm]
σ	Skutečné tahové napětí [MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Subtraktivní x aditivní technologie.....	12
Obr. 2 – Princip technologie FFF / FDM.....	16
Obr. 3 – Extrudér schéma	17
Obr. 4 – Typy uspořádní FFF / FDM tiskáren	19
Obr. 5 – Typy extruze FFF / FDM tiskárny.....	20
Obr. 6 – Druhy řetězců polymerních materiálů	22
Obr. 7 – Rozdělení polymerů.....	23
Obr. 8 – Tahové diagramy odlišných materiálů	24
Obr. 9 – Základní druhy namáhání materiálů	30
Obr. 10 – Dělení mechanických zkoušek materiálů	31
Obr. 11 – Univerzální zkušební stroj pro zkoušku tahem, tlakem a ohybem	32
Obr. 12 – Zkušební tyče: před a po přetržení – původní průřezy a měřené délky jsou označeny S_0 a L_0 , konečné S_u a L_u	33
Obr. 13 – Pracovní diagramy s výraznou a nevýraznou mezí kluzu	34
Obr. 14 – Diagramy R/ϵ	37
Obr. 15 – Mez pevnosti.....	38
Obr. 16 – Mez kluzu	39
Obr. 17 – Trojimperativ projektu.....	42
Obr. 18 – Matice logického rámce 1/2	43
Obr. 19 – Matice logického rámce 2/2	44
Obr. 20 – Zkušební těleso 1BA	47
Obr. 21 – Výkres zkušební tyče.....	48
Obr. 22 – PrusaSlicer	49
Obr. 23 – Tisk zkušebních vzorků	50
Obr. 24 – Vliv UV záření ABS	51
Obr. 25 – Testování výdrže na teplotě 60 °C.....	52
Obr. 26 – Kondenzační komora	53
Obr. 27 – Zkušební trhací stroj Zwick Z100	54
Obr. 28 – Nastavení průřezu zkušební tyče	55
Obr. 29 – Upínací mechanismus.....	56
Obr. 30 – Program testExpert	56
Obr. 31 – Prostředí Minitab	57

Obr. 32 – Logo společnosti.....	70
Obr. 33 – Projekt RD Kyje	71
Obr. 34 – Organizační struktura společnosti FERPET community s.r.o.....	72
Obr. 35 – Lapač střešních splavenin	74
Obr. 36 – Bednění stavebních prostupů.....	74
Obr. 37 – Jádrové vrtání	75
Obr. 38 – Prostup kanalizace	75
Obr. 39 – Model redukce pro hranaté svody	81
Obr. 40 – Tisk redukce	82
Obr. 41 – Post-processing redukce	82
Obr. 42 – Aplikace redukce pro hranaté svody	83
Obr. 43 – Model dočasné pažnice prostupu.....	84
Obr. 44 – Tisk pažnice	85
Obr. 45 – Aplikace pažnice na místě	86

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – 3D tiskové technologie na bázi fotopolymerů.....	13
Tab. 2 – 3D tiskové technologie na bázi práškových materiálů.....	14
Tab. 3 – 3D tiskové technologie na bázi tuhých materiálů.....	15
Tab. 4 – Rozměry zkušebního tělesa 1BA.....	48
Tab. 5 – Seznam aditivních materiálů.....	49
Tab. 6 – Tiskové parametry.....	50
Tab. 7 – Základní statistické parametry meze pevnosti v tahu materiálu PLA.....	58
Tab. 8 – Základní statistické parametry modulu pružnosti v tahu materiálu PLA.....	60
Tab. 9 – Zákl. statistické parametry tažnosti materiálu PLA.....	61
Tab. 10 – Vliv degradačních faktorů na mez pevnosti v tahu [MPa].....	64
Tab. 11 – Vliv degradačních faktorů na modul pružnosti v tahu [MPa].....	65
Tab. 12 – Vliv degradačních faktorů na tažnost [%].....	66
Tab. 13 – Celkové zhodnocení vlivu degradačních faktorů na mechanické vlastnosti aplikovaných aditivních materiálů – část 1.....	69
Tab. 14 - Celkové zhodnocení vlivu degradačních faktorů na mechanické vlastnosti aplikovaných aditivních materiálů – část 2.....	69
Tab. 15 – Matice logické rámce projektu.....	77
Tab. 16 – Analýza RIPRAN.....	79
Tab. 17 – Náklady na realizaci projektu.....	80
Tab. 18 – Vstupní parametry tisku redukce.....	81
Tab. 19 – Vstupní parametry tisku pažnice.....	85
Tab. 20 – Celkové náklady na dodání lapače střešních splavenin.....	87
Tab. 21 – Celkové náklady na výrobu jednoho kusu dočasné pažnice prostupu.....	88
Tab. 22 – Rozdělení nákladů dočasné pažnice prostupu.....	89

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Dunnettův test meze pevnosti materiálu PLA	59
Graf 2 – Dunnettův test modulu pružnosti materiálu PLA	61
Graf 3 – Dunnettův test tažnosti materiálu PLA.....	62
Graf 4 – Srovnání nákladů na aplikaci různého množství prostupů	89

SEZNAM PŘÍLOH

- PŘÍLOHA I Technický list aditivního materiálu PLA od výrobce Filament-PM
- PŘÍLOHA II Technický list aditivního materiálu ABS od výrobce Filament-PM
- PŘÍLOHA III Technický list aditivního materiálu ASA od výrobce Filament-PM
- PŘÍLOHA IV Technický list aditivního materiálu PET-G od výrobce Filament-PM
- PŘÍLOHA V Statistické zpracování působení degradačních faktorů na mechanické vlastnosti materiálu PLA od výrobce Filament-PM
- PŘÍLOHA VI Statistické zpracování působení degradačních faktorů na mechanické vlastnosti materiálu ABS od výrobce Filament-PM
- PŘÍLOHA VII Statistické zpracování působení degradačních faktorů na mechanické vlastnosti materiálu ASA od výrobce Filament-PM
- PŘÍLOHA VIII Statistické zpracování působení degradačních faktorů na mechanické vlastnosti materiálu PET-G od výrobce Filament-PM

PŘÍLOHA I: TECHNICKÝ LIST ADITIVNÍHO MATERIÁLU PLA OD VÝROBCE FILAMENT-PM



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

PLA FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	polylactid acid by NatureWork, biodegradabilic material, non petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/pla		
Solvents	1,2 Dichloroethane, Toluene, Tetrahydrofuran,		
Printing Properties:			
Temperature HE	200 – 230 °C		
Temperature HB	20-60 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters / for glitter using nozzle min 0,5 mm and more		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	55 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	55 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	16 kJ/m ²
	flexural modulus	ISO 178	3500 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,24 g/cm ³
	Melt Flow Index	ISO 1133	6 g/10 min

PŘÍLOHA II: TECHNICKÝ LIST ADITIVNÍHO MATERIÁLU ABS OD VÝROBCE FILAMENT-PM



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT: **ABS FILAMENT**

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Acrylonitrilbutadienstyrene, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/abs-not-dead		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	220 – 250 °C		
Temperature HB	100 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	NO		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	94 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	89 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	20 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1800 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,04 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	40 g/10 min

PŘÍLOHA III: TECHNICKÝ LIST ADITIVNÍHO MATERIÁLU ASA OD VÝROBCE FILAMENT-PM



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT: ASA FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Acrylonitril styren acrylate, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,85 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,75 kg netto ± 5% / 0,9 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/asa-1-75		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	Ø1,75: 240 – 260 °C		Ø 2,90: 250 – 270°C
Temperature HB	100 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	MAX 30%		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	96 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	87 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	12 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1800 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,07 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	20 g/10 min

PŘÍLOHA IV: TECHNICKÝ LIST ADITIVNÍHO MATERIÁLU PET-G OD VÝROBCE FILAMENT-PM

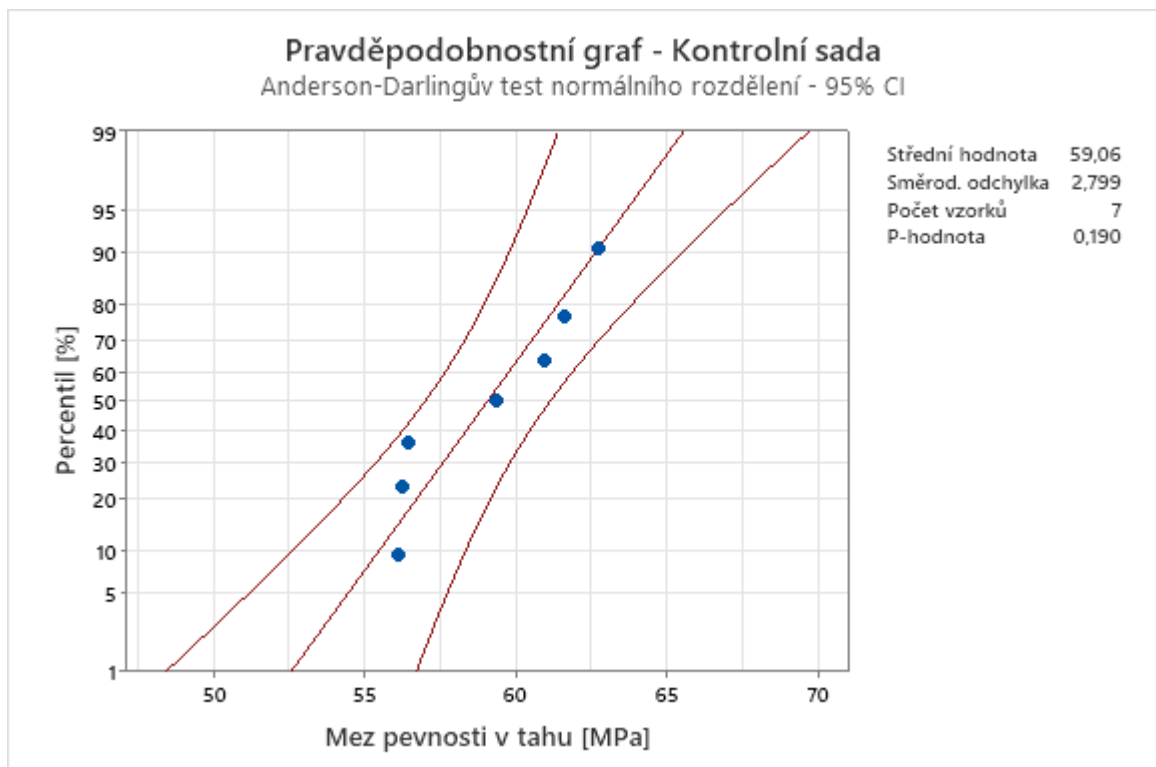
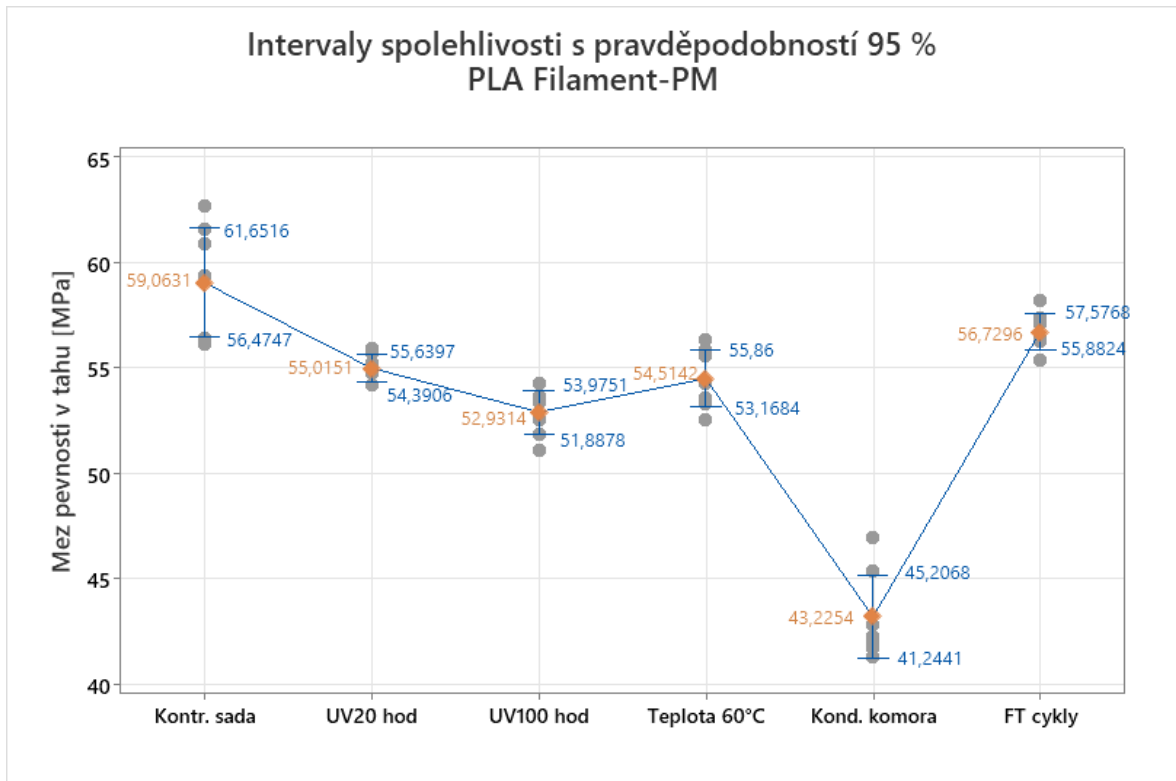


TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT: PLA FILAMENT

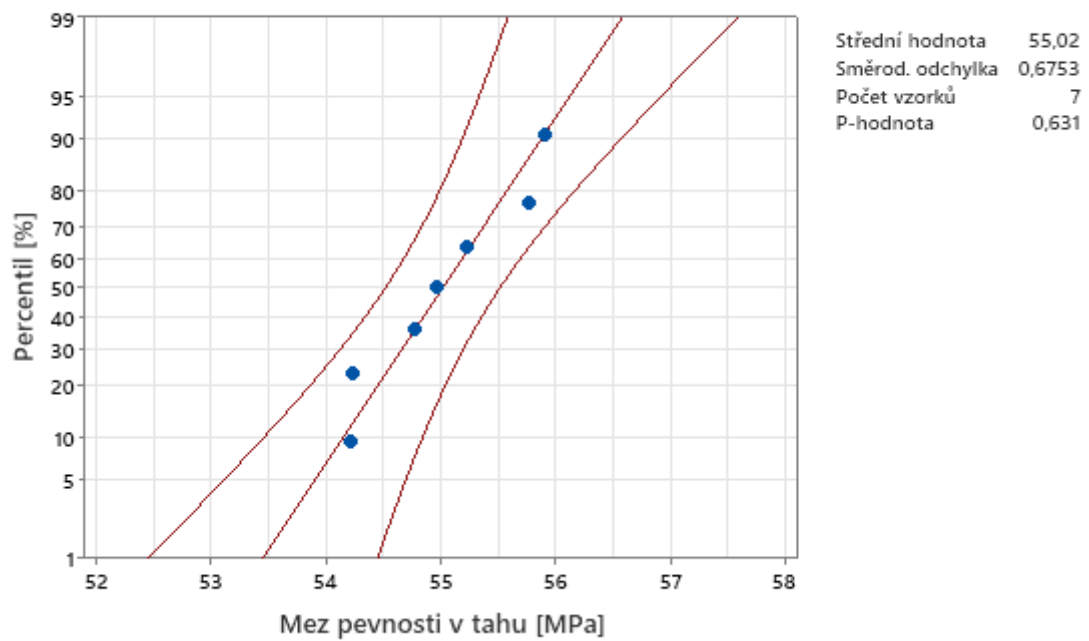
Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	polylactid acid by NatureWork, biodegradabilic material, non petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/pla		
Solvents	1,2 Dichloroethane, Toluene, Tetrahydrofuran,		
Printing Properties:			
Temperature HE	200 – 230 °C		
Temperature HB	20-60 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters / for glitter using nozzle min 0,5 mm and more		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	55 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	55 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	16 kJ/m ²
	flexural modulus	ISO 178	3500 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,24 g/cm ³
	Melt Flow Index	ISO 1133	6 g/10 min

PŘÍLOHA V: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ PŮSOBENÍ DEGRADAČNÍCH FAKTORŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU PLA OD VÝROBCE FILAMENT-PM

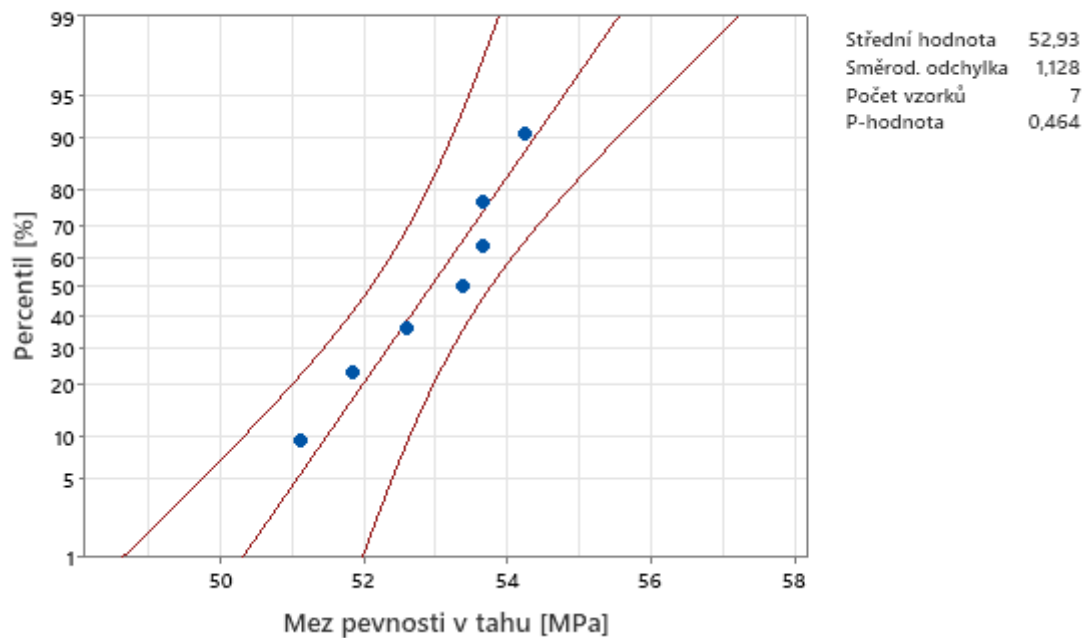
Mez pevnosti v tahu aditivního materiálu PLA



Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

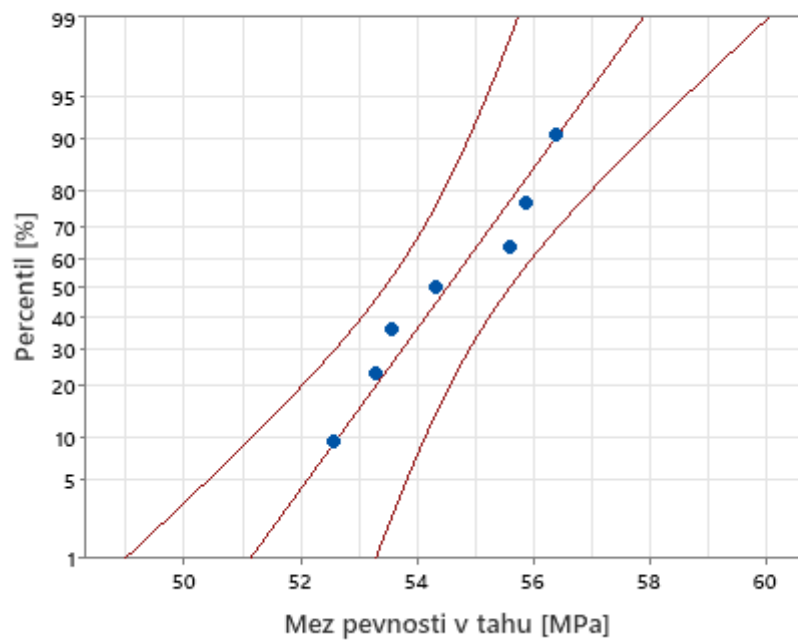


Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

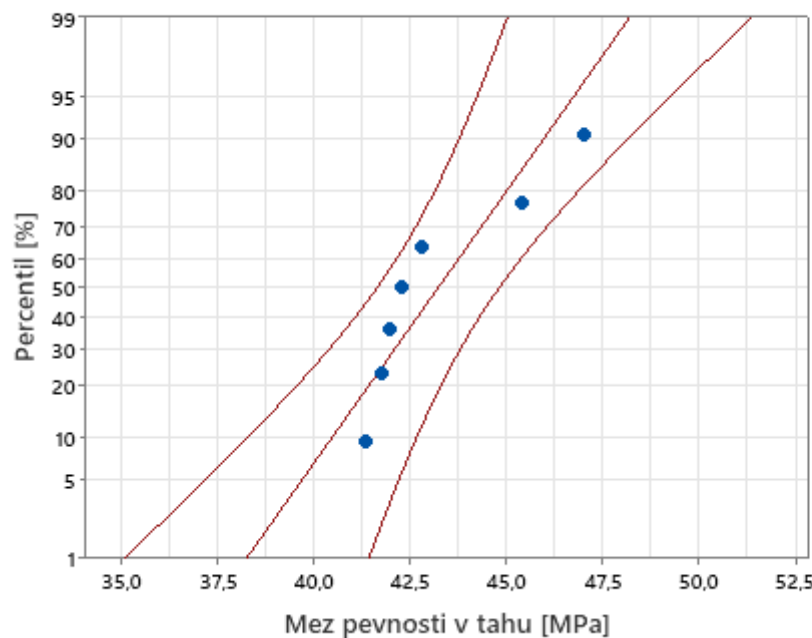
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 54,51
Směrod. odchylka 1,455
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,559

Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

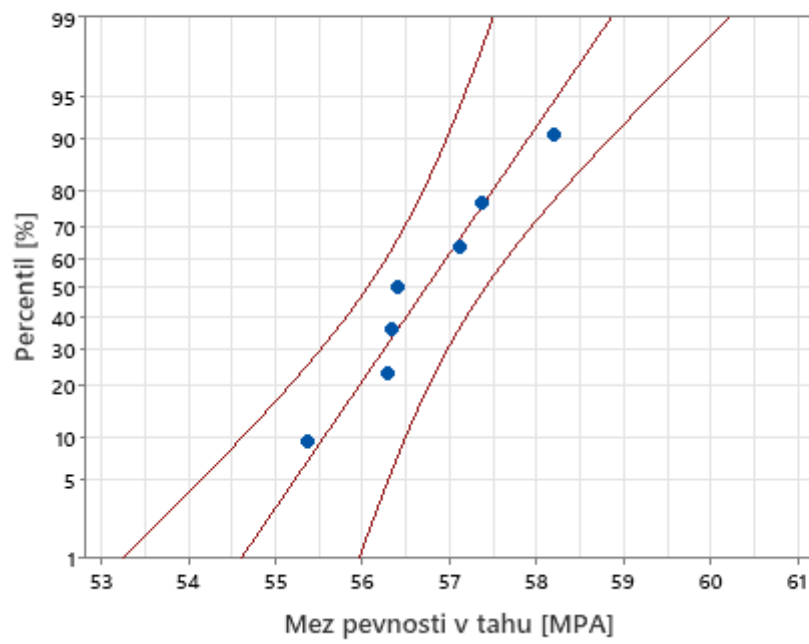
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



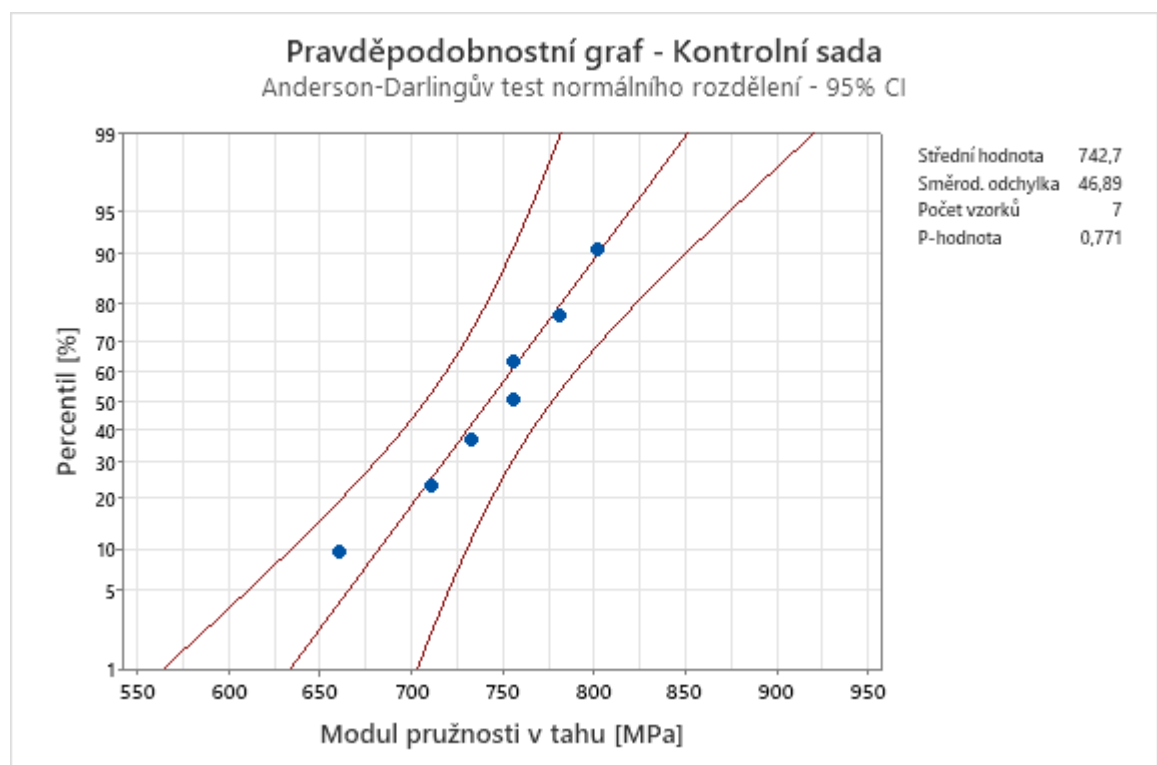
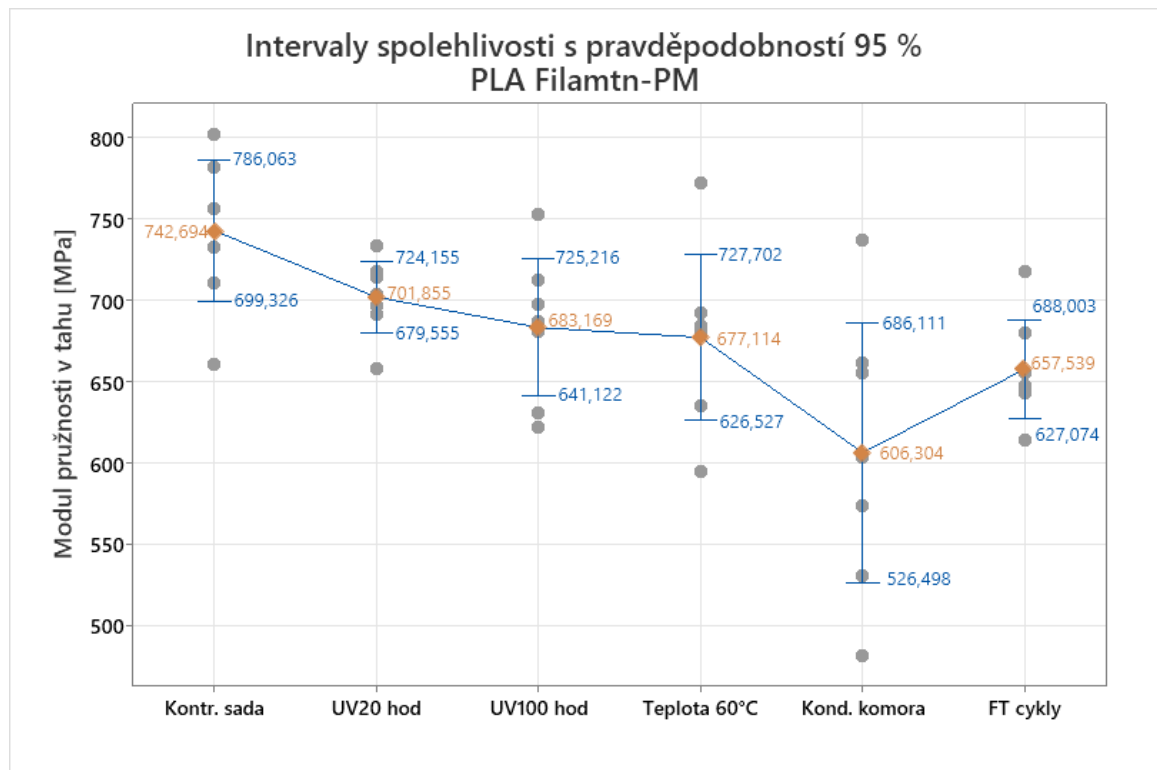
Střední hodnota 43,23
Směrod. odchylka 2,142
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,064

Pravděpodobnostní graf - FT cykly

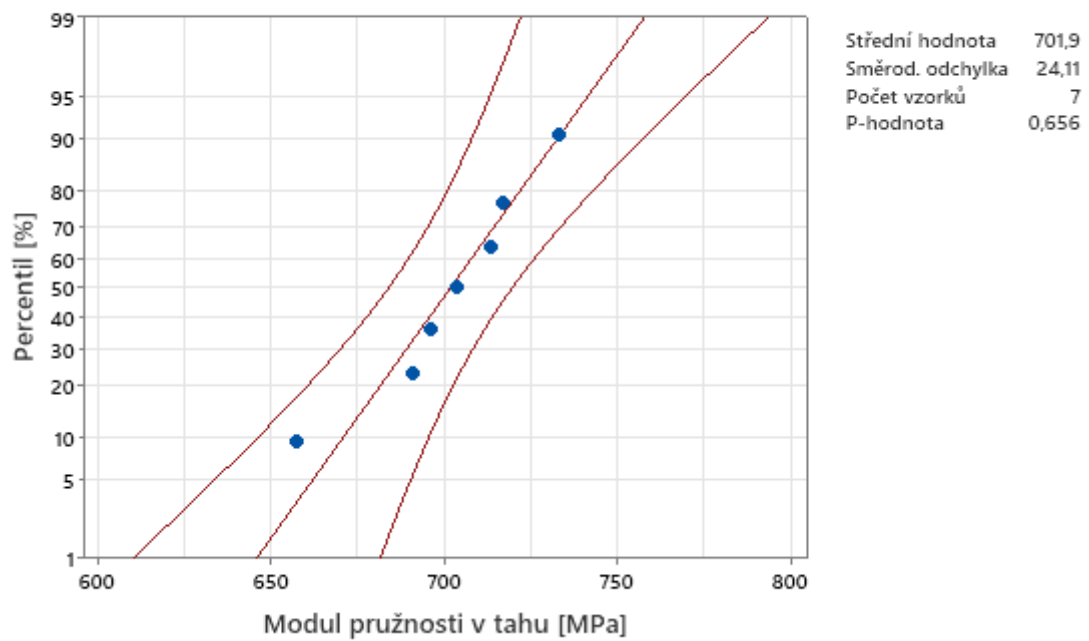
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



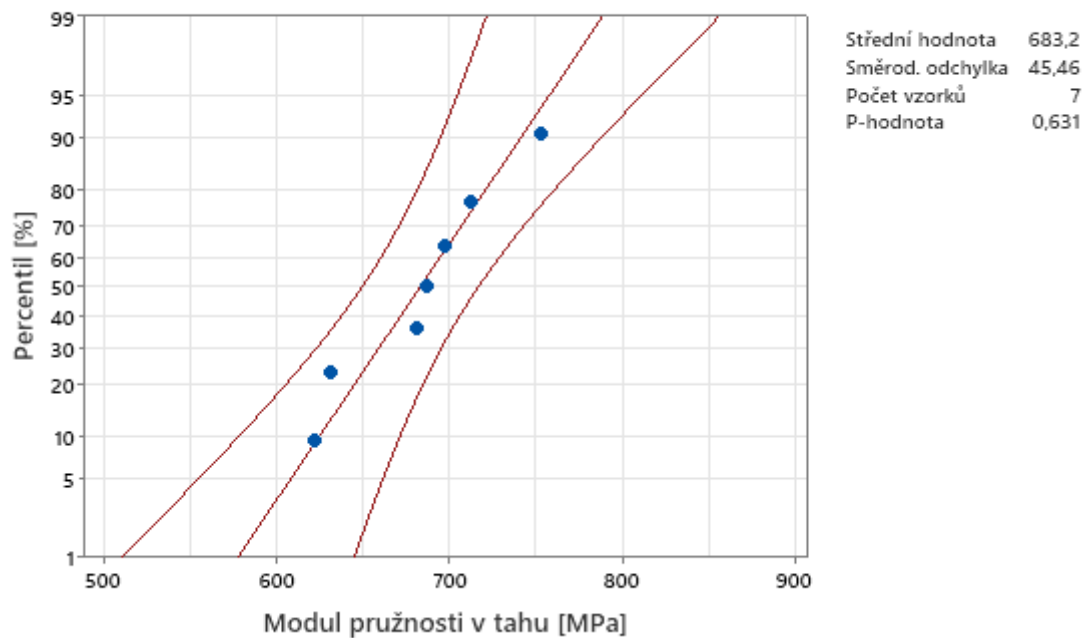
Modul pružnosti v tahu aditivního materiálu PLA



Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

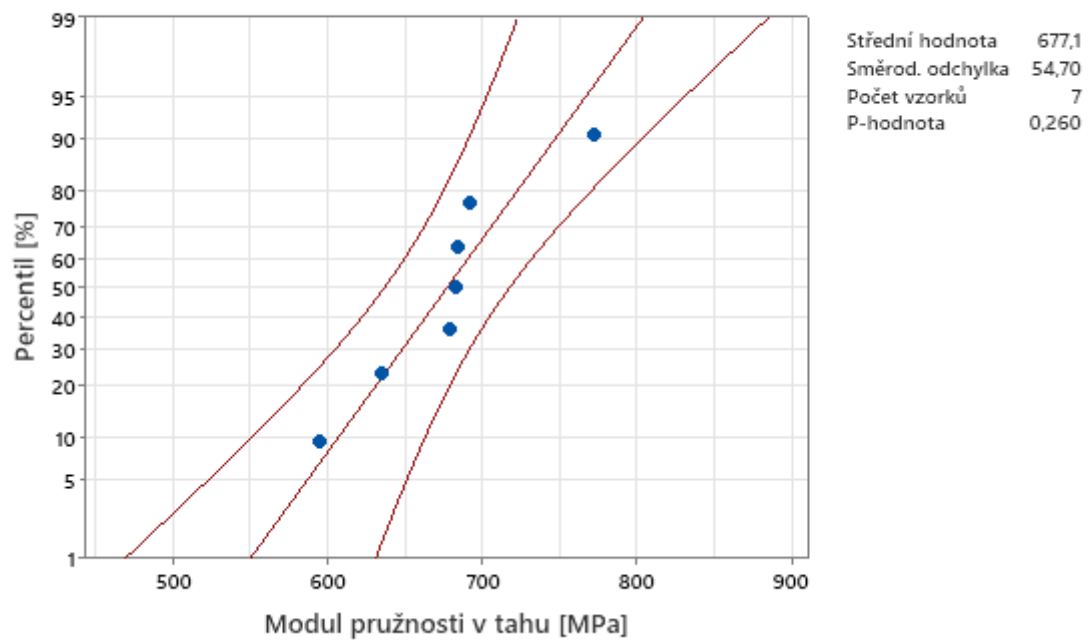


Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



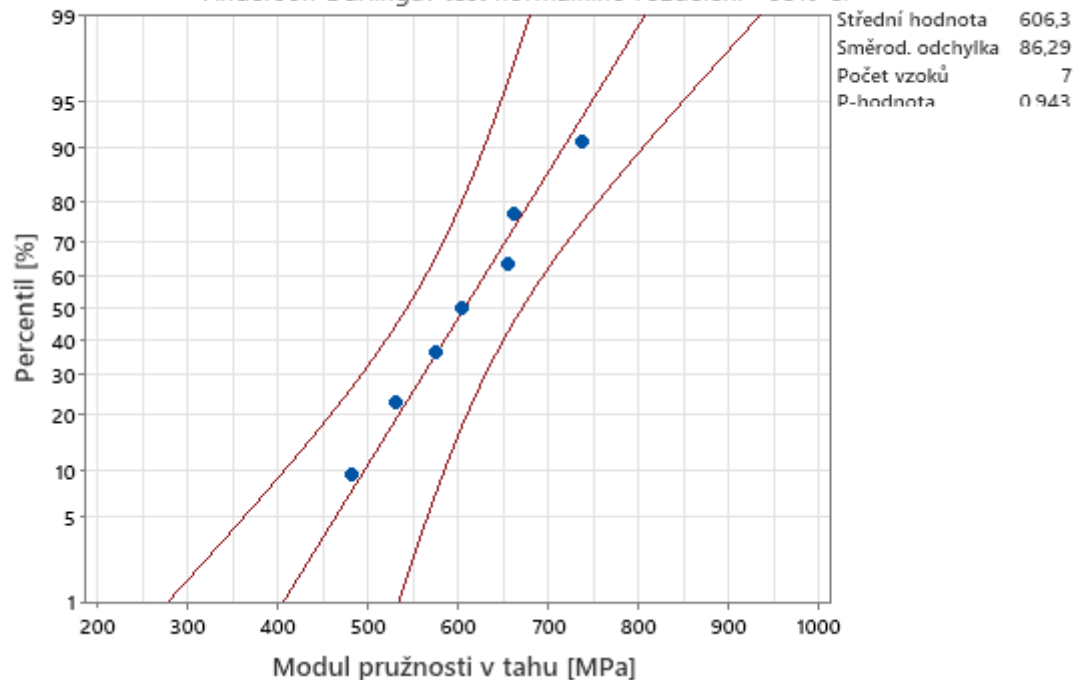
Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



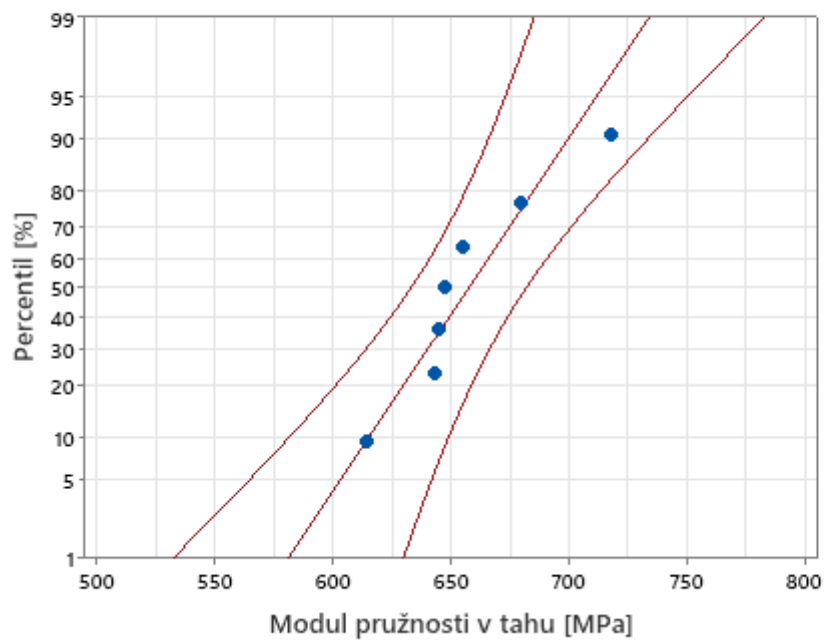
Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

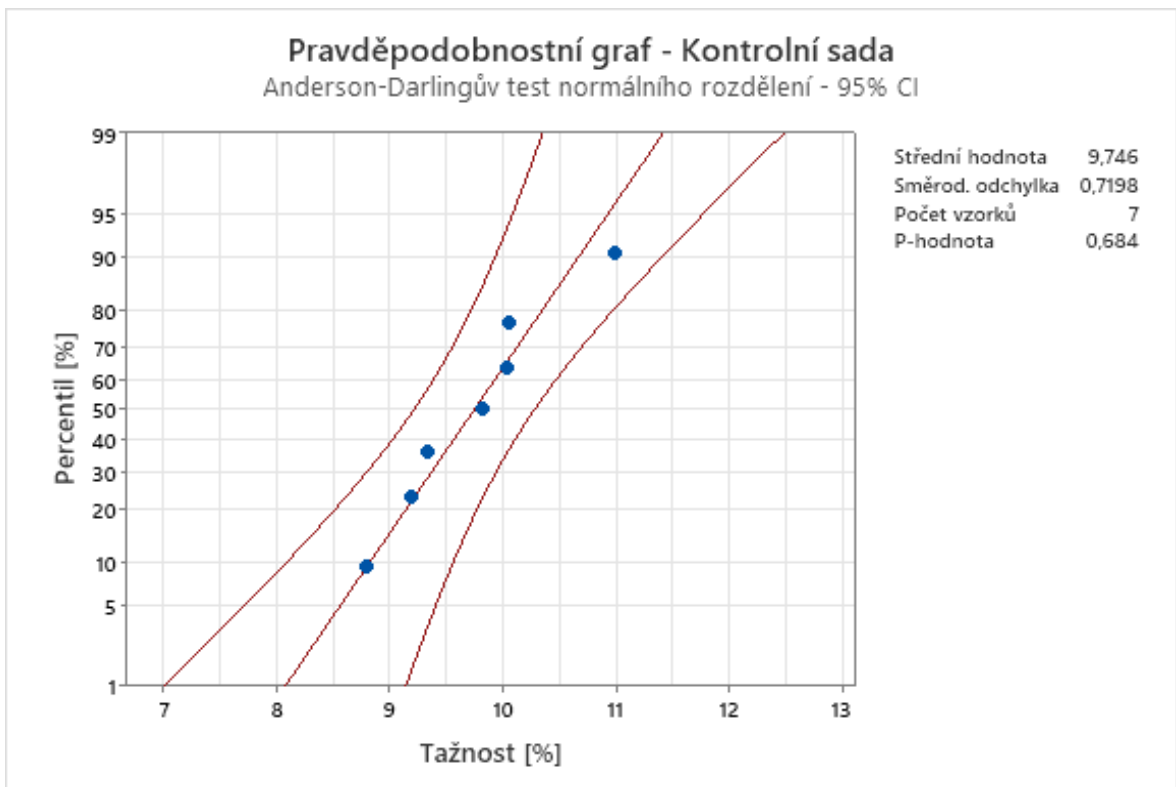
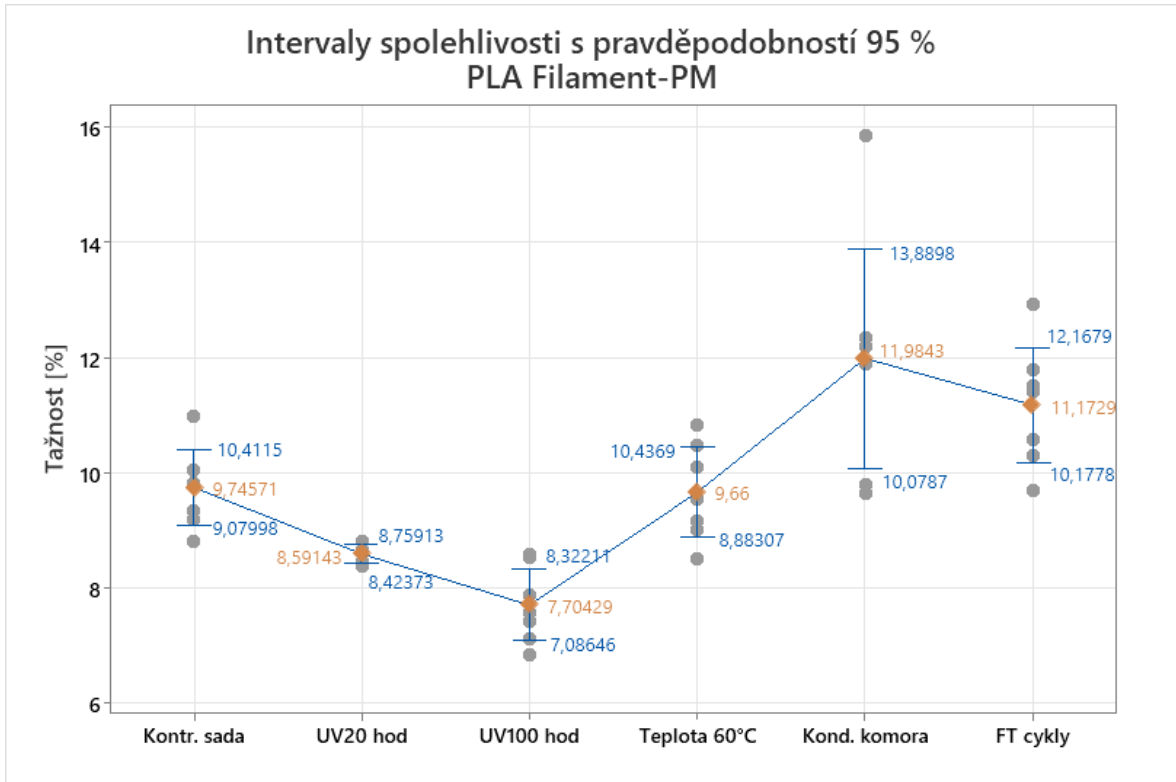


Pravděpodobnostní graf - FT cykly

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

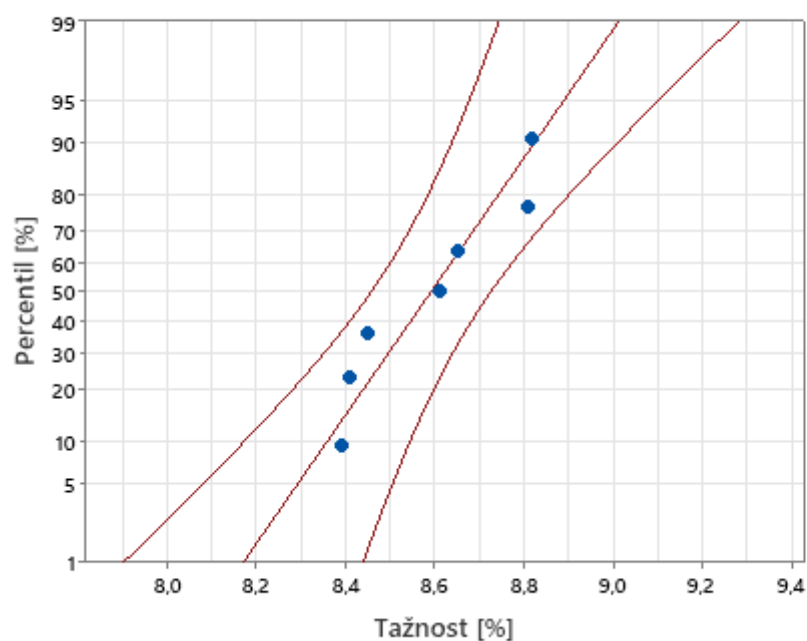


Tažnost aditivního materiálu PLA



Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin

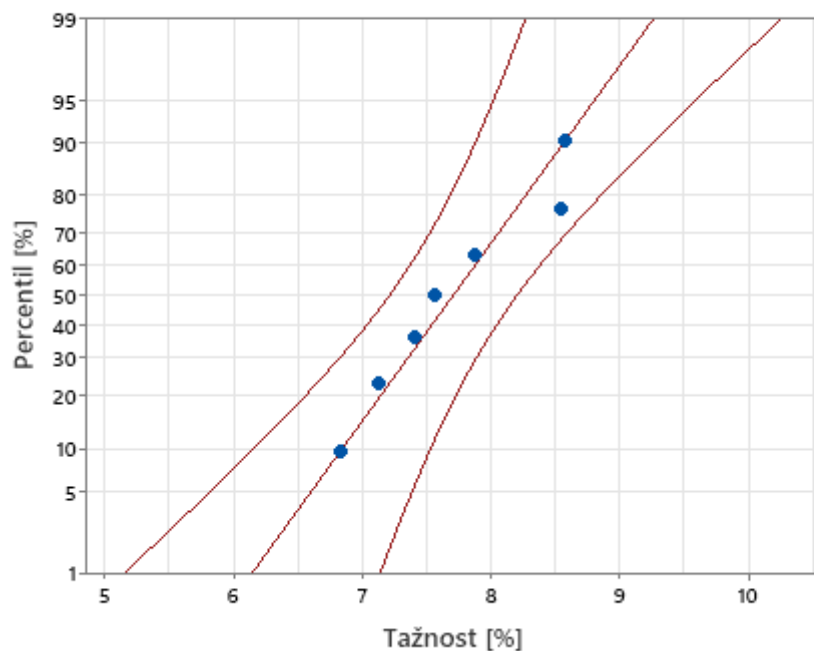
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 8,591
Směrod. odchylka 0,1813
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,325

Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin

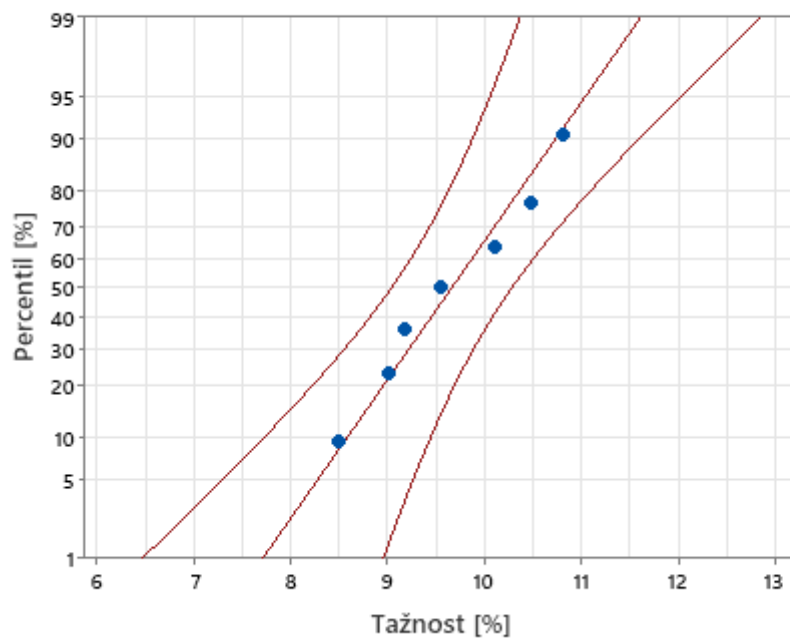
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 7,704
Směrod. odchylka 0,6680
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,602

Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

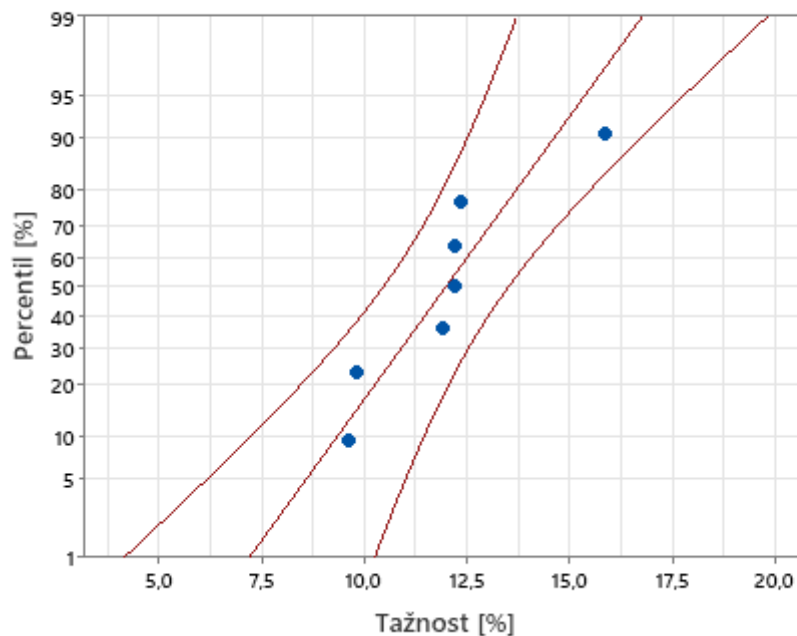
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 9,66
Směrod. odchylka 0,8401
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,872

Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

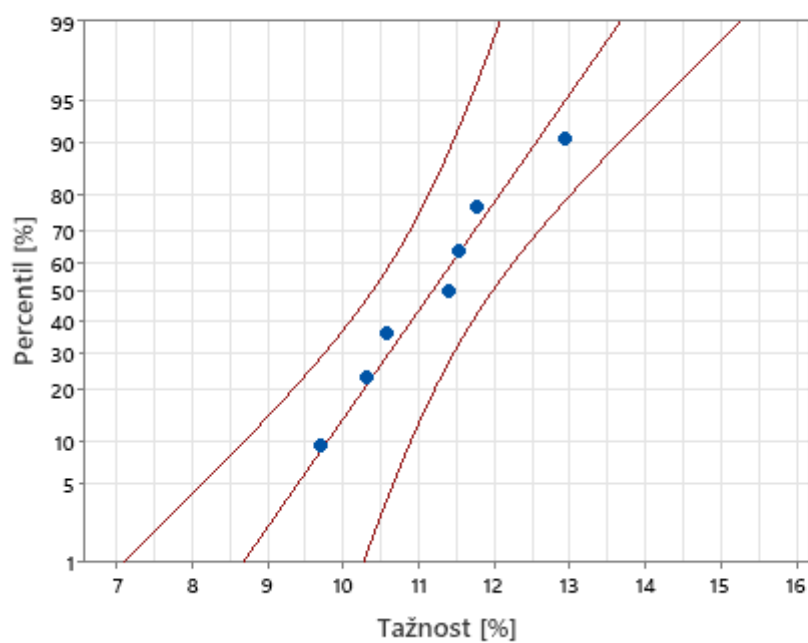
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 11,98
Směrod. odchylka 2,060
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,110

Pravděpodobnostní graf - FT cykly

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

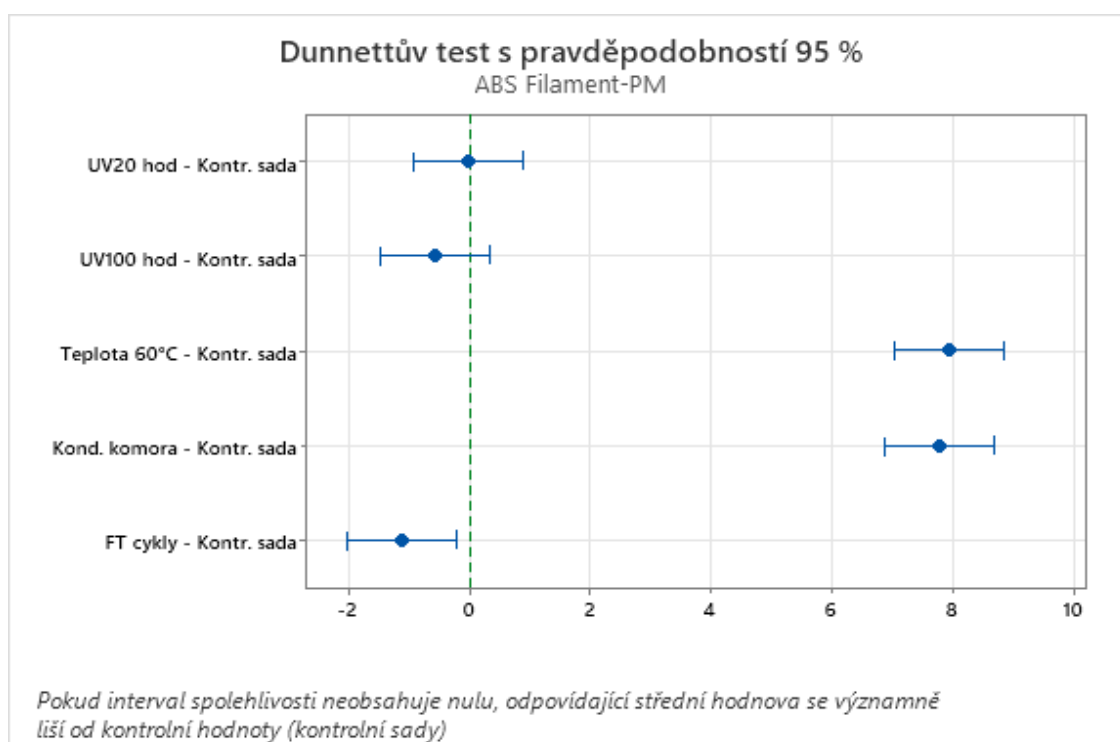


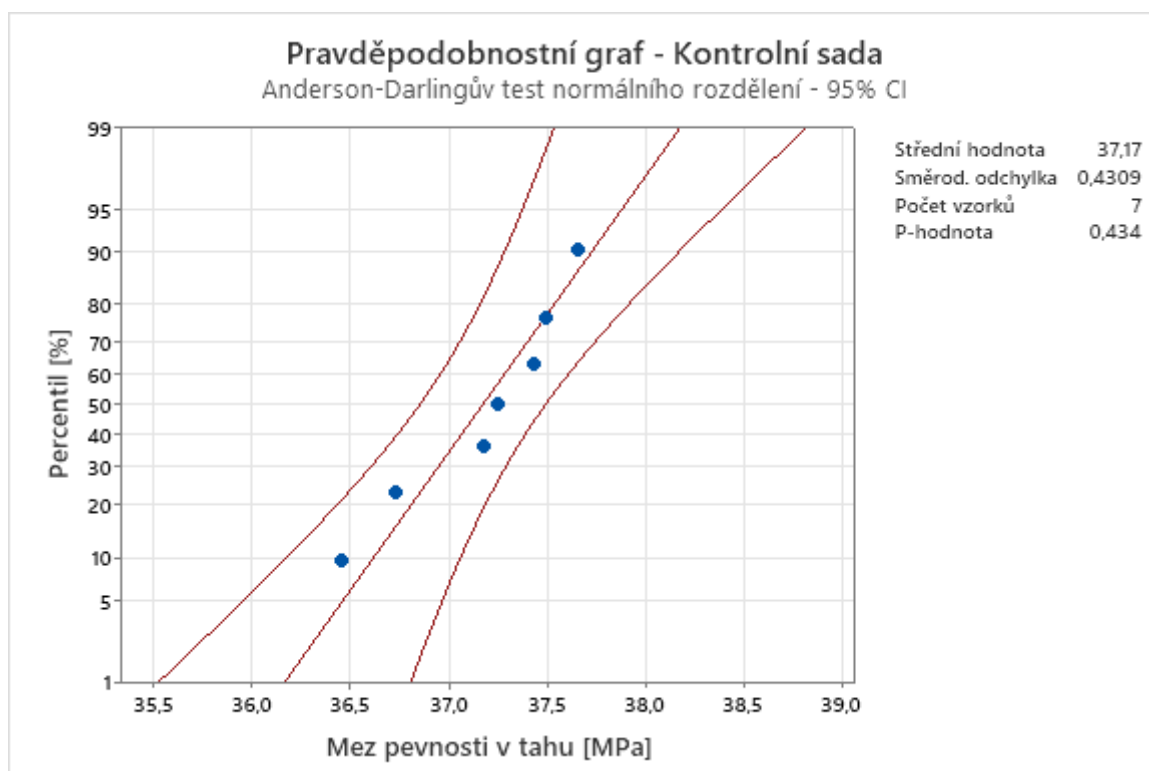
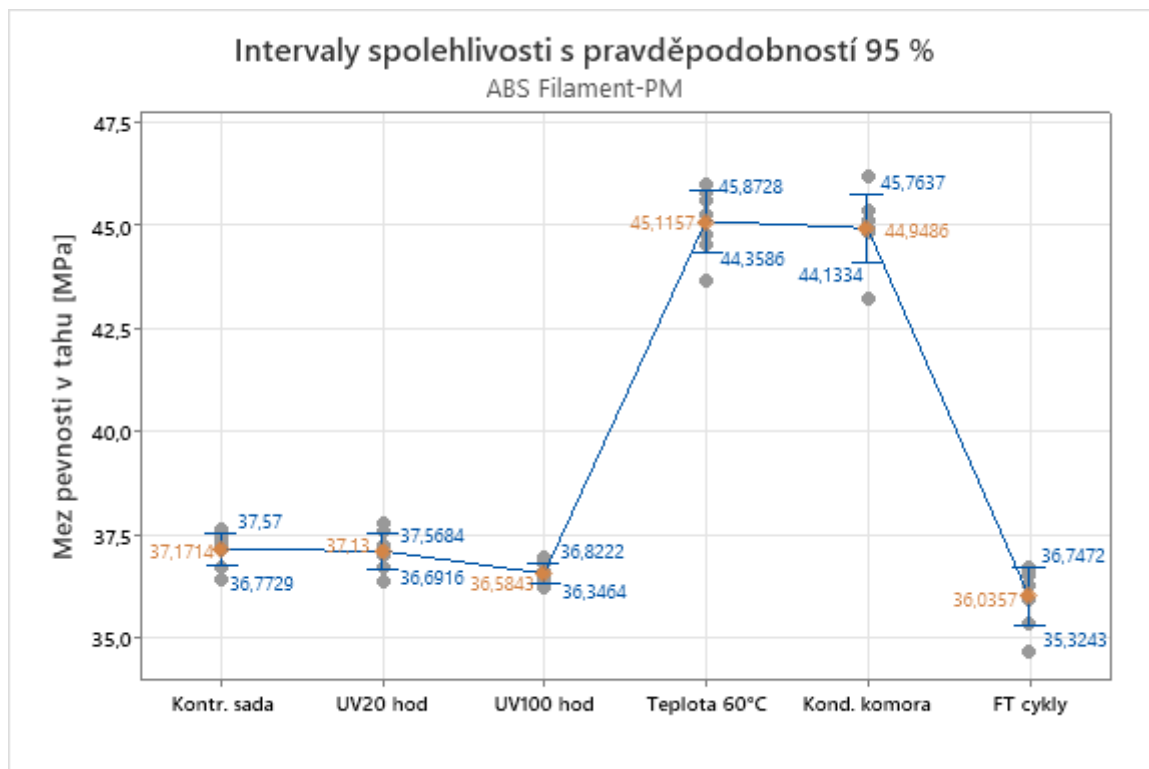
Střední hodnota	11,17
Směrod. odchylka	1,076
Počet vzorků	7
P-hodnota	0,837

PŘÍLOHA VI: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ PŮSOBNÍ DEGRADAČNÍCH FAKTORŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU ABS FILAMENT-PM

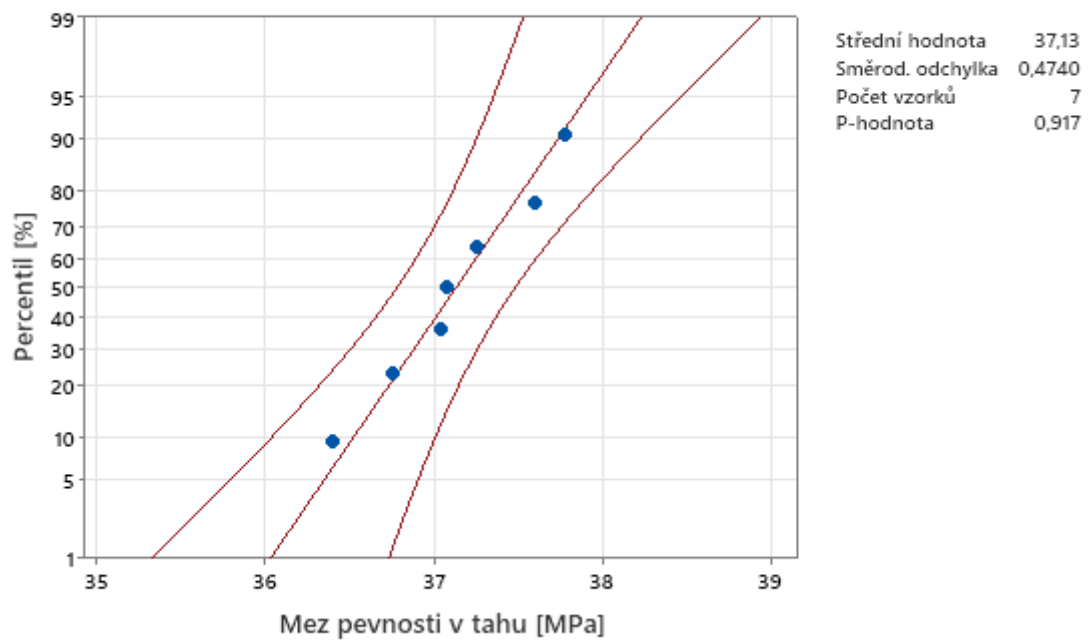
Mez pevnosti v tahu aditivního materiálu ABS

ABS – Mez pevnosti v tahu [MPa]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	37,171	0,431	0,186	36,46	37,66	0,434	[36,7729; 37,57]
UV 20 hod	37,13	0,474	0,225	36,4	37,78	0,917	[36,6916; 37,5684]
UV 100 hod	36,584	0,257	0,0662	36,26	36,97	0,805	[36,3464; 36,8222]
Výdrž na teplotě 60°C	45,116	0,819	0,67	43,69	46,01	0,638	[44,3586; 45,8728]
Kondenzační komora	44,949	0,881	0,777	43,25	46,19	0,106	[44,1334; 45,7637]
FT cykly	36,036	0,769	0,592	34,68	36,74	0,274	[35,3243; 36,7472]

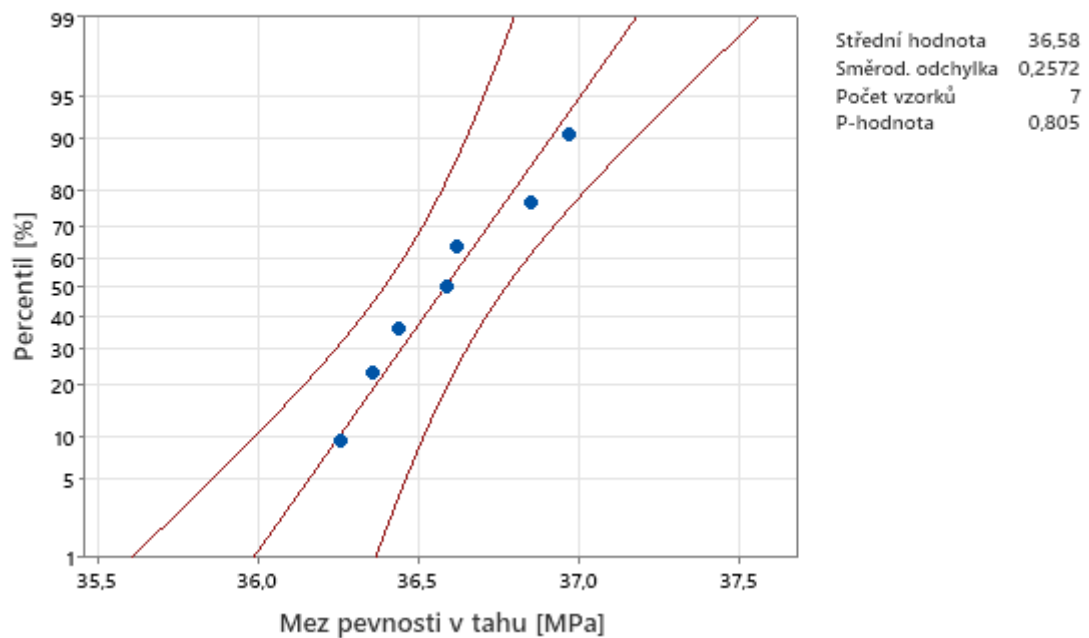




Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

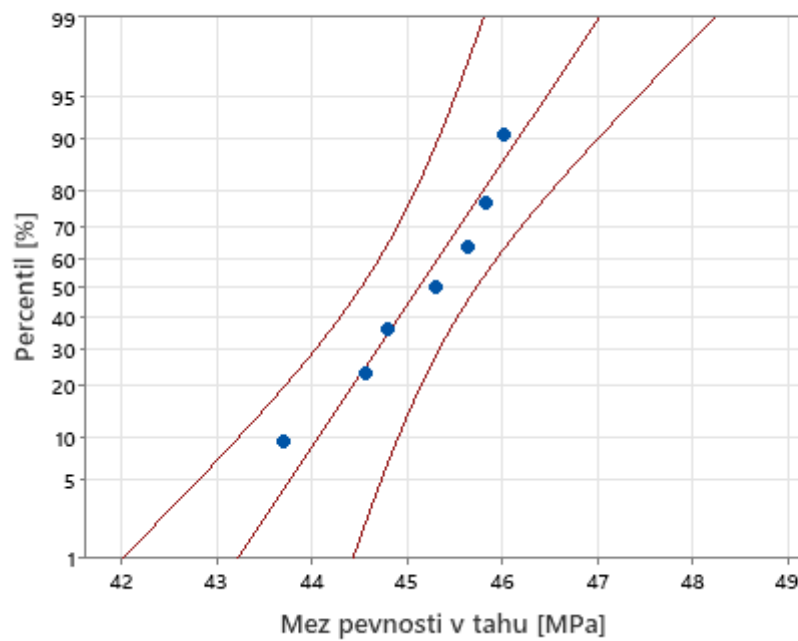


Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



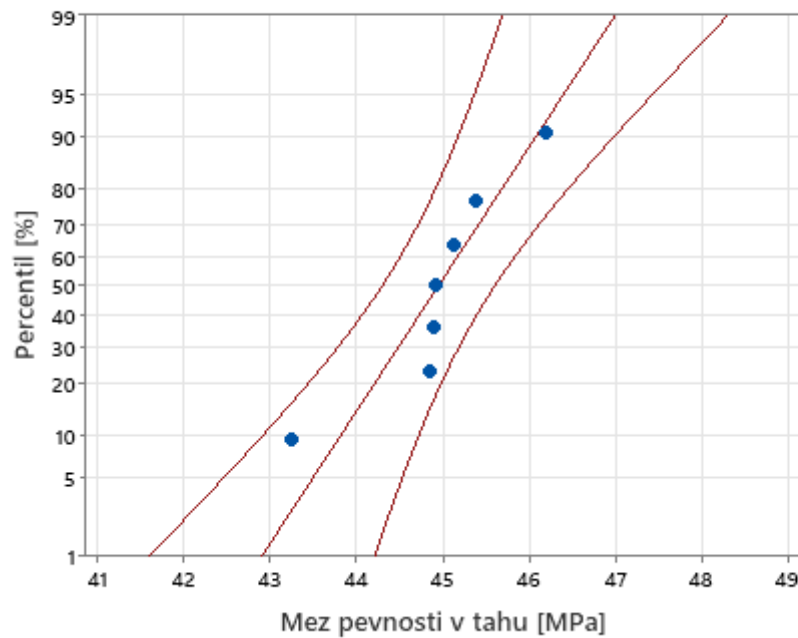
Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



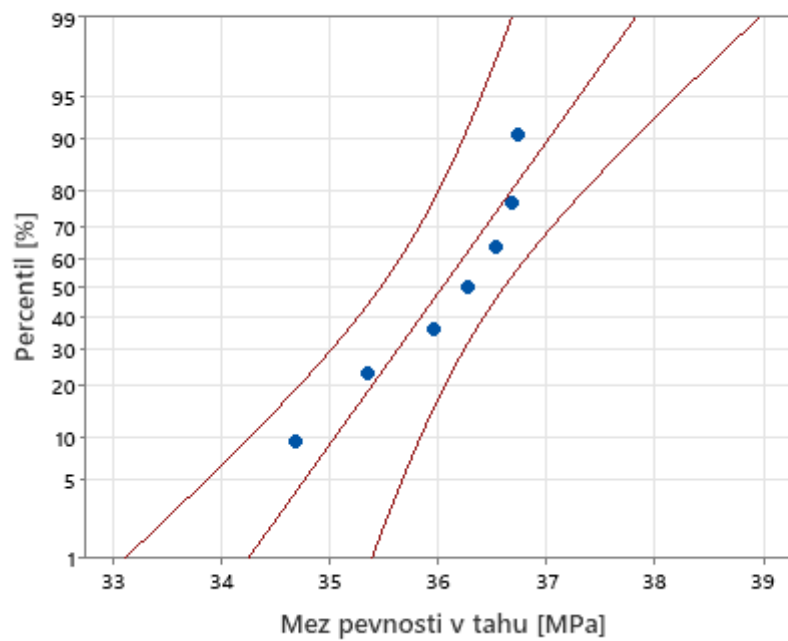
Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - FT cykly

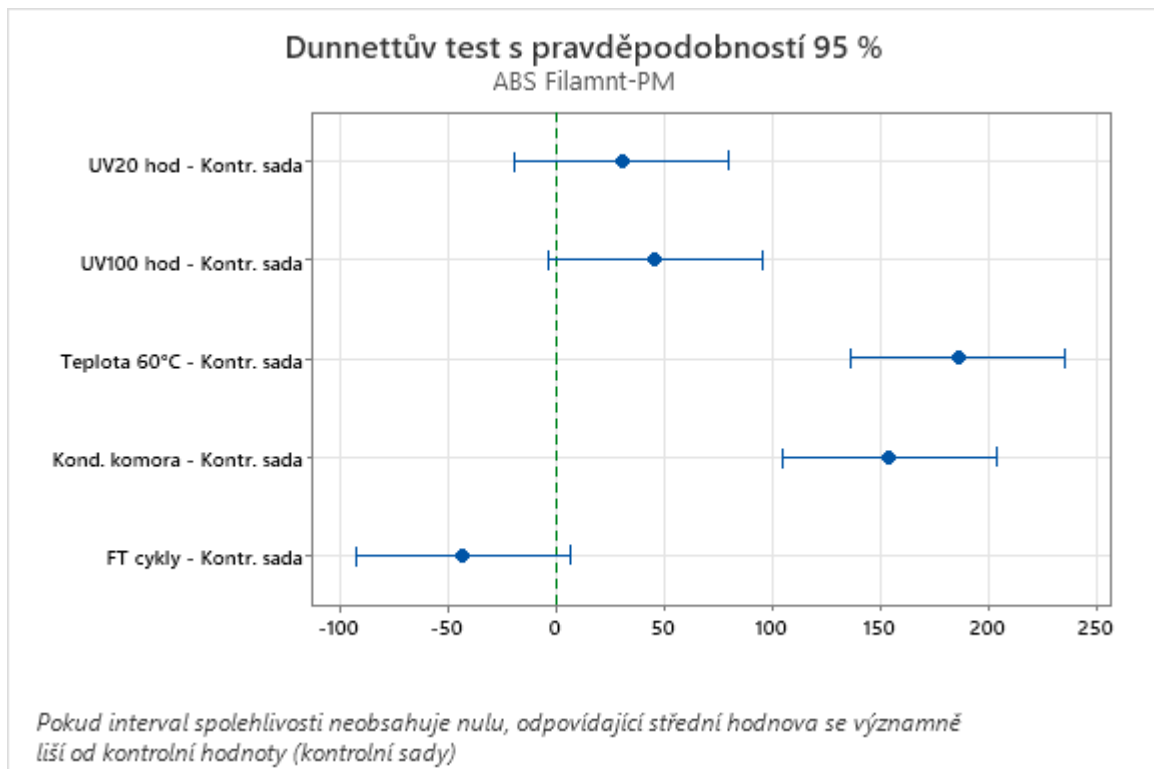
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

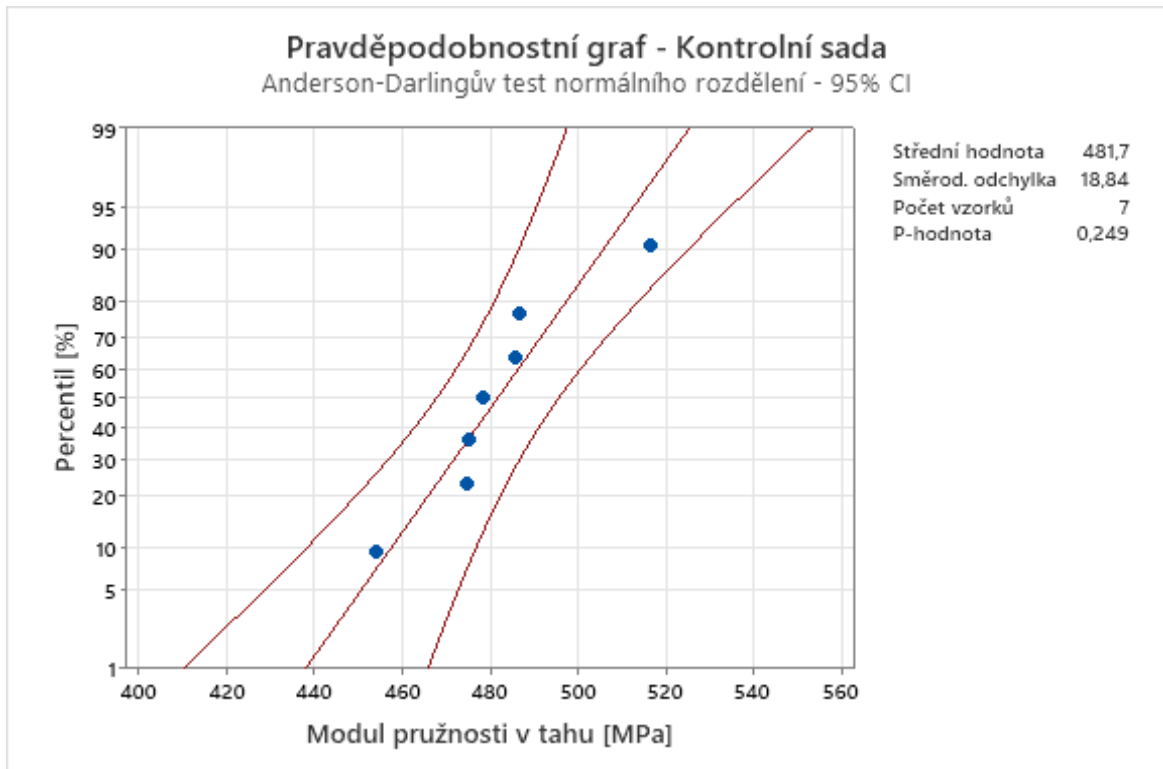
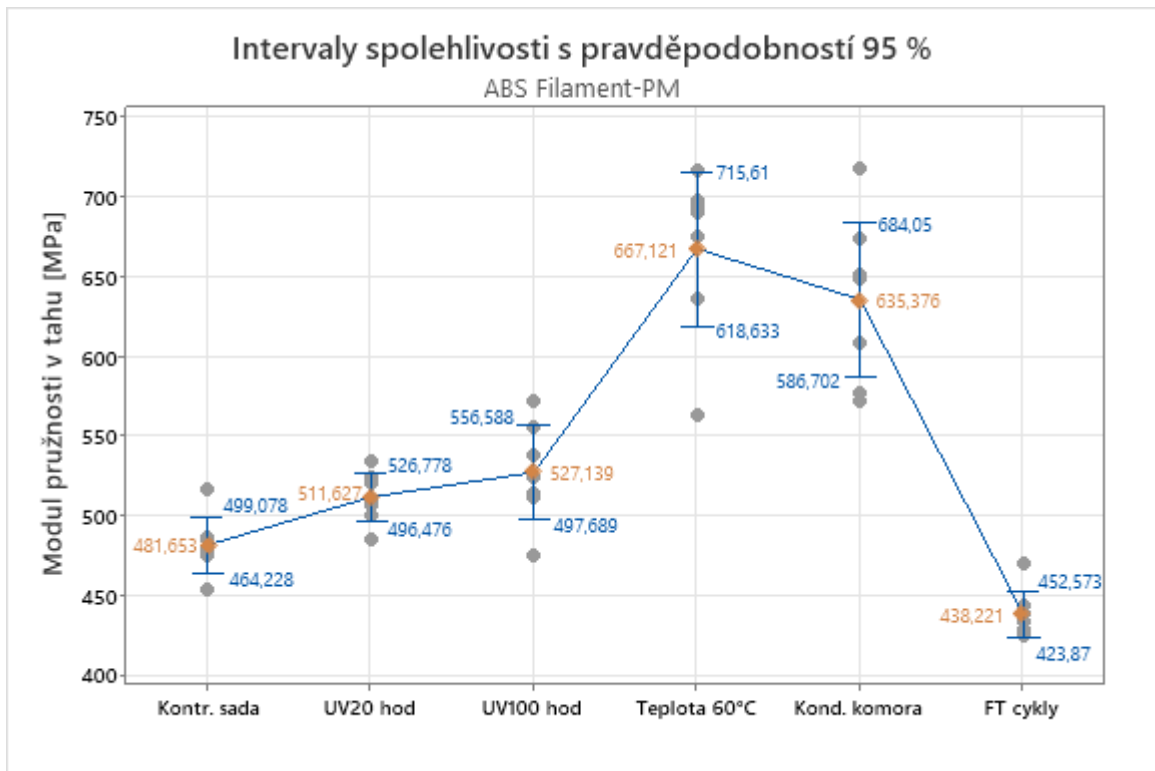


Střední hodnota	36,04
Směrod. odchylka	0,7693
Počet vzorků	7
P-hodnota	0,274

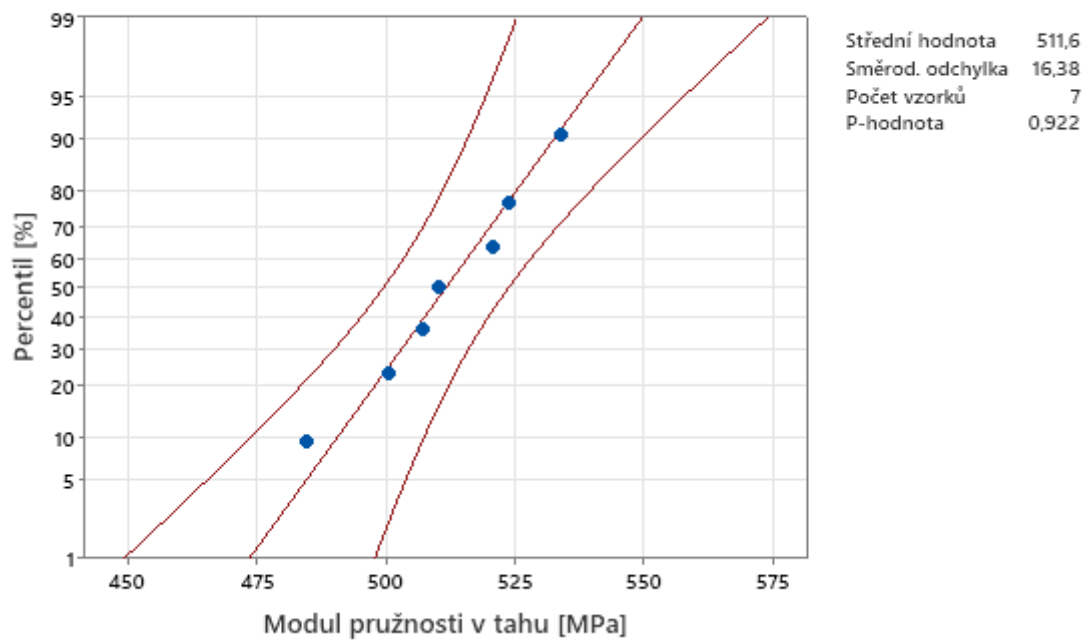
Modul pružnosti v tahu aditivního materiálu ABS

ABS – Modul pružnosti v tahu [MPa]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	481,65	18,84	354,99	453,99	516,59	0,249	[464,228; 499,078]
UV 20 hod	511,63	16,38	268,37	484,6	533,99	0,922	[496,476; 526,778]
UV 100 hod	527,1	31,8	1014	475,1	572,1	0,883	[497,689; 556,588]
Výdrž na teplotě 60°C	667,1	52,4	2748,7	562,8	716,5	0,076	[618,633; 715,61]
Kondenzační komora	635,4	52,6	2769,8	572,4	717	0,703	[586,702; 684,05]
FT cykly	438,22	15,52	240,81	425,35	470,08	0,078	[423,87; 452,573]

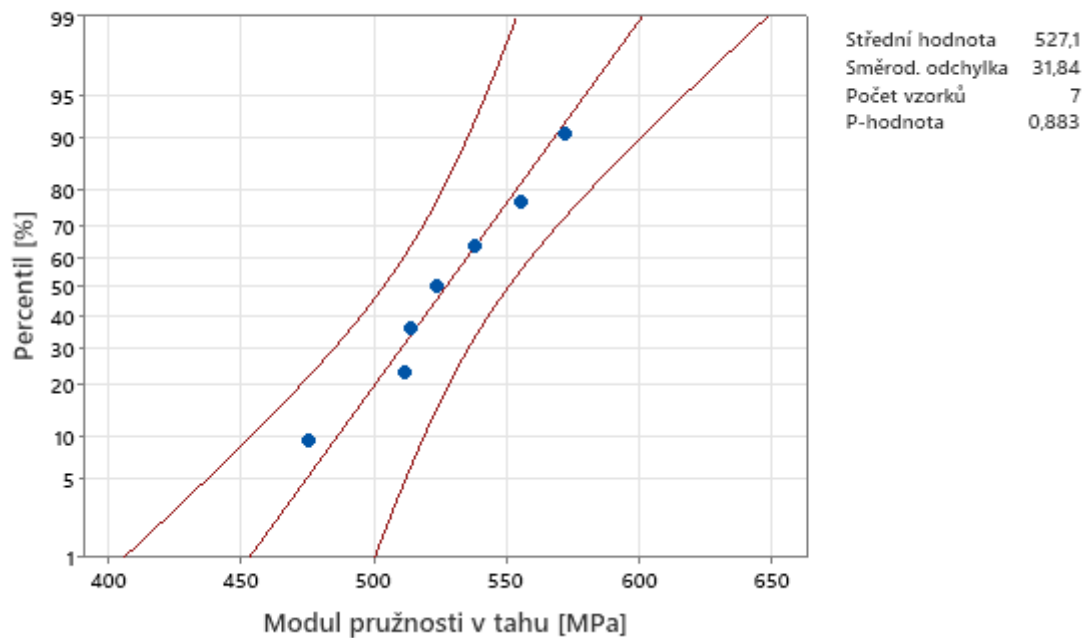




Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

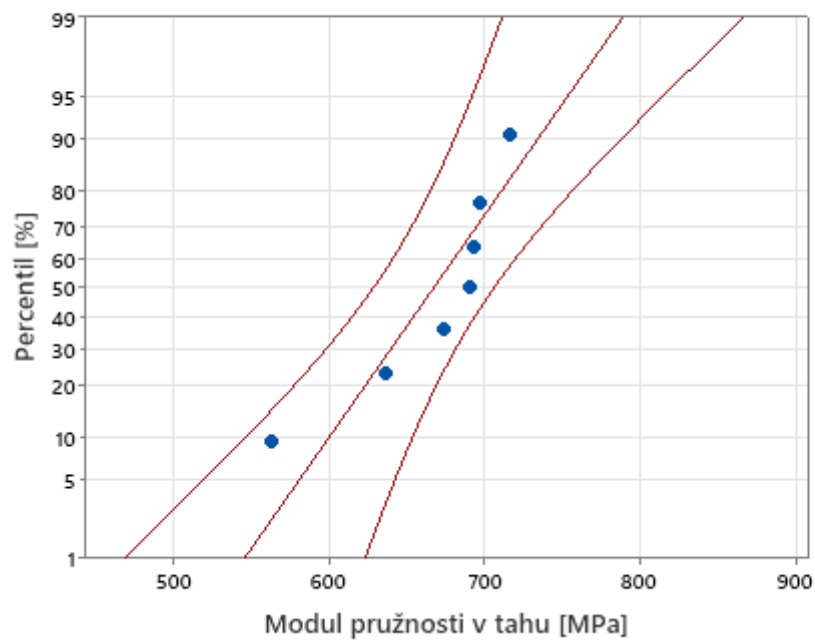


Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



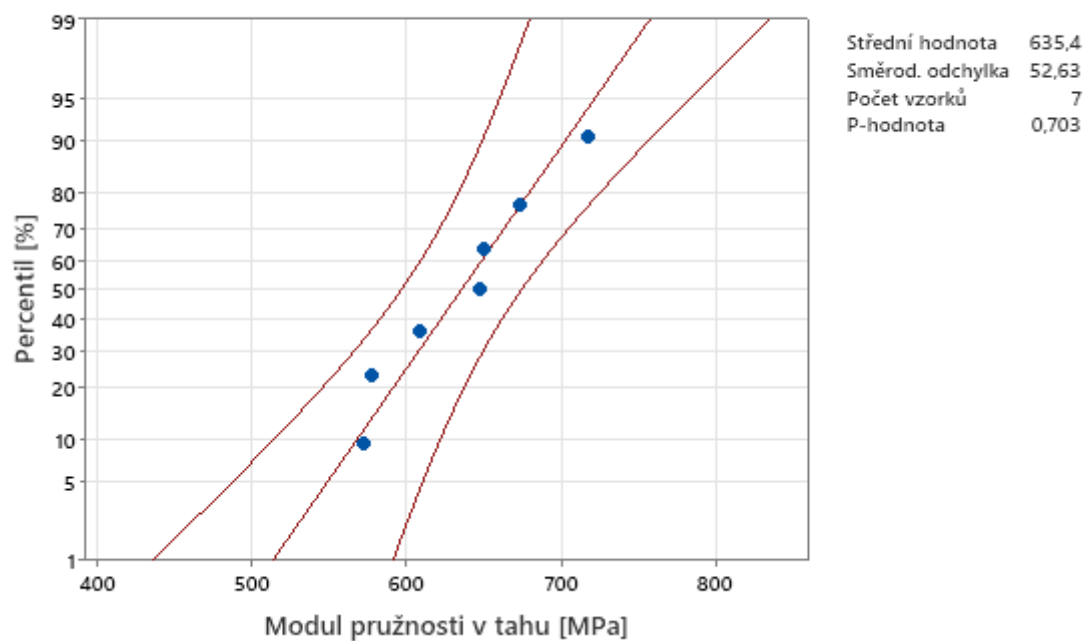
Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



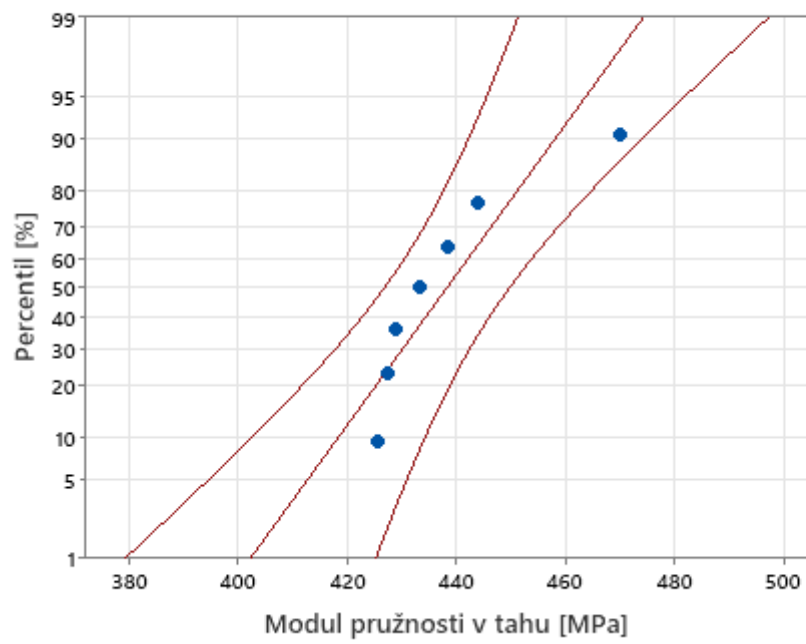
Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



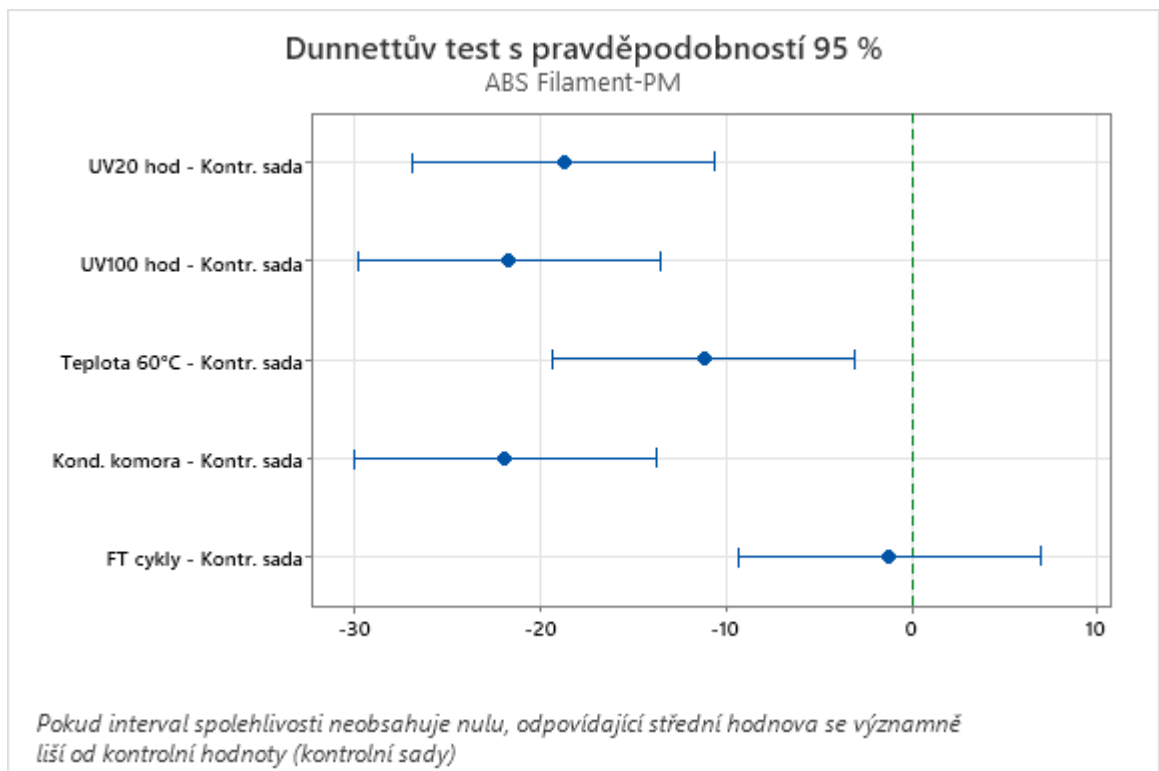
Pravděpodobnostní graf - FT cykly

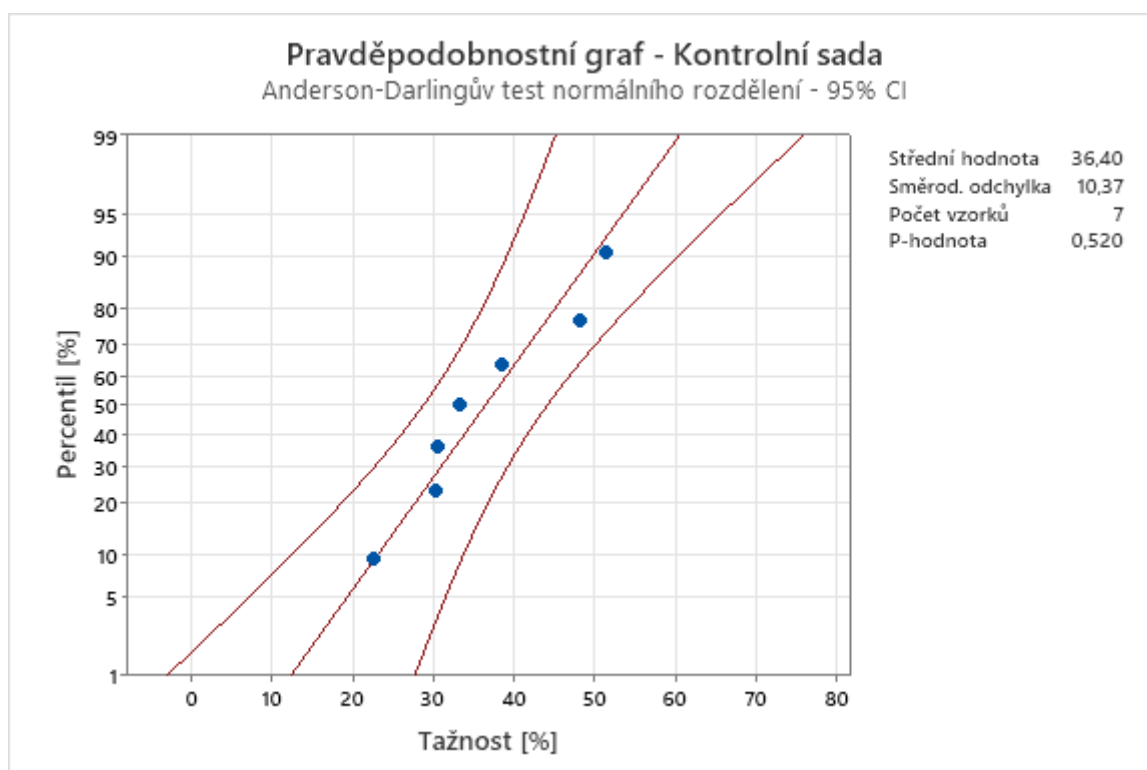
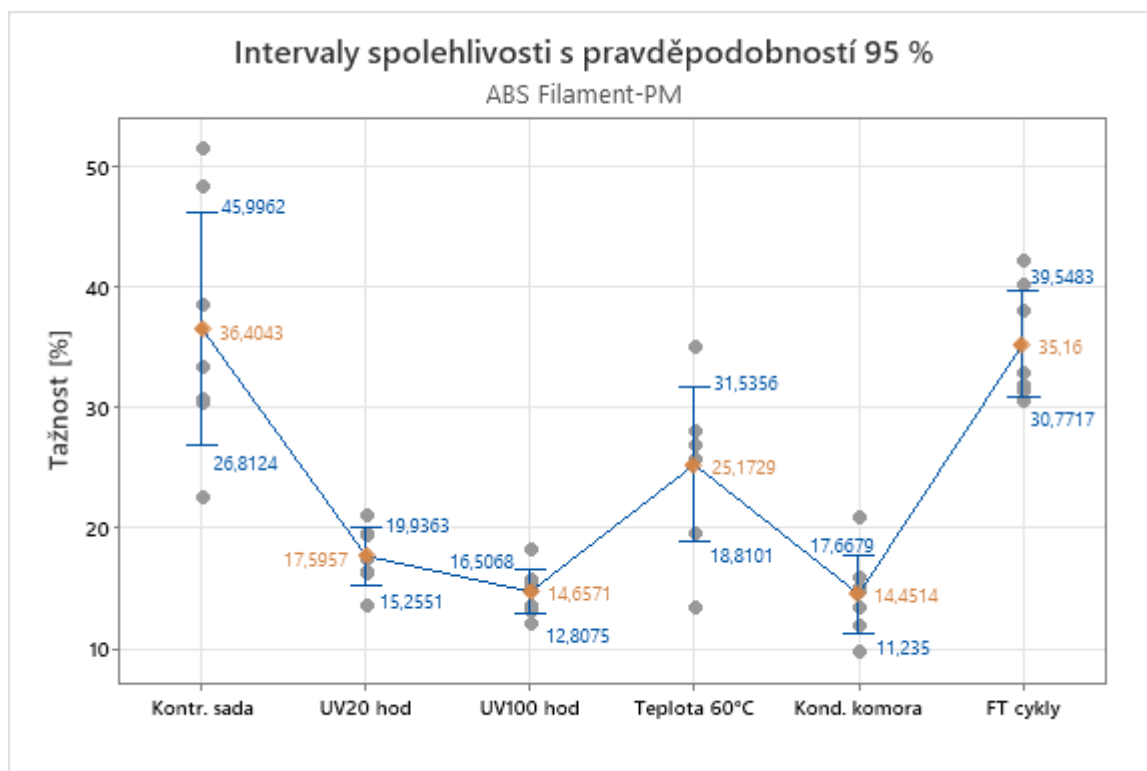
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Tažnost aditivního materiál ABS

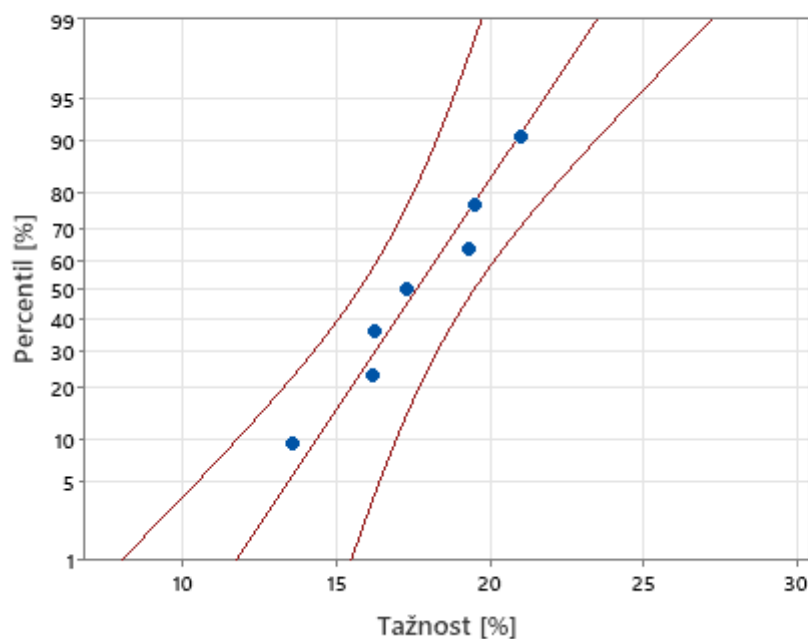
ABS – Tažnost [%]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	36,4	10,37	107,56	22,47	51,42	0,52	[26,8124; 45,9962]
UV 20 hod	17,596	2,531	6,405	13,58	21,03	0,754	[15,2551; 19,9363]
UV 100 hod	14,657	2	4	12,1	18,13	0,786	[12,8075; 16,5068]
Výdrž na teplotě 60°C	25,17	6,88	47,33	13,41	34,91	0,361	[18,8101; 31,5356]
Kondenzační komora	14,45	3,48	12,1	9,63	20,76	0,586	[11,235; 17,6679]
FT cykly	35,16	4,74	22,51	30,38	42,02	0,176	[30,7717; 39,5483]





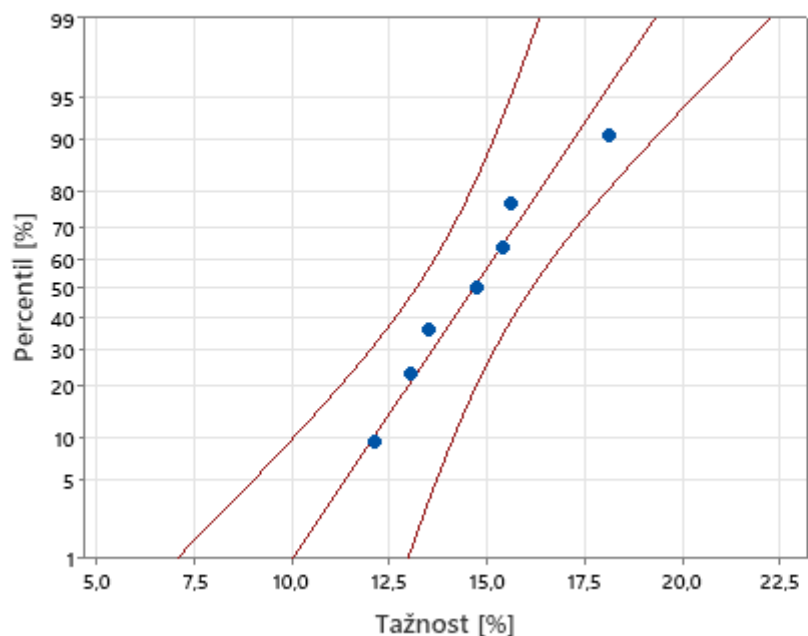
Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



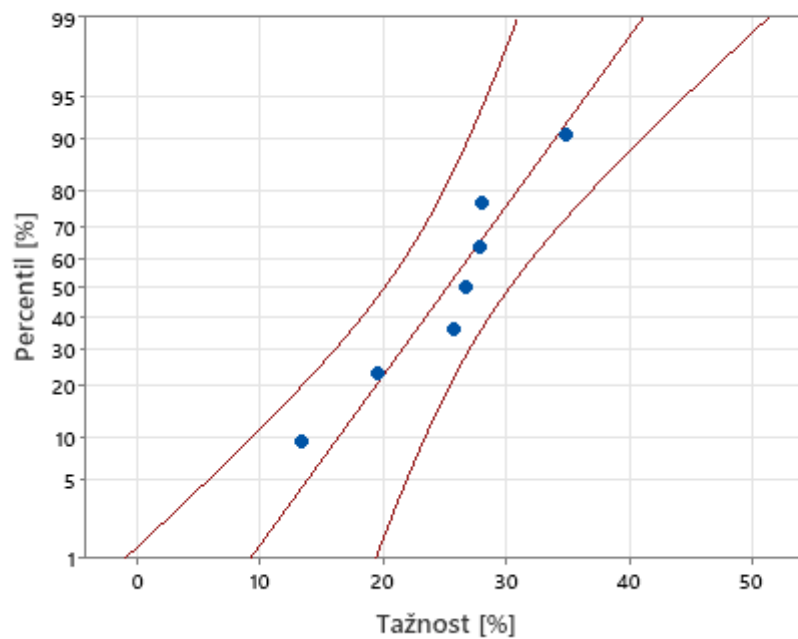
Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

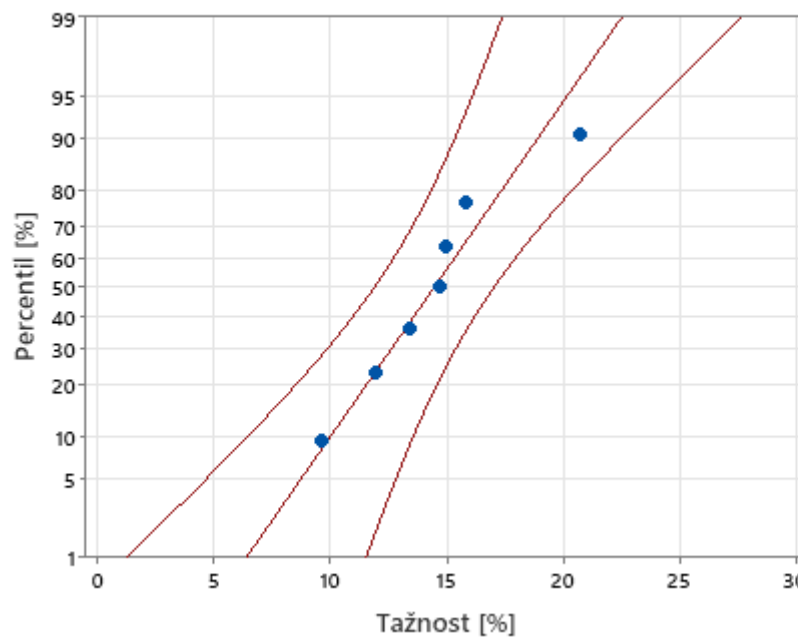
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 25,17
Směrod. odchylka 6,880
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,361

Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

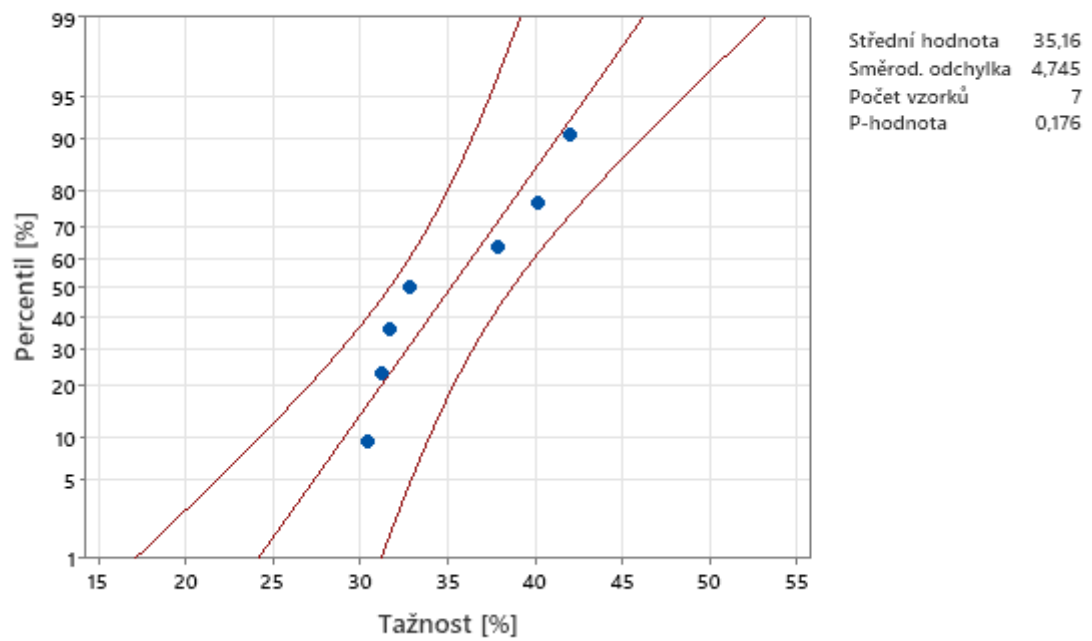
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 14,45
Směrod. odchylka 3,478
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,586

Pravděpodobnostní graf - FT cykly

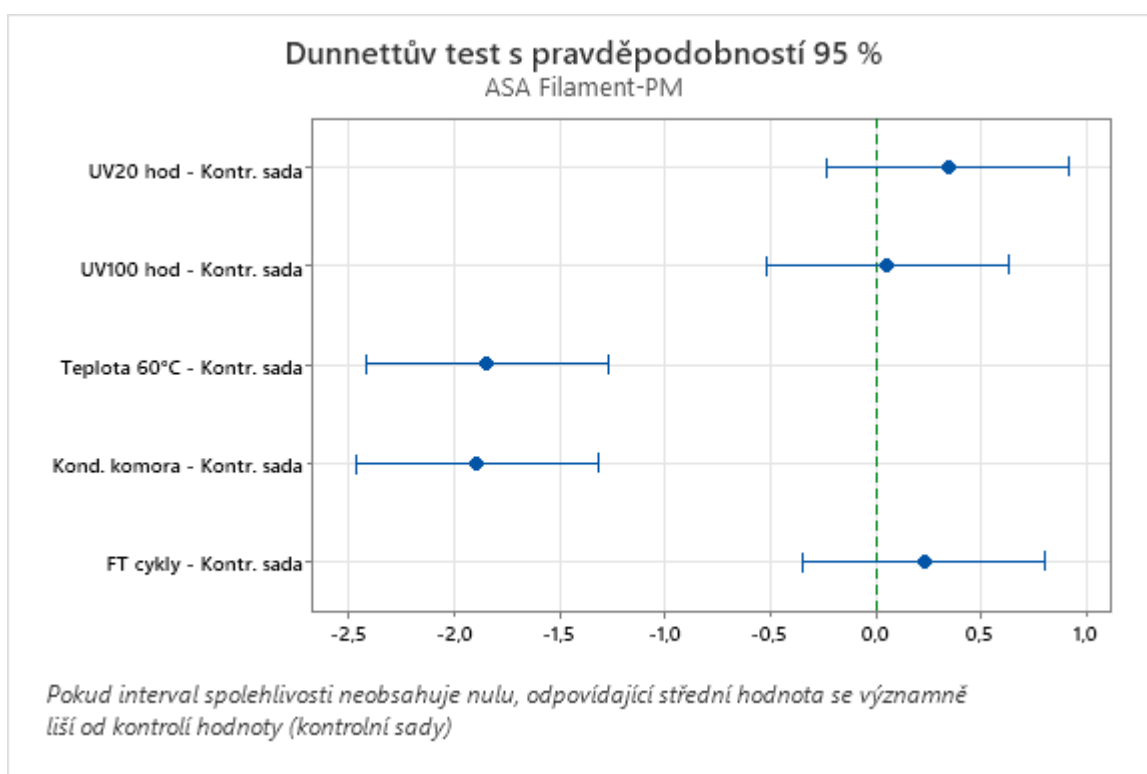
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

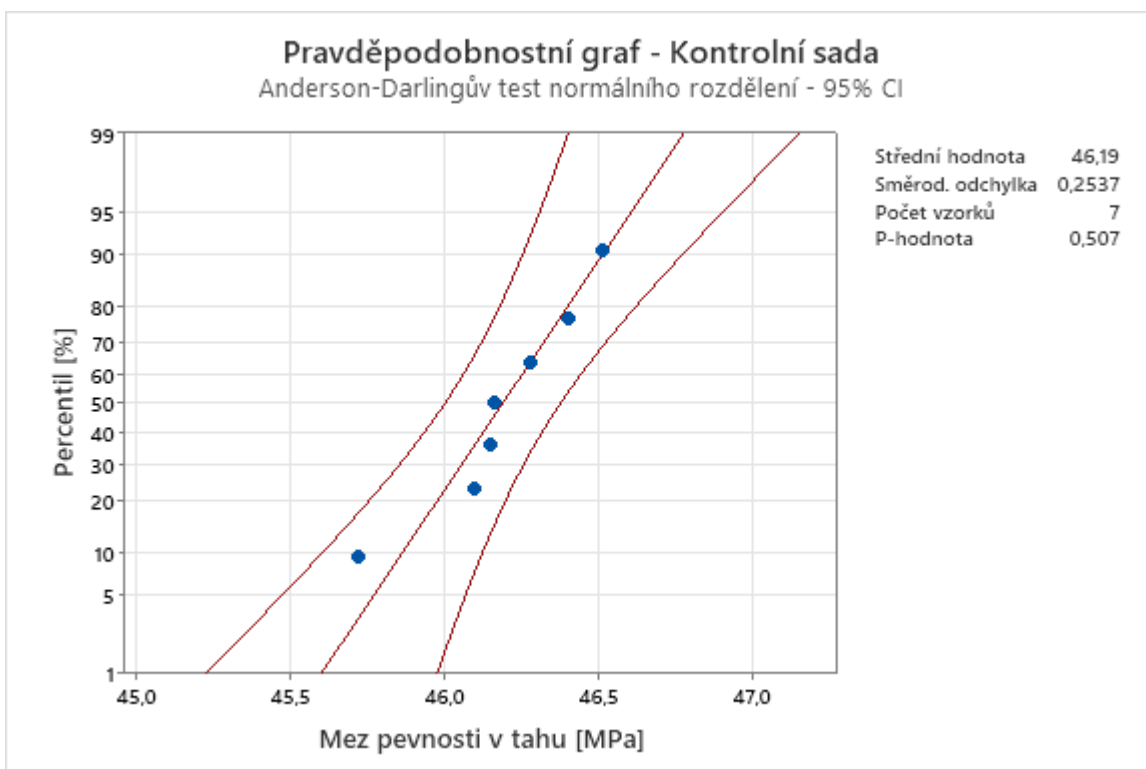
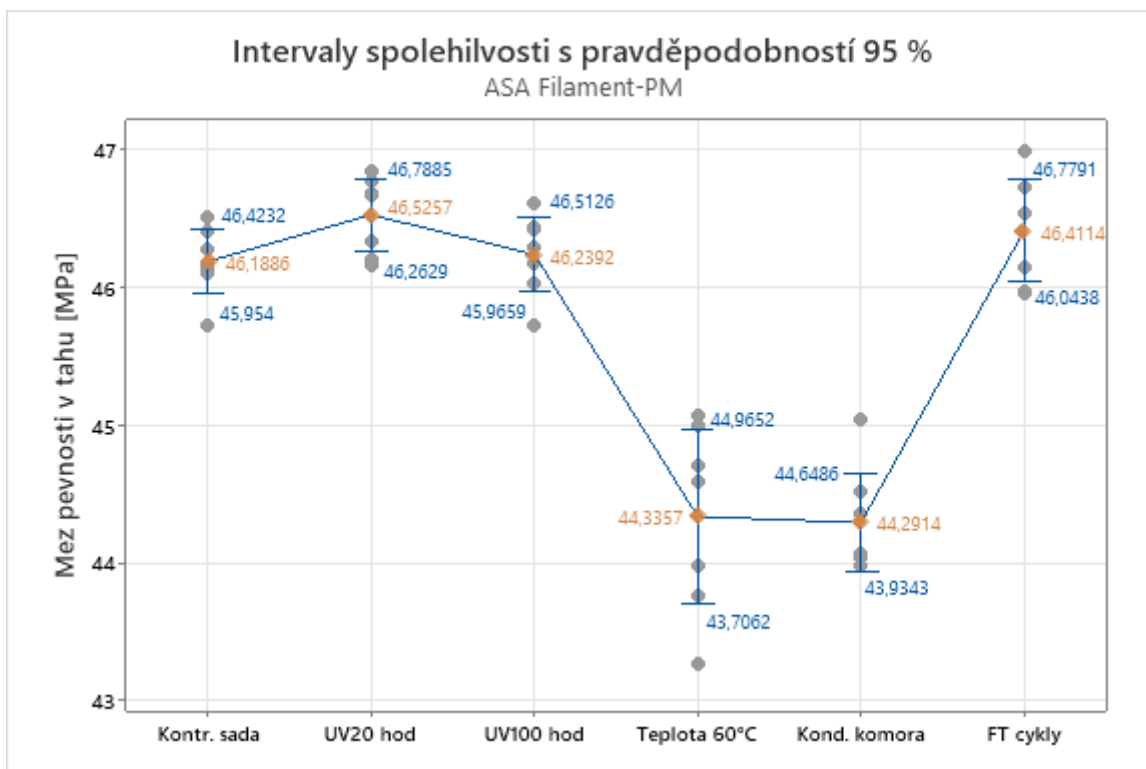


PŘÍLOHA VII: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ PŮSOBENÍ DEGRADAČNÍCH FAKTORŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU ABS FILAMENT-PM

Mez pevnosti v tahu aditivního materiálu ASA

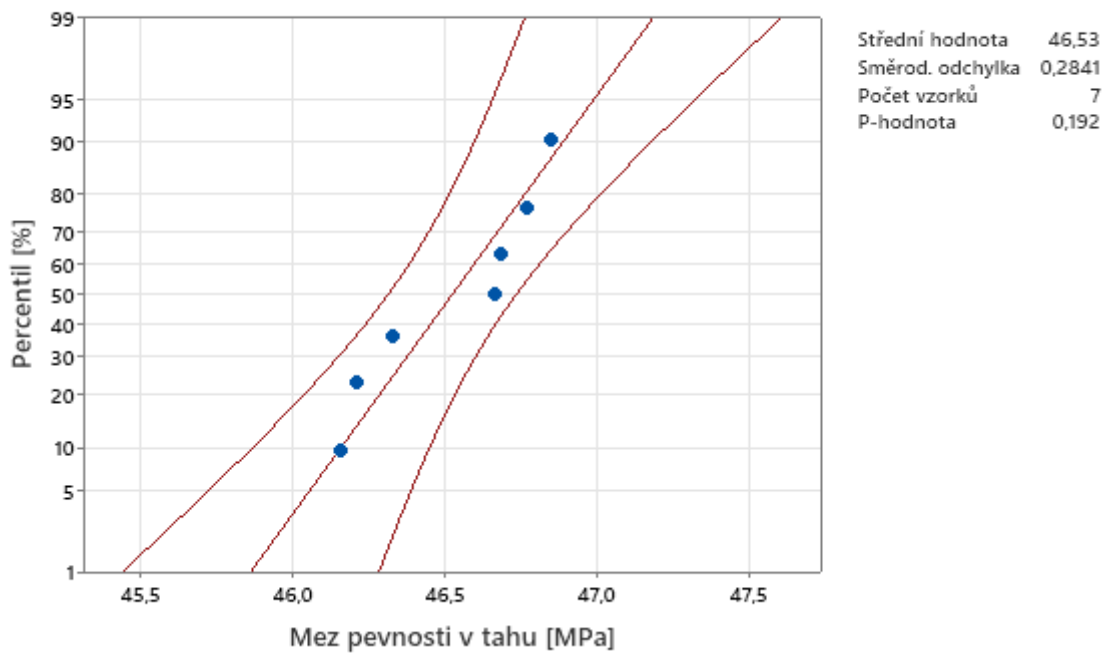
ASA – Mez pevnosti v tahu [MPa]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	46,189	0,254	0,0643	45,72	46,51	0,507	[45,954; 46,4232]
UV 20 hod	46,526	0,284	0,081	46,16	46,85	0,192	[46,2629; 56,7885]
UV 100 hod	46,239	0,296	0,087	45,72	46,606	0,762	[45,9659; 56,5126]
Výdrž na teplotě 60°C	44,336	0,681	0,463	43,26	45,07	0,512	[43,7062; 44,9652]
Kondenzační komora	44,291	0,386	0,0149	43,98	45,04	0,067	[43,9343; 44,6486]
FT cykly	46,411	0,398	0,158	45,95	46,99	0,495	[46,0438; 46,7791]





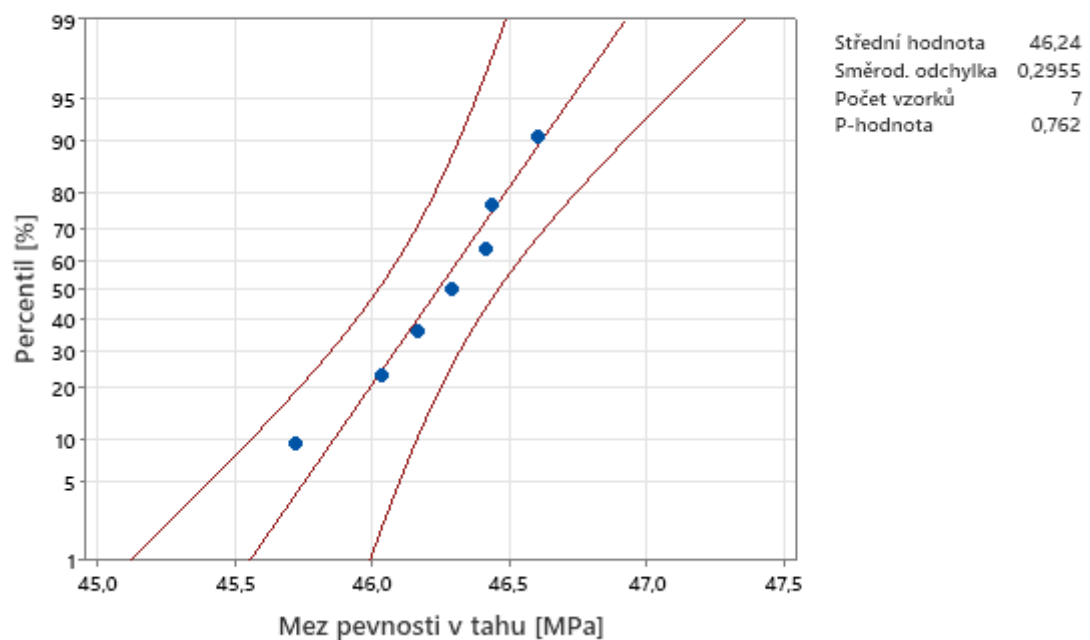
Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



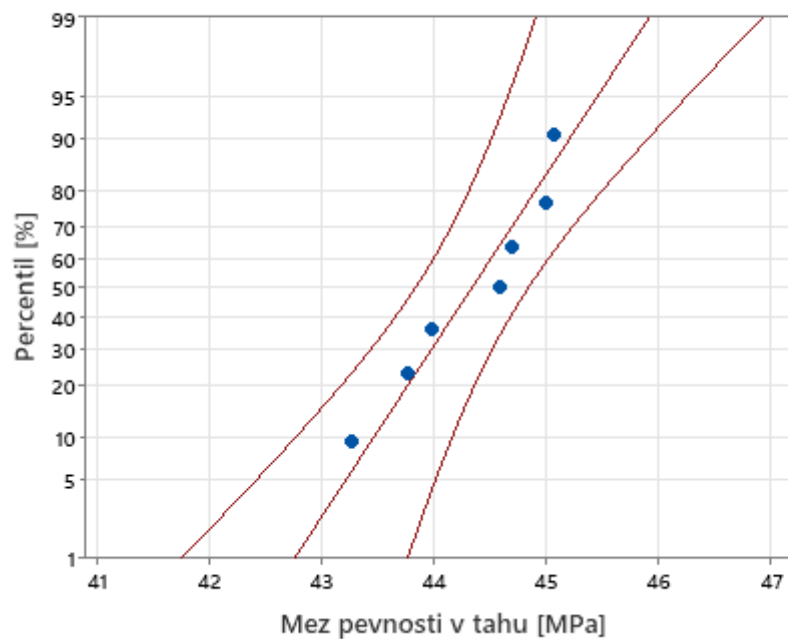
Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

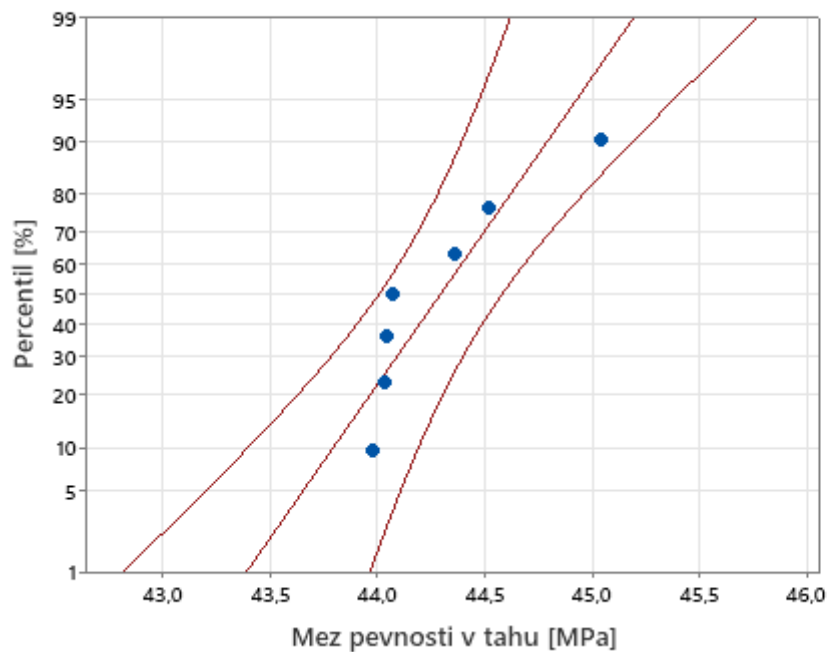
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 44,34
Směrod. odchylka 0,6807
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,512

Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

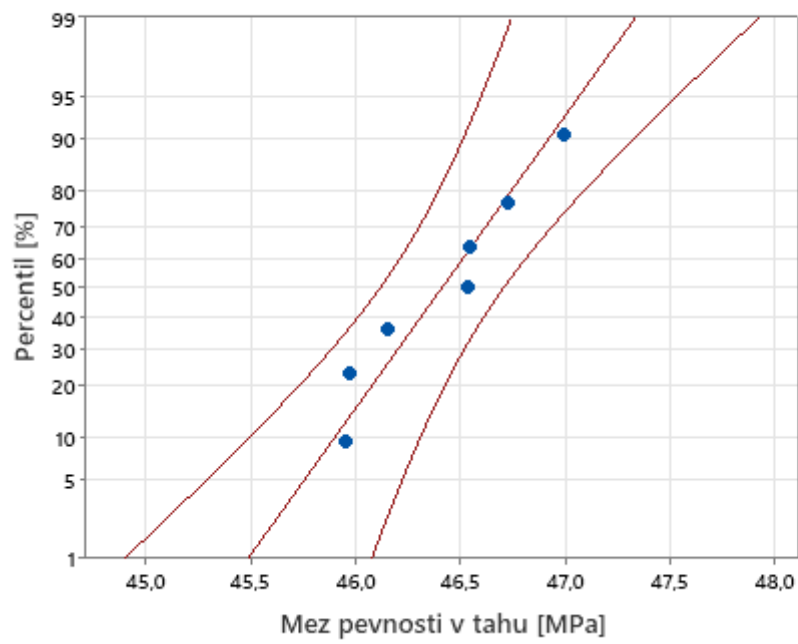
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 44,29
Směrod. odchylka 0,3862
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,067

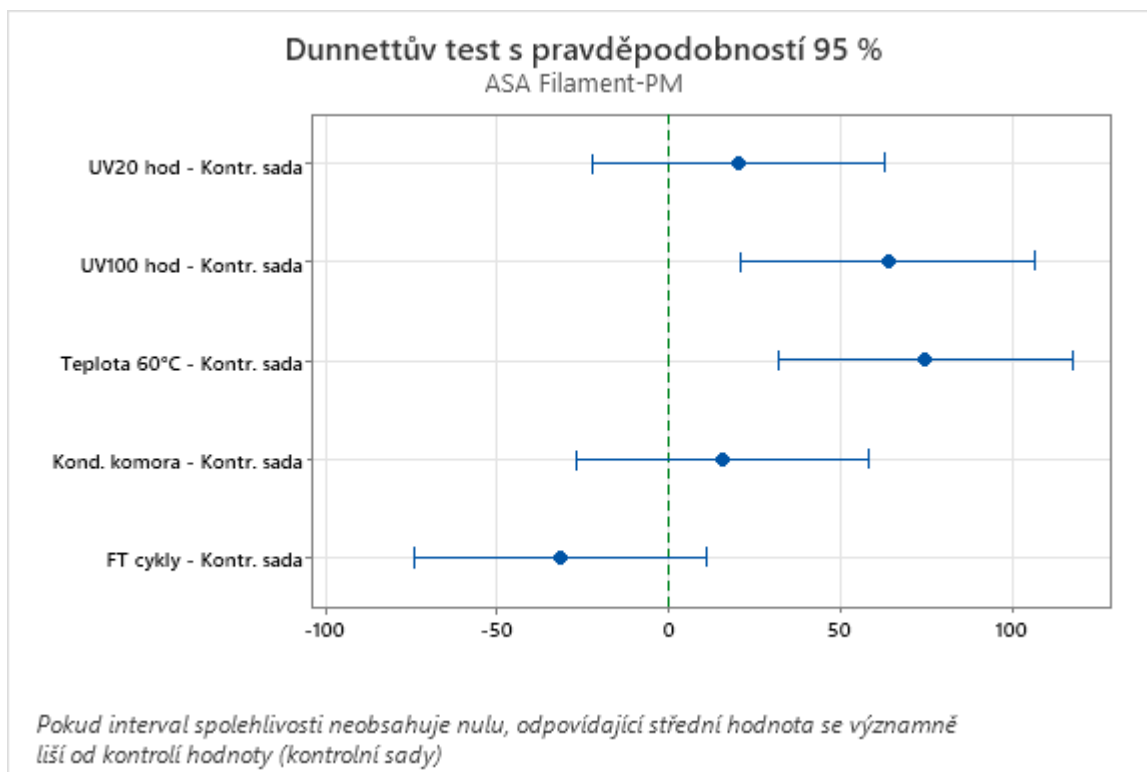
Pravděpodobnostní graf - FT cykly

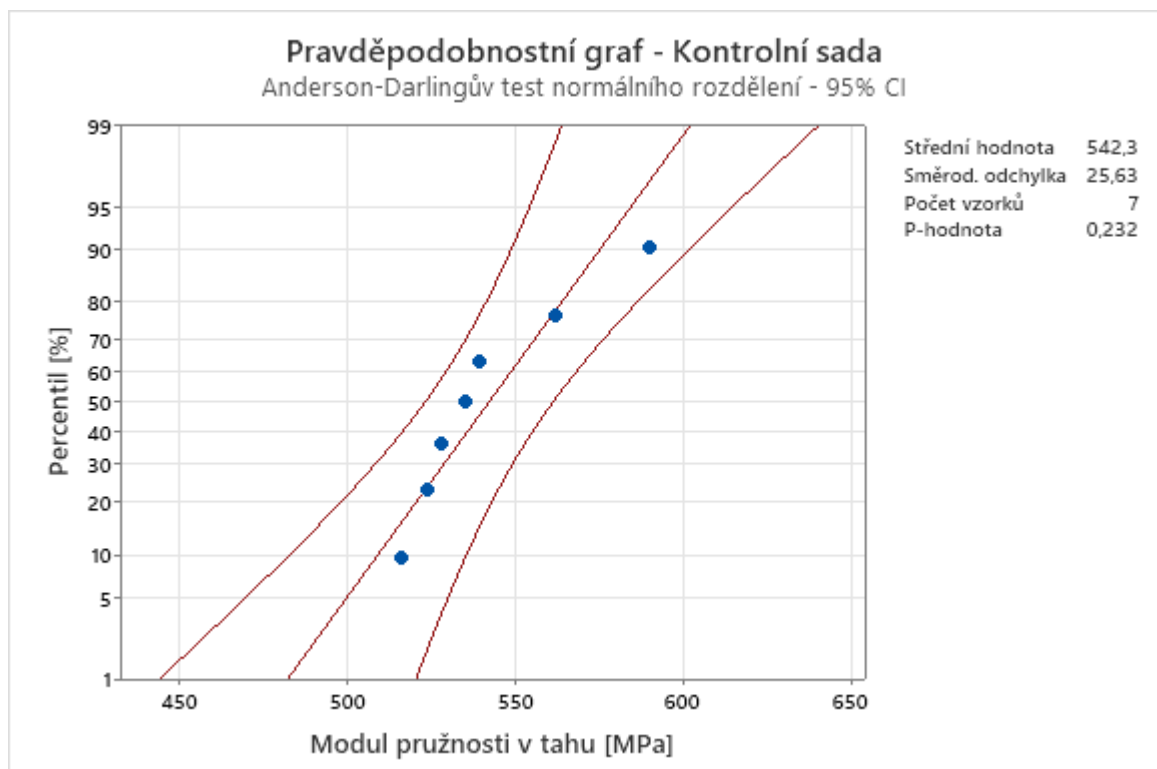
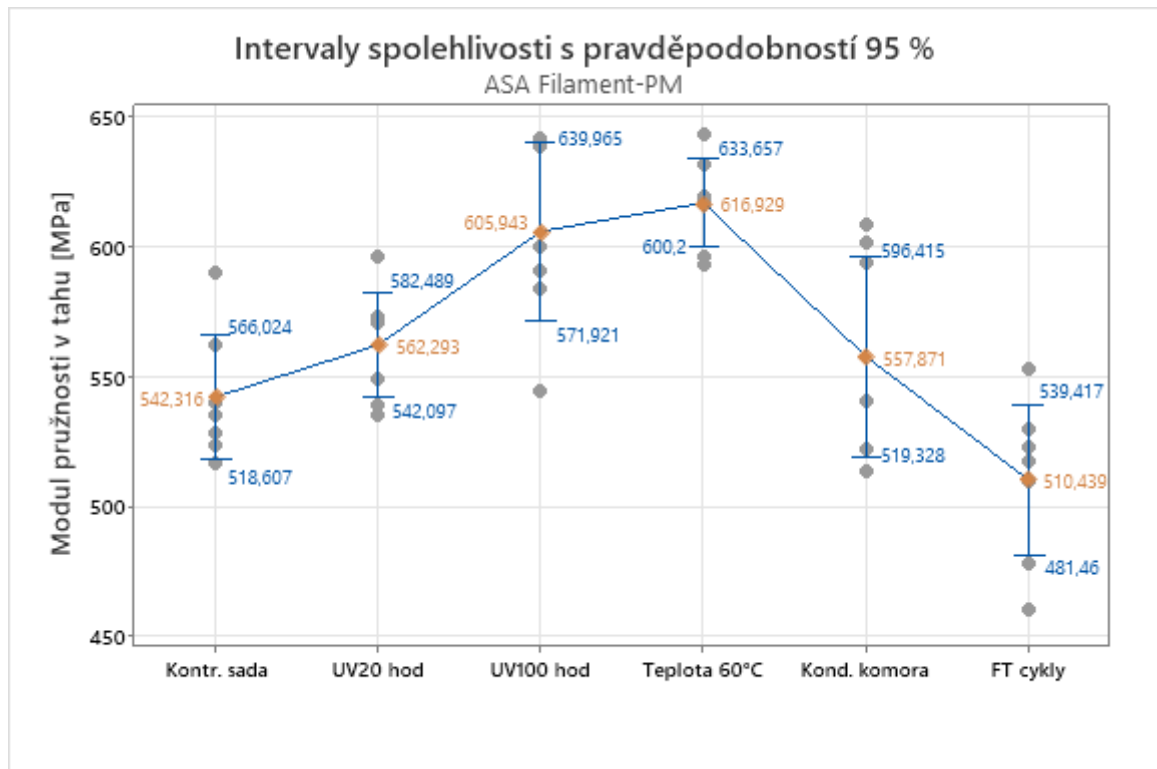
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Modul pružnosti v tahu aditivního materiálu ASA

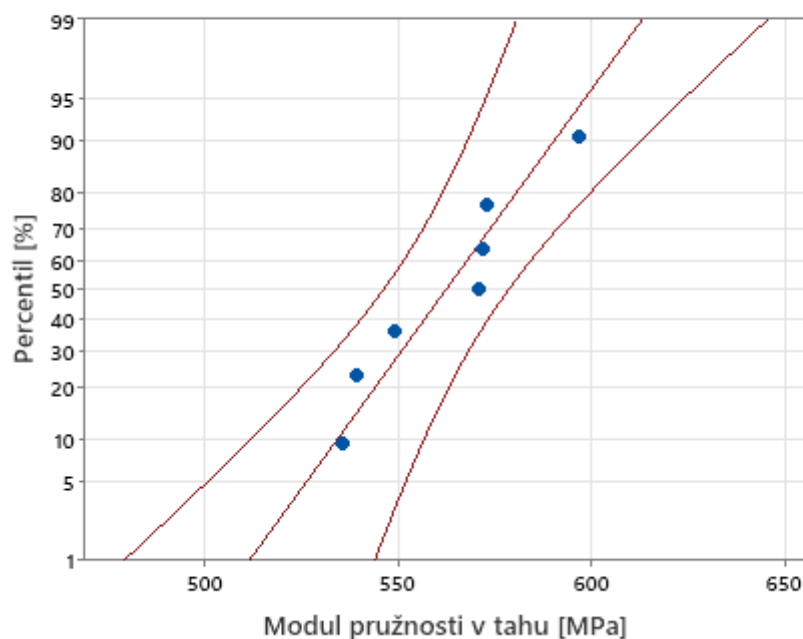
ASA – Modul pružnosti v tahu [MPa]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	542,32	25,63	657,15	516,63	590,18	0,26	[518,607; 566,024]
UV 20 hod	562,29	21,84	476,87	535,6	596,49	0,54	[542,097; 582,489]
UV 100 hod	605,9	36,8	1353,3	54435	641,9	0,074	[571,921; 639,965]
Výdrž na teplotě 60°C	616,93	18,09	327,16	592,82	643,5	0,566	[600,2; 633,657]
Kondenzační komora	557,9	41,7	1736,9	514	608,3	0,078	[519,328; 596,415]
FT cykly	510,4	31,3	981,8	460,8	552,8	0,566	[481,46; 539,417]





Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin

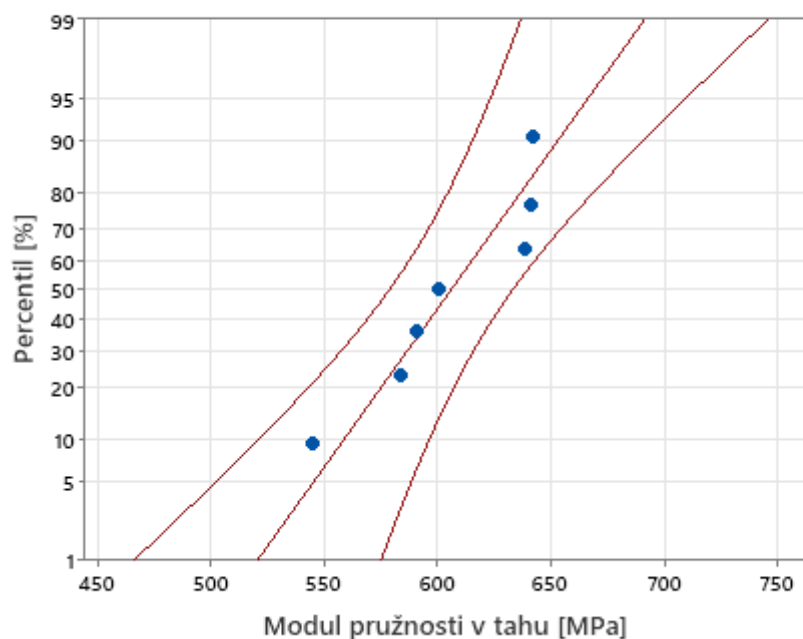
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 562,3
Směrod. odchylka 21,84
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,389

Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin

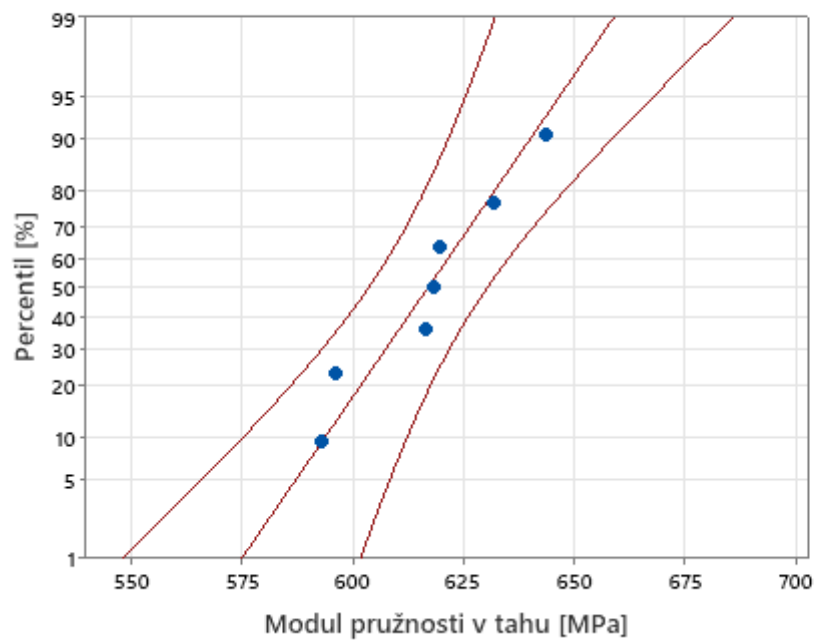
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Střední hodnota 605,9
Směrod. odchylka 36,79
Počet vzorků 7
P-hodnota 0,260

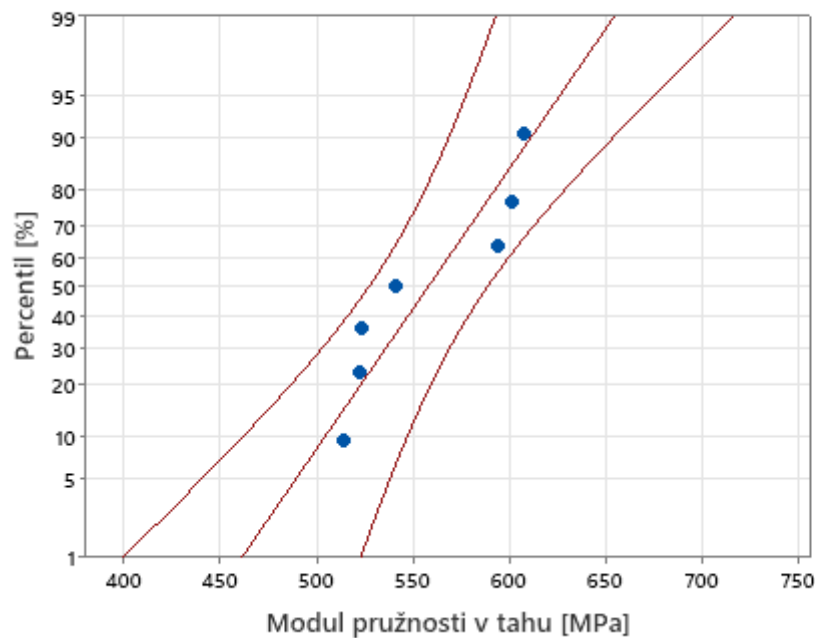
Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



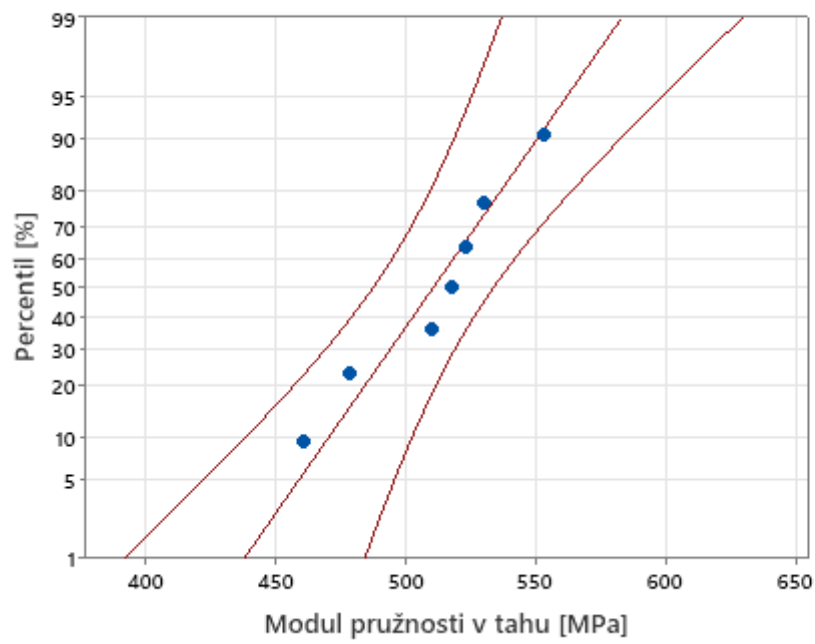
Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



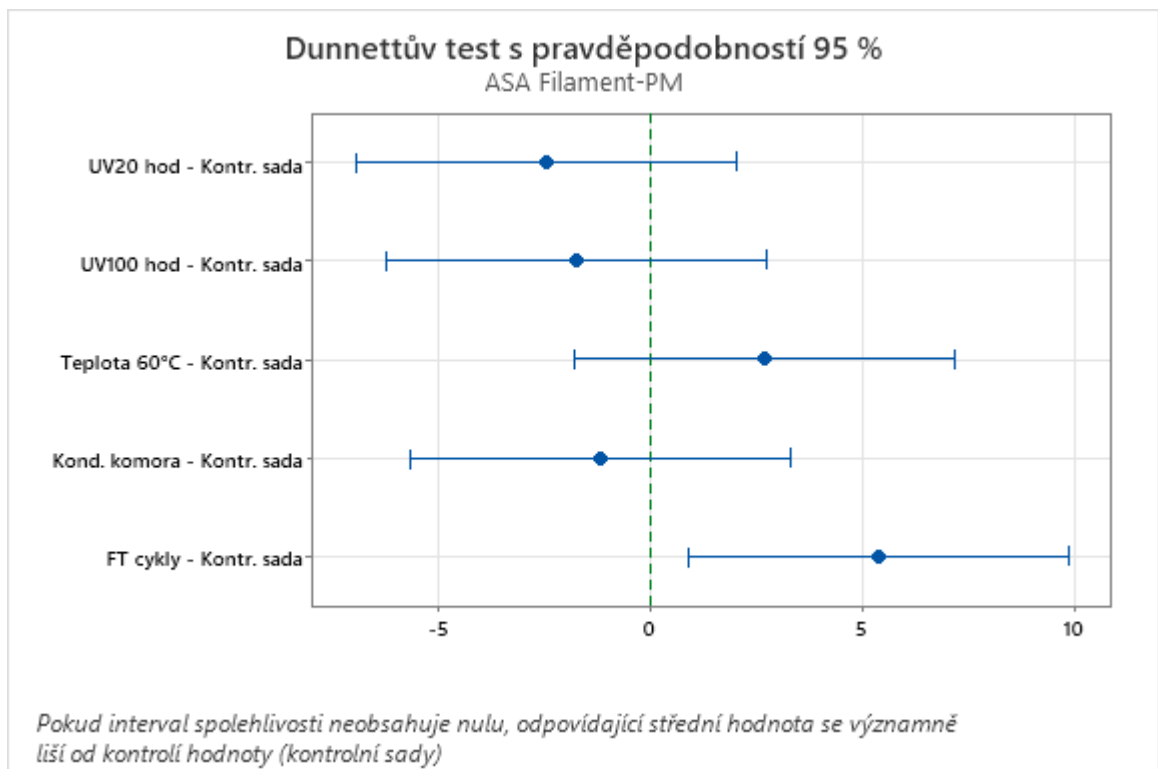
Pravděpodobnostní graf - FT cykly

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



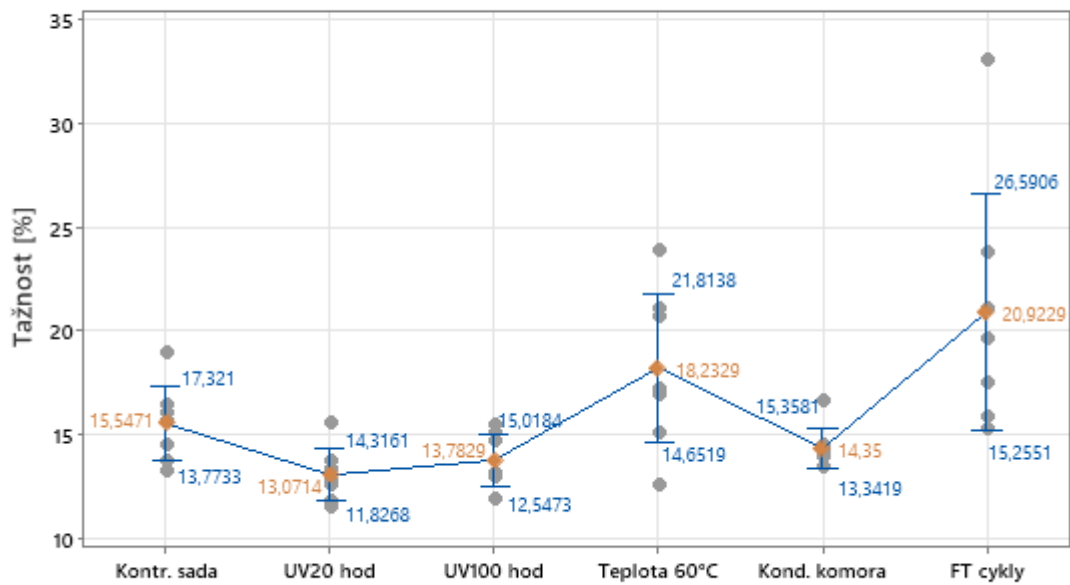
Tažnost aditivního materiálu ASA

ASA – Tažnost [%]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	15,547	1,918	3,679	13,32	18,98	0,644	[13,7733; 17,321]
UV 20 hod	13,071	1,346	1,811	11,56	15,57	0,581	[11,8268; 14,3161]
UV 100 hod	13,783	1,336	1,785	11,95	15,5	0,3	[12,5473; 15,0184]
Výdrž na teplotě 60°C	18,23	3,87	14,99	12,65	23,92	0,842	[14,6519; 21,8138]
Kondenzační komora	14,35	1,09	1,188	13,41	16,62	0,062	[13,3419; 15,3581]
FT cykly	20,92	6,13	37,56	15,32	33,05	0,212	[15,2551; 26,5906]



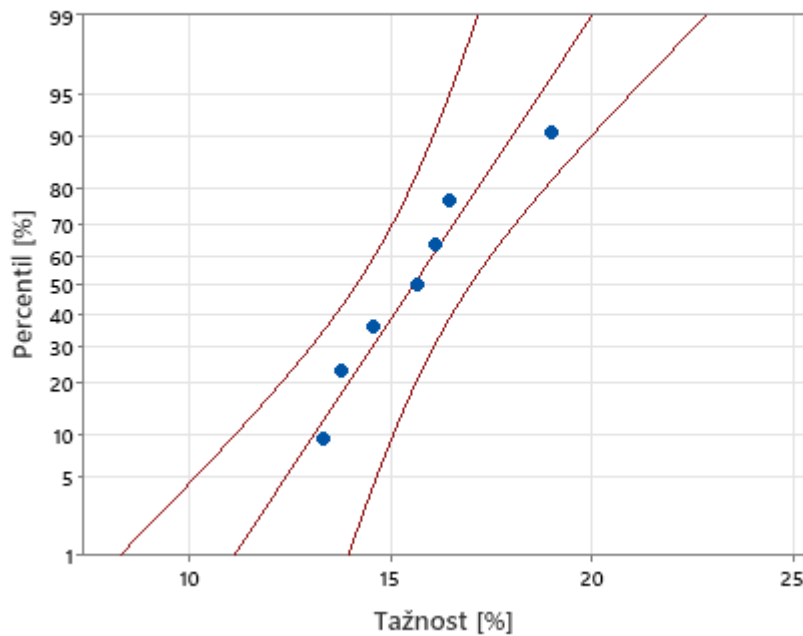
Intervaly spolehlivosti s pravděpodobností 95 %

ASA Filament-PM

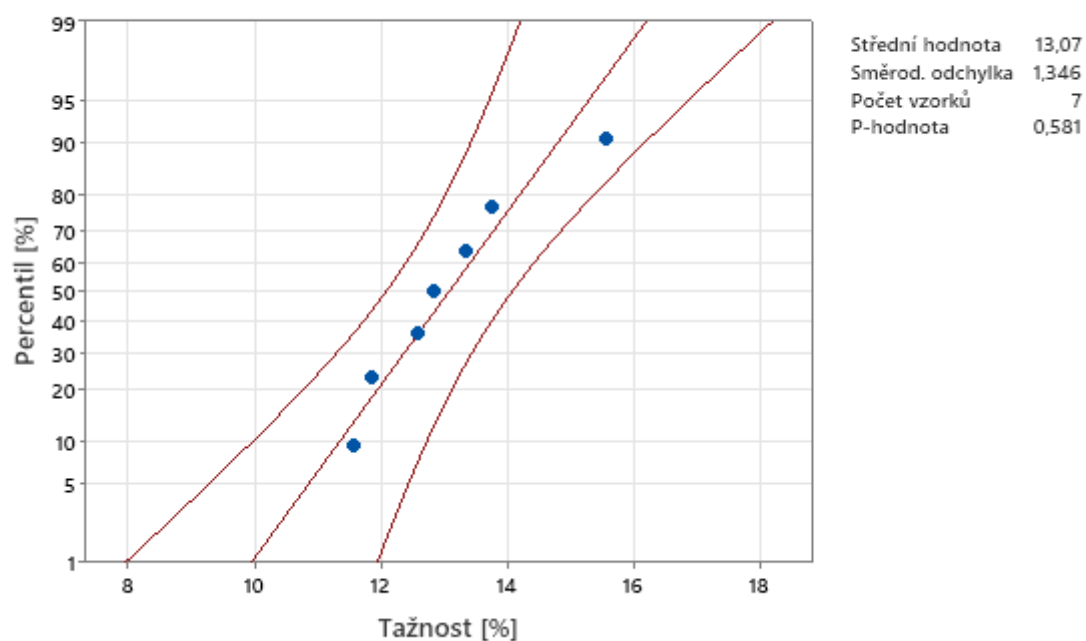


Pravděpodobnostní graf - Kontrolní sada

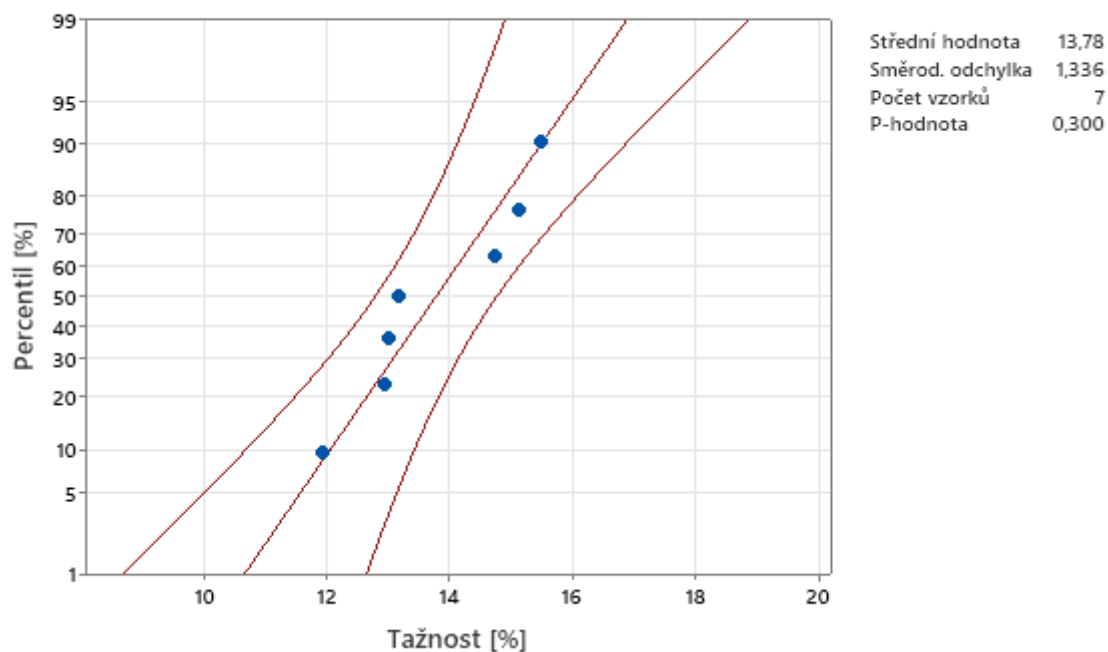
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

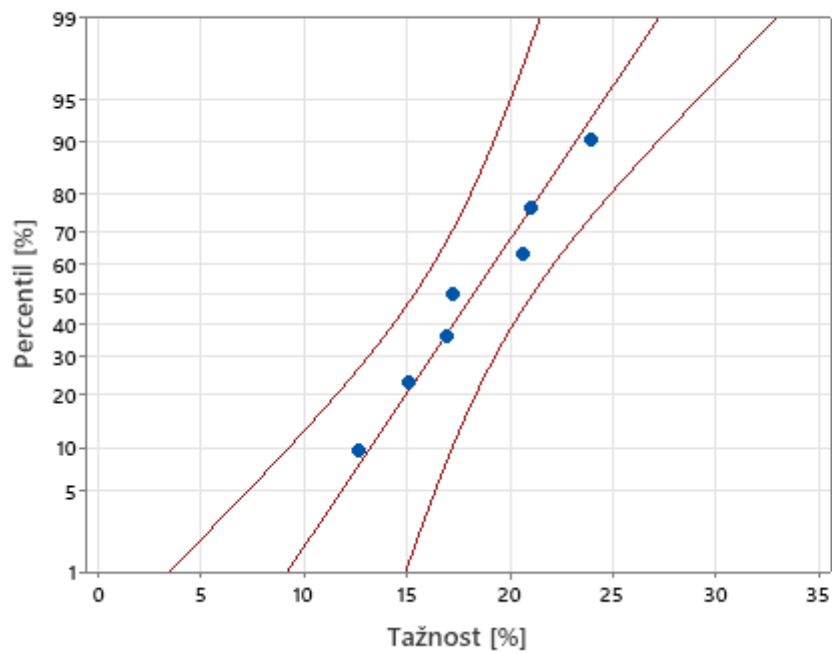


Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



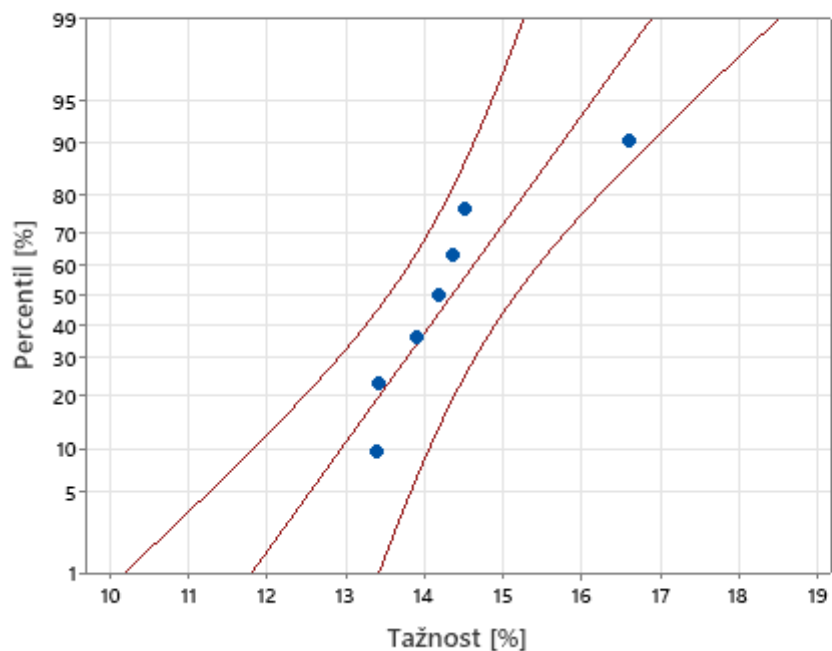
Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



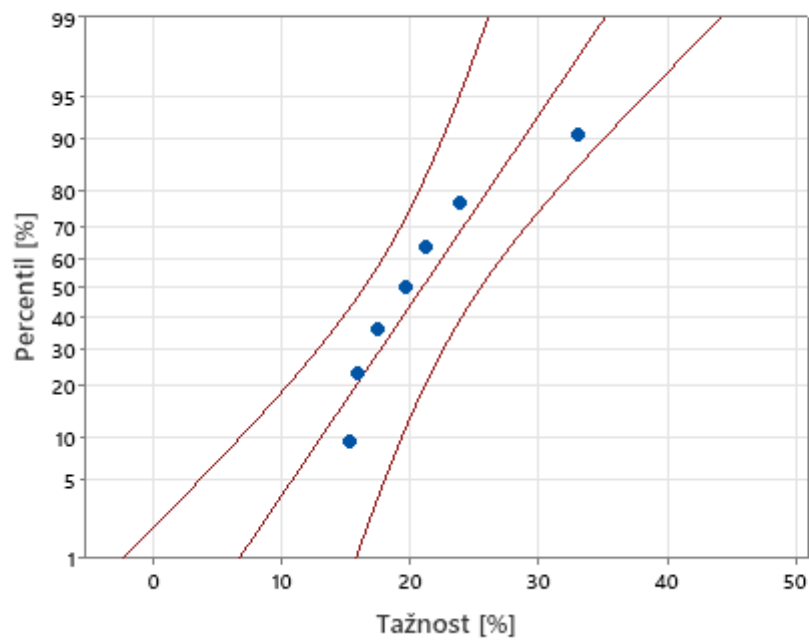
Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - FT cykly

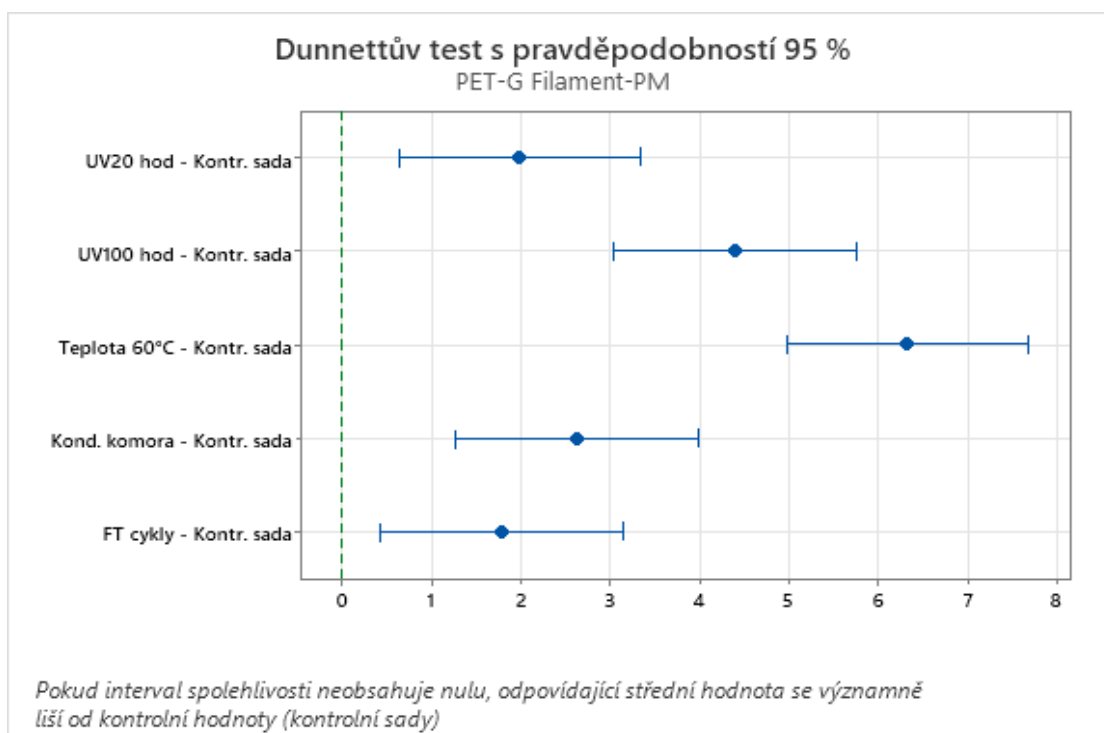
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

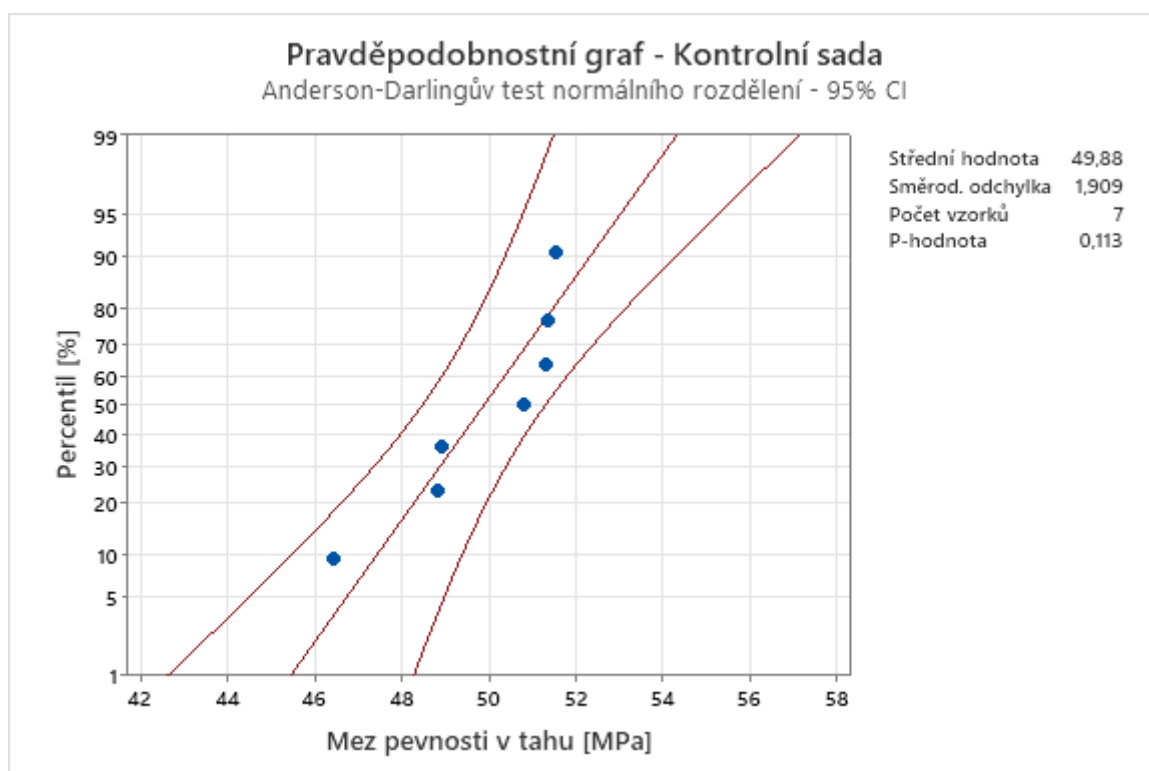
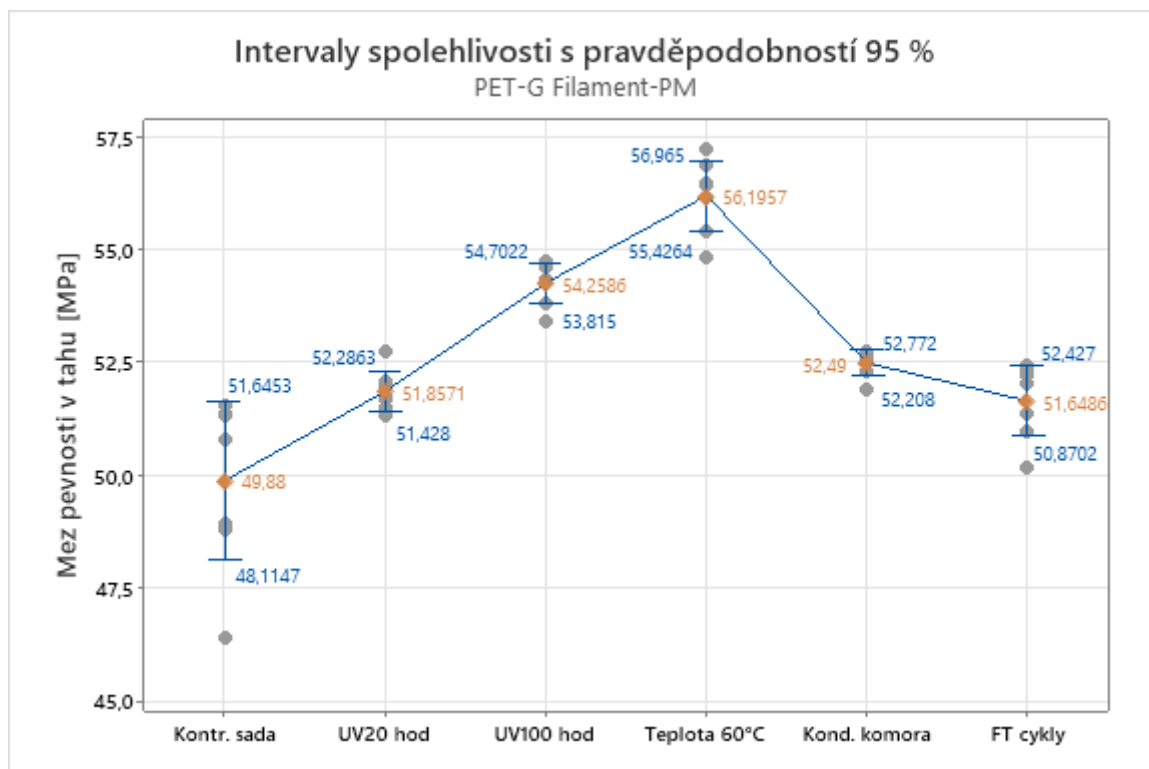


PŘÍLOHA VIII: STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ PŮSOBENÍ DEGRADAČNÍCH FAKTORŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU PET-G FILAMENT-PM

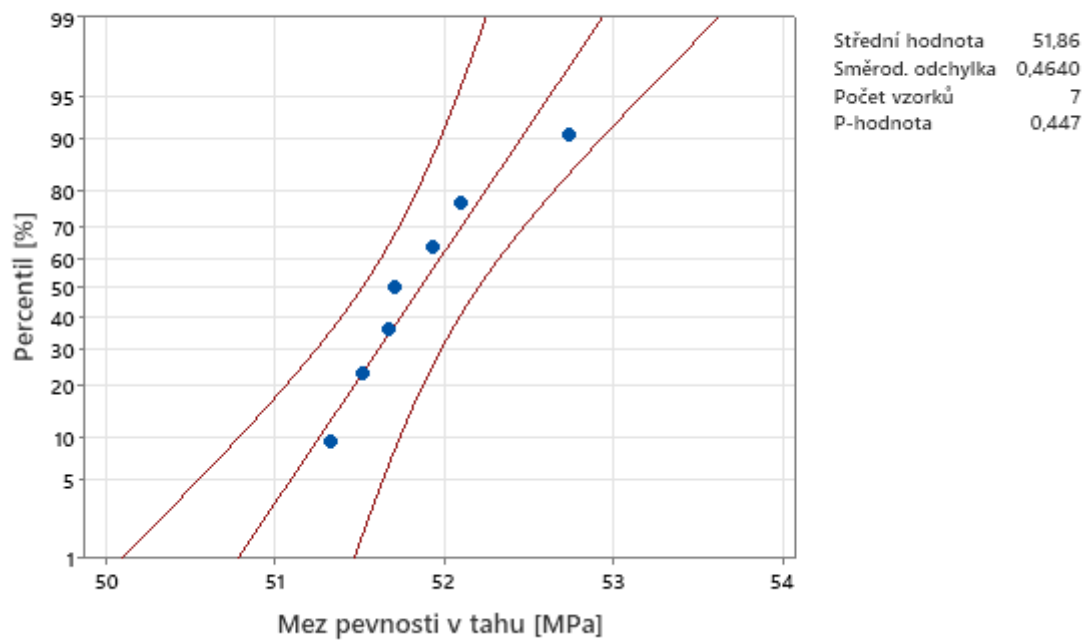
Mez pevnosti v tahu aditivního materiálu PET-G

PET-G – Mez pevnosti v tahu [MPa]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	49,88	1,909	3,643	46,41	51,53	0,113	[48,1147; 51,6453]
UV 20 hod	51,857	0,464	0,215	51,33	52,74	0,447	[51,428; 52,2863]
UV 100 hod	54,259	0,48	0,23	53,42	54,72	0,216	[53,815; 54,7022]
Výdrž na teplotě 60°C	56,196	0,832	0,692	54,83	57,22	0,628	[55,4264; 56,965]
Kondenzační komora	52,49	0,305	0,093	51,89	52,75	0,116	[52,208; 52,772]
FT cykly	51,649	0,842	0,708	50,18	52,45	0,26	[50,8702; 52,427]

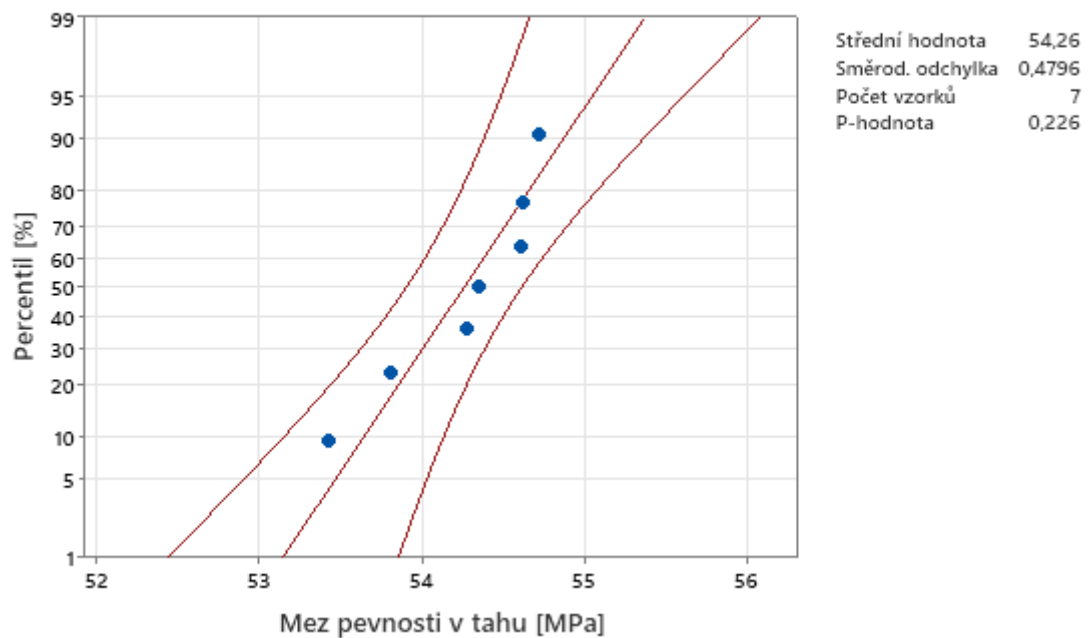




Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

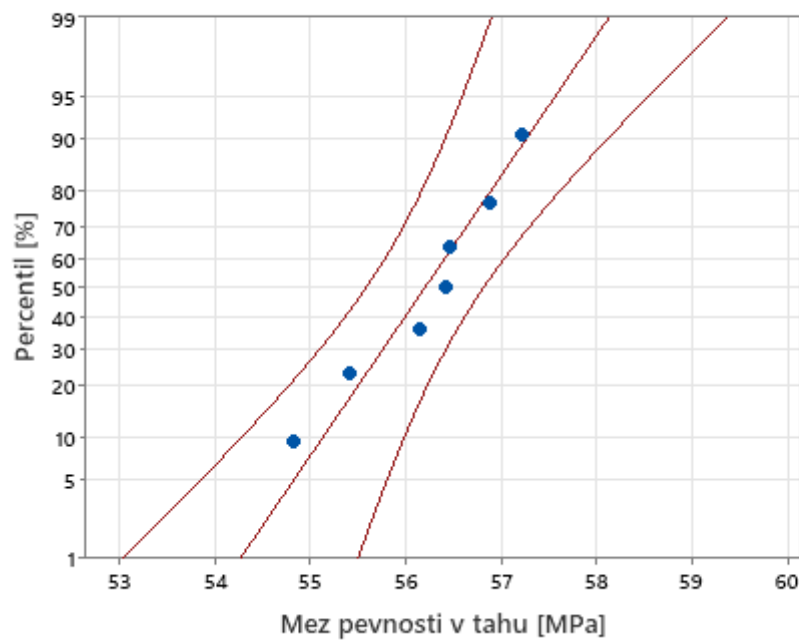


Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



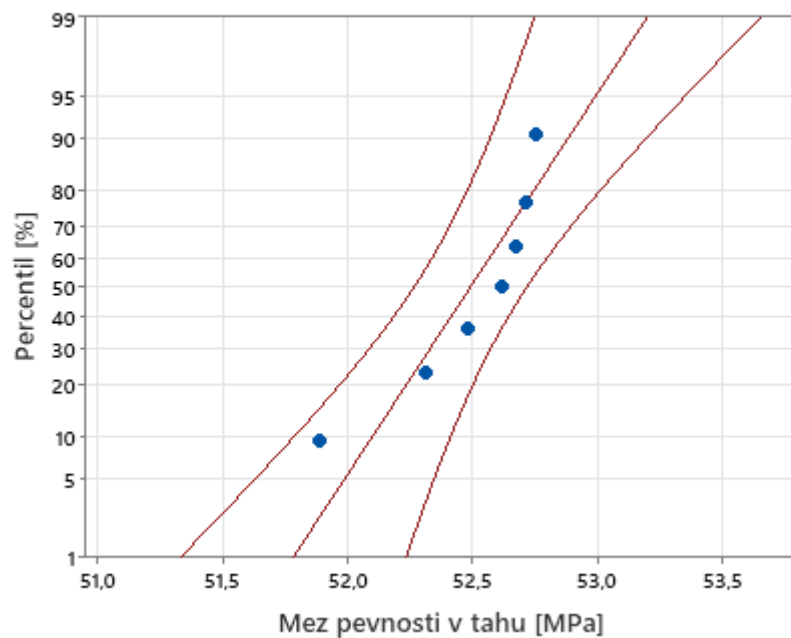
Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



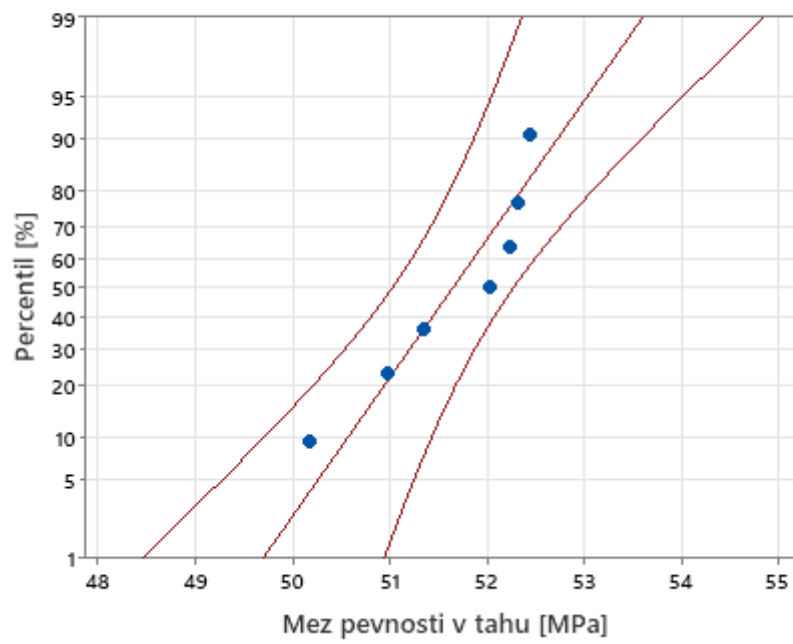
Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - FT cykly

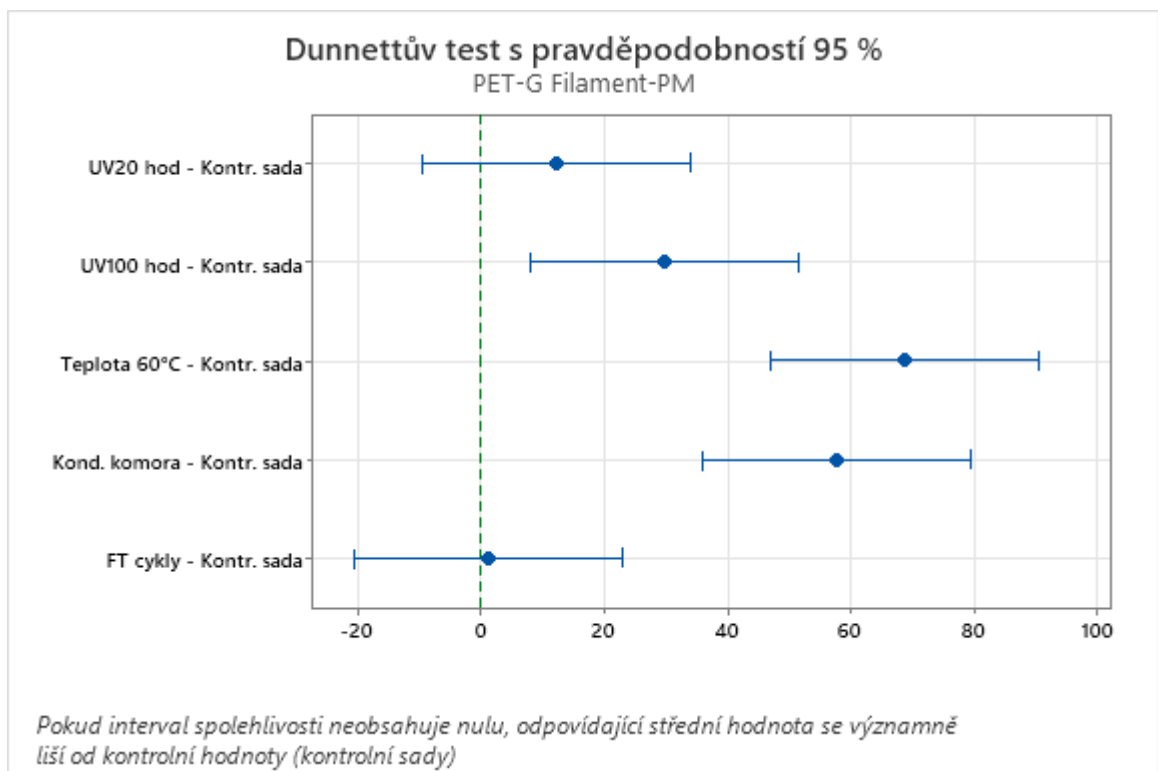
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



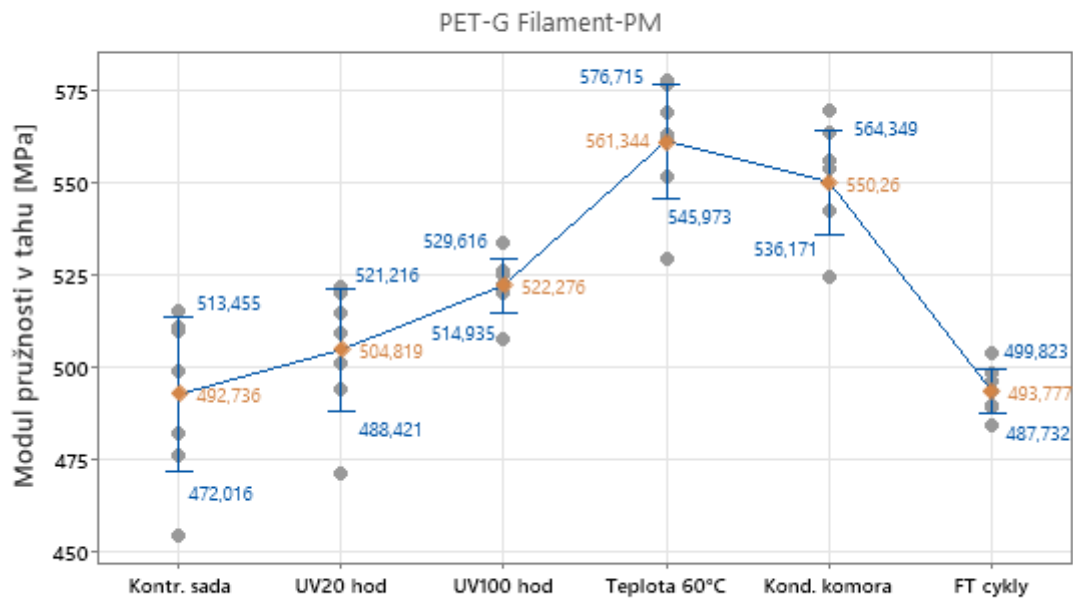
Střední hodnota	51,65
Směrod. odchylka	0,8417
Počet vzorků	7
P-hodnota	0,260

Modul pružnosti v tahu aditivního materiálu PET-G

PET-G – Modul pružnosti v tahu [MPa]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	492,74	22,4	501,91	454,59	515,22	0,371	[472,016; 513,455]
UV 20 hod	504,82	17,73	314,37	471,51	522,09	0,399	[488,421; 521,216]
UV 100 hod	522,28	7,94	63	507,67	533,82	0,376	[514,935; 529,616]
Výdrž na teplotě 60°C	561,34	16,62	276,22	529,59	577,67	0,32	[545,973; 576,715]
Kondenzační komora	550,26	15,23	232,06	524,35	569,57	0,752	[536,171; 564,349]
FT cykly	493,78	6,54	42,73	484,58	504,11	0,923	[487,732; 499,823]

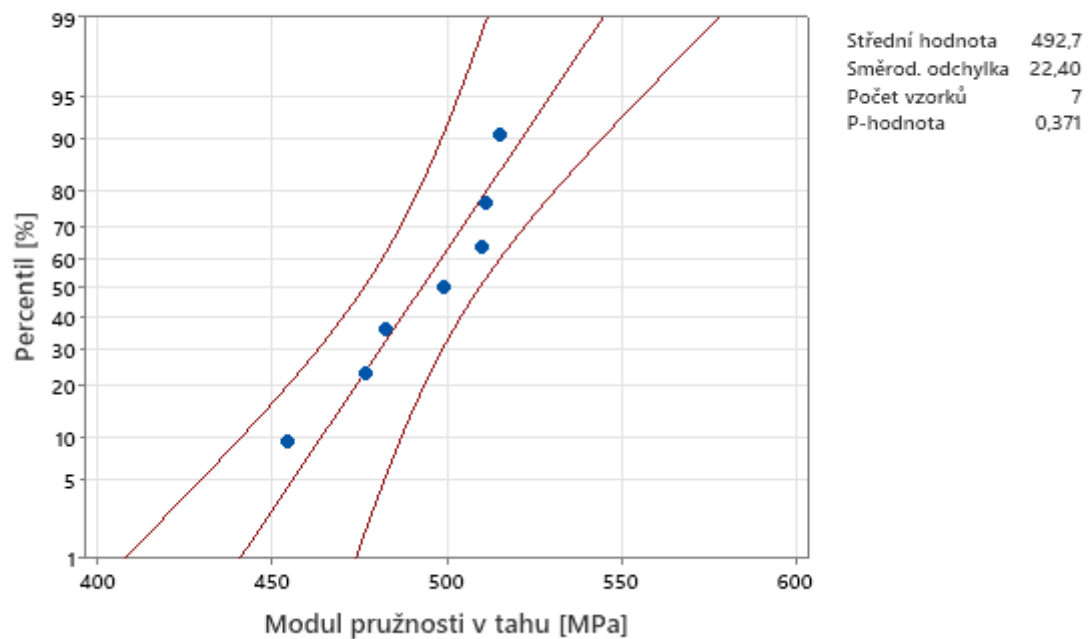


Intervaly spolehlivosti s pravděpodobností 95 %

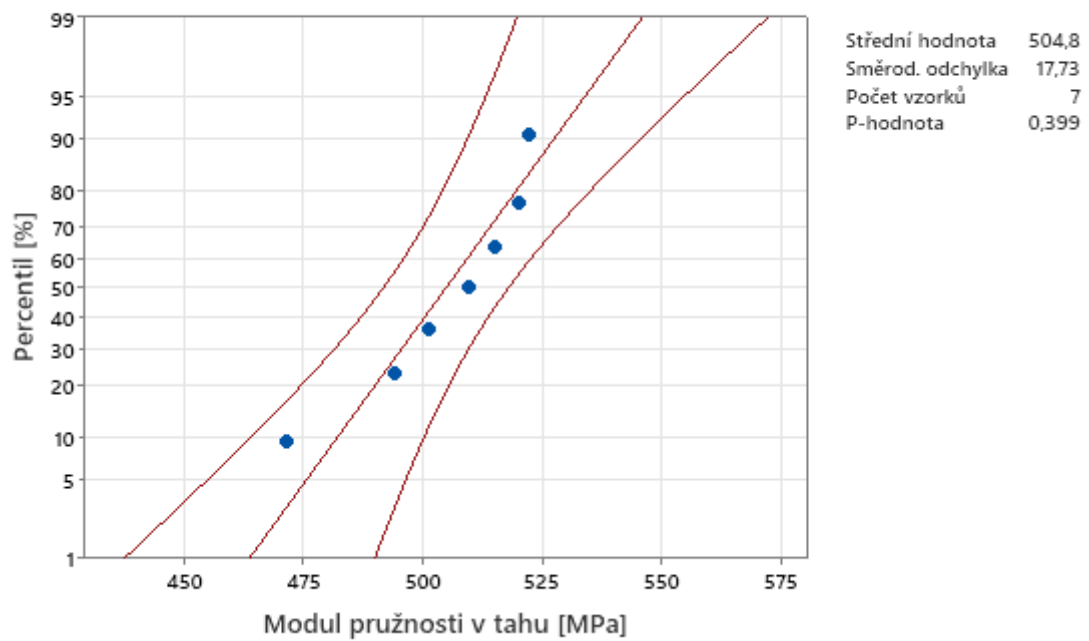


Pravděpodobnostní graf - Kontrolní sada

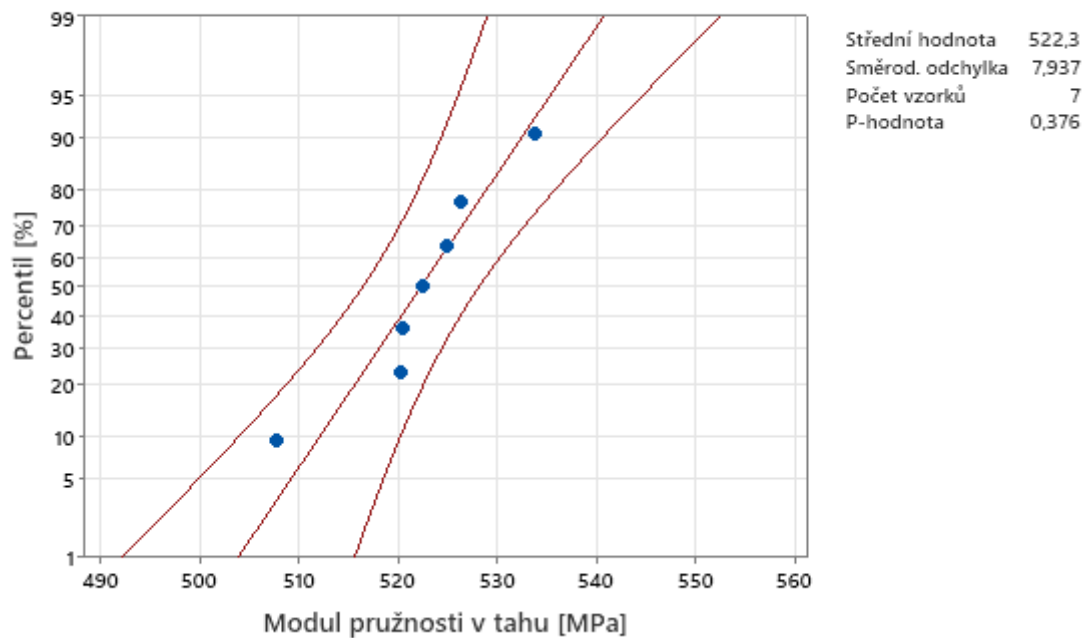
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

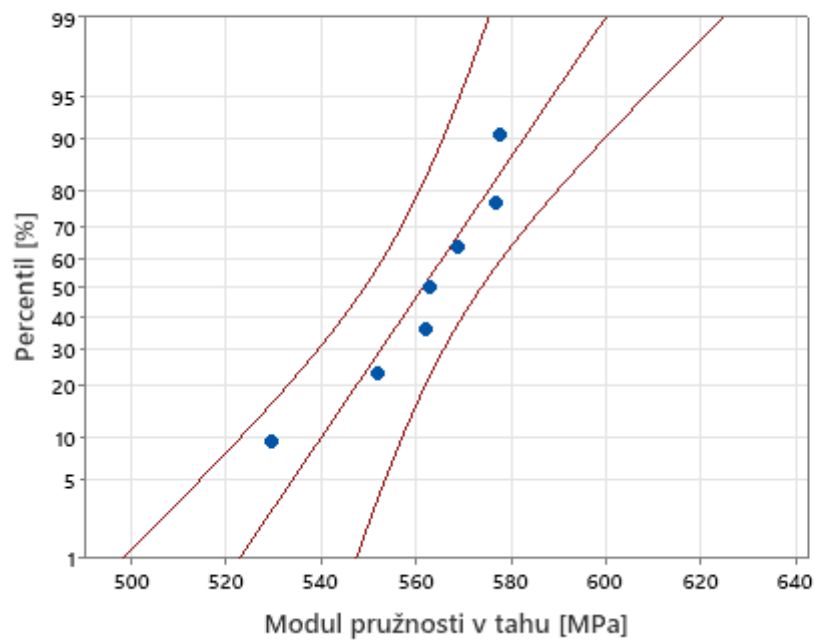


Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



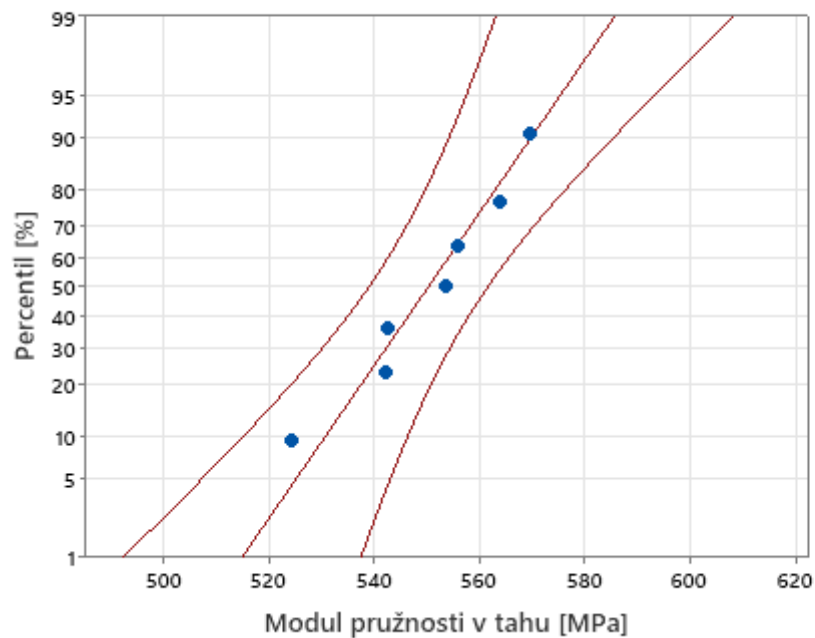
Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



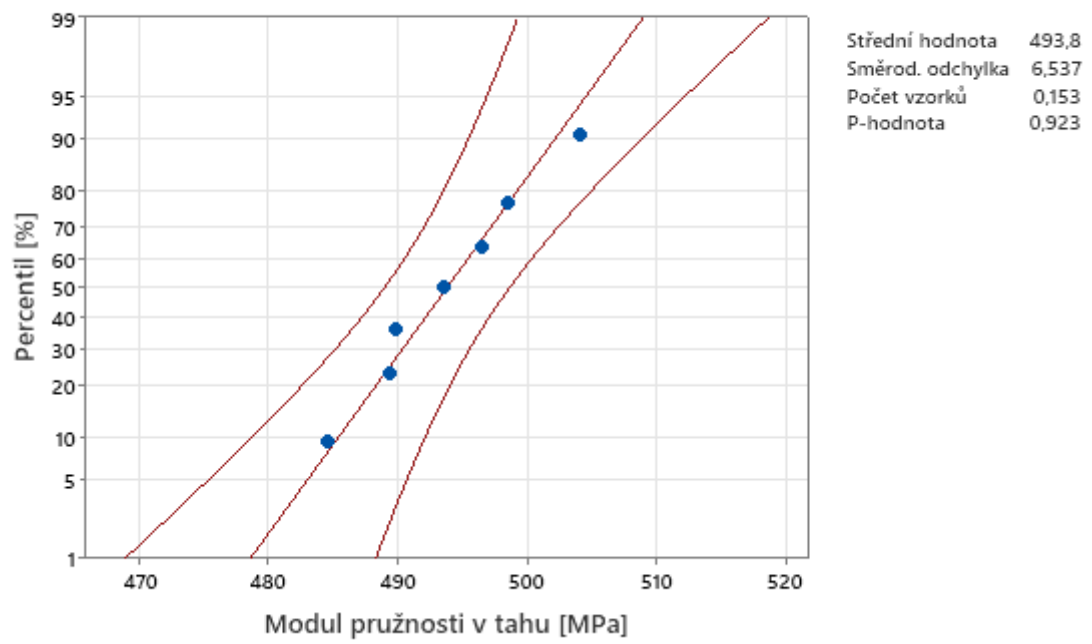
Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



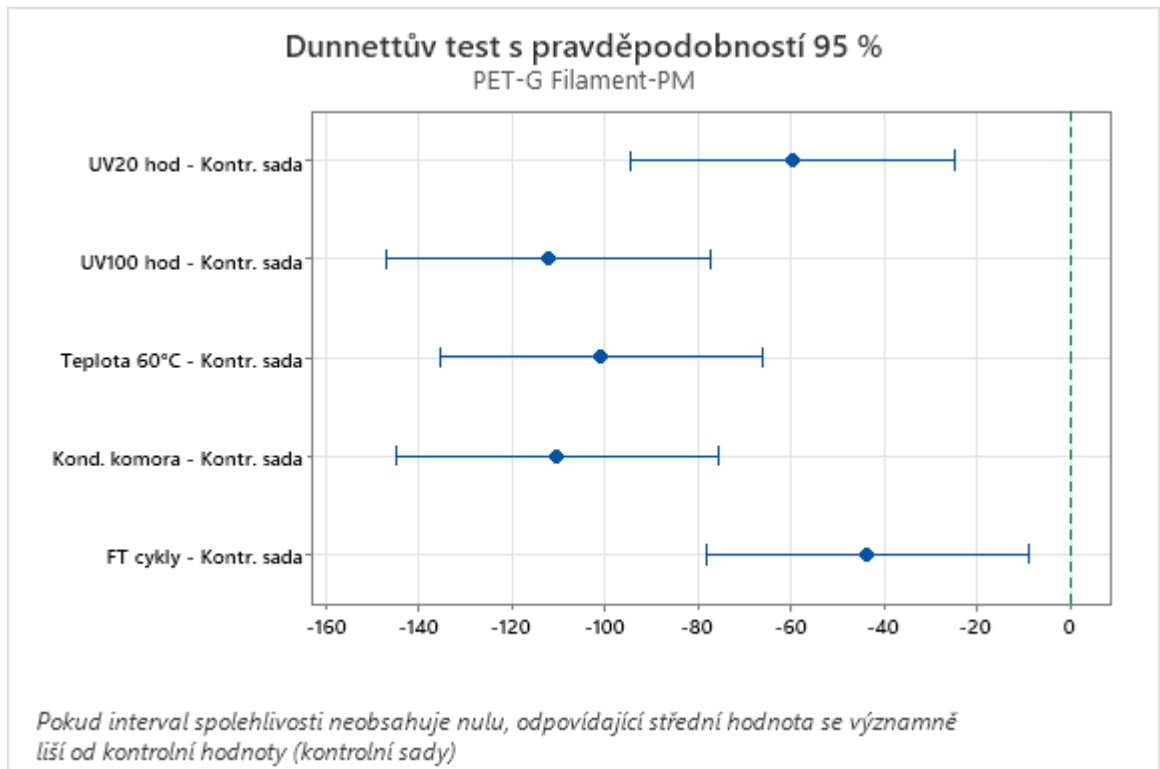
Pravděpodobnostní graf - FT cykly

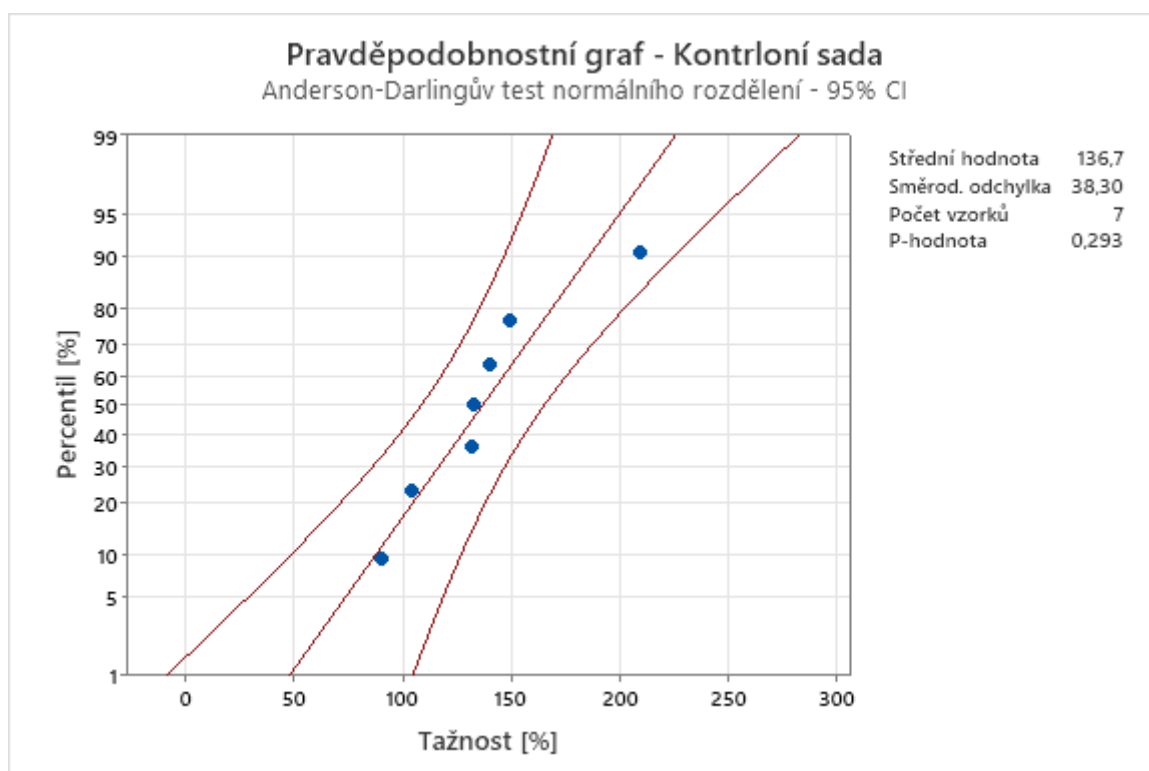
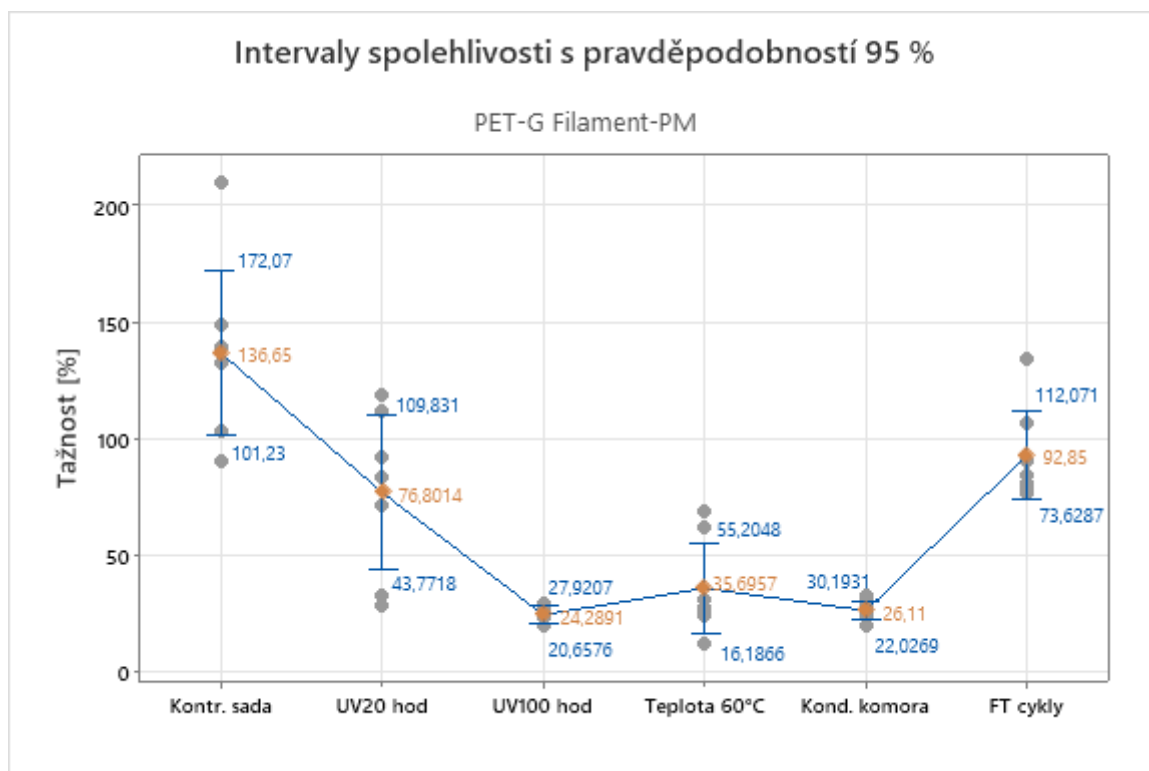
Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Tažnost aditivního materiálu PET-G

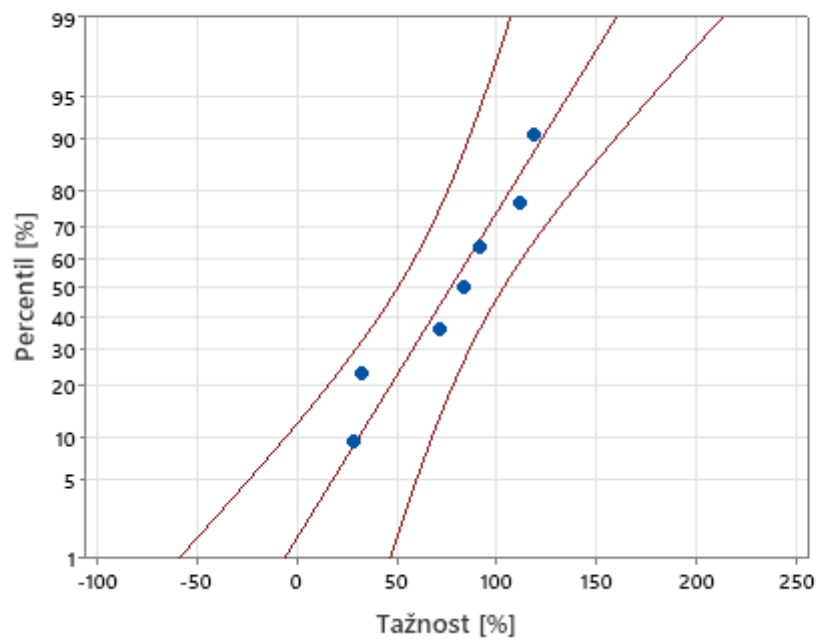
PET-G – Tažnost [%]							
Sada vzorků	Parametry						
	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozptyl	Min.	Max.	P-hodnota	Interval (spolehlivost. 95 %)
Kontrolní sada	136,7	38,3	1466,7	89,9	209,6	0,293	[101,23; 172,07]
UV 20 hod	76,8	35,7	1275,5	27,9	119	0,508	[43,7718; 109,831]
UV 100 hod	25,26	3,72	13,85	19,61	29,46	0,69	[20,6576; 27,9207]
Výdrž na teplotě 60°C	21,74	7,77	60,33	11,54	30,93	0,072	[16,1866; 55,2048]
Kondenzační komora	26,11	4,41	19,49	19,42	32,37	0,945	[22,0269; 30,1931]
FT cykly	92,85	20,78	431,95	76,65	133,86	0,058	[73,6287; 112,071]





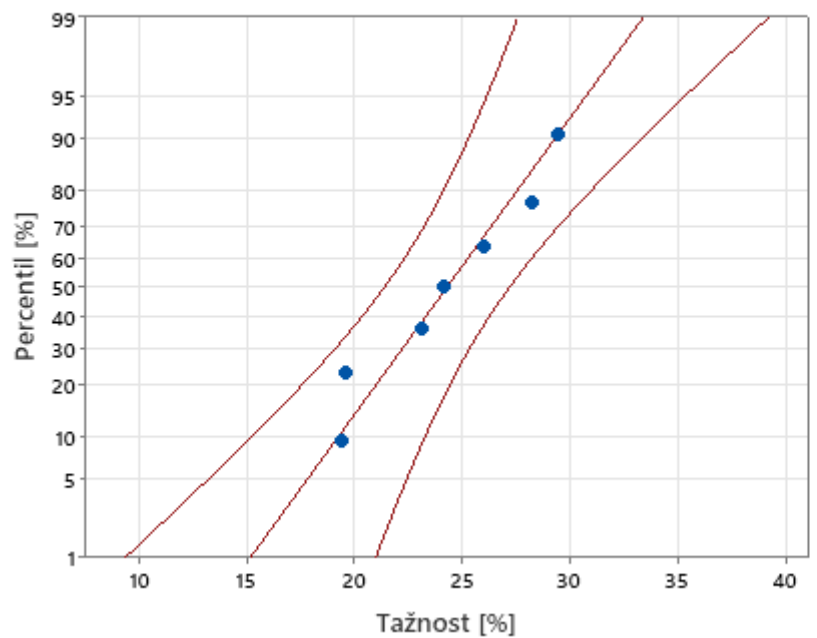
Pravděpodobnostní graf - UV20 hodin

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



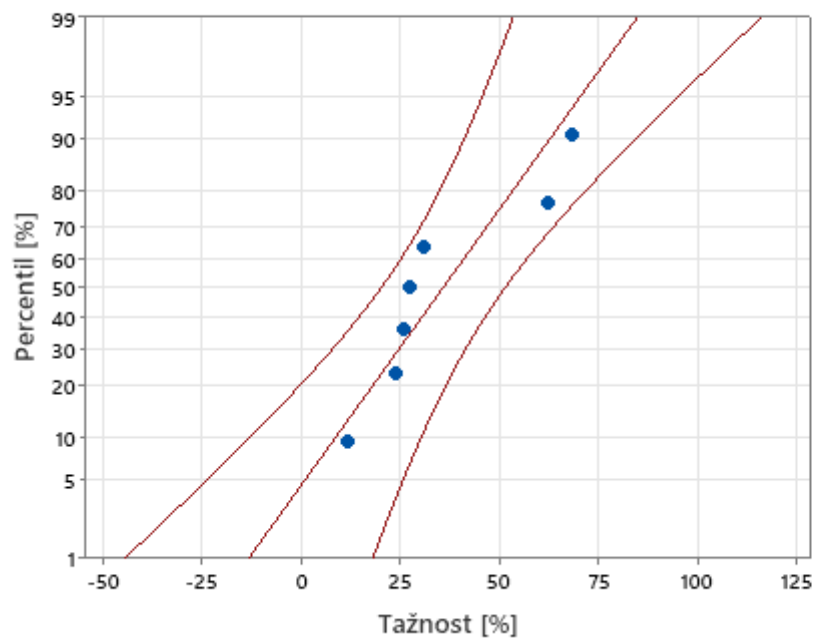
Pravděpodobnostní graf - UV100 hodin

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



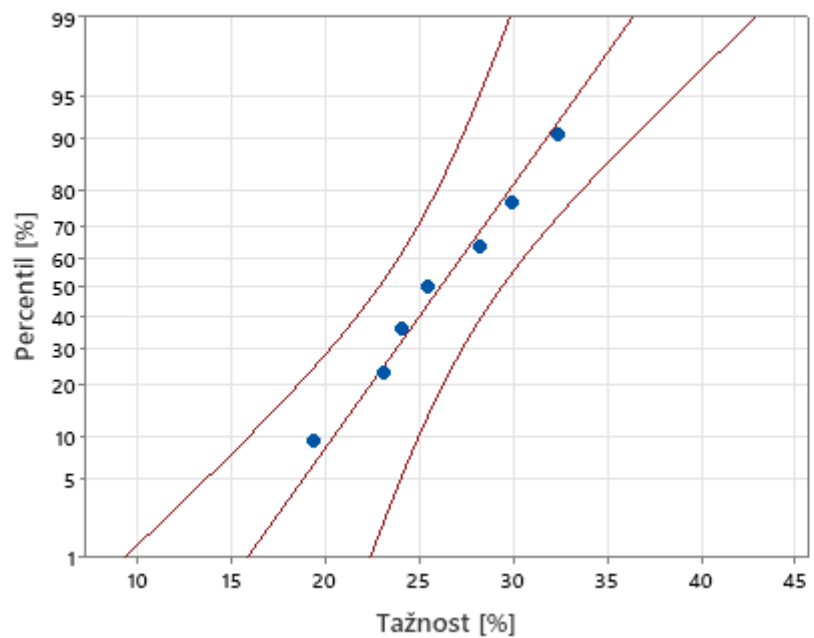
Pravděpodobnostní graf - Teplota 60°C

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - Kondenzační komora

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI



Pravděpodobnostní graf - FT cykly

Anderson-Darlingův test normálního rozdělení - 95% CI

