



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## POSOUZENÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU JAKO ALTERNATIVY VE VÝROBĚ

ASSESSMENT OF 3D PRINTING TECHNOLOGY AS AN ALTERNATIVE IN MANUFACTURING

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Balvín

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

BRNO 2024

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Patrik Balvín

**ID:** 240829

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Posouzení technologie 3D tisku jako alternativy ve výrobě**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s možnostmi využití 3D tisku pro výrobu polymerních dílů (součástí). Na základě provedené literární rešerše udělejte komparaci dosavadních výrobních technologií pro výrobu dílů (součástí) s alternativou využití 3D tisku. Provedte posouzení základních mechanických vlastností materiálu před a po degradačním účinku v UV komoře. Dle dosažených výsledků navrhnete konkrétní díl využívaný v automobilovém průmyslu včetně výkresové dokumentace a návrhu jeho výroby pomocí 3D technologie. Součástí práce je i návrh stacionárního nebo mobilního pracoviště pro 3D tisk.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 30.5.2024

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Tomáš Binar, Ph.D.

**doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se věnuje technologií 3D tisku. V teoretické části jsou popsány hlavní metody 3D tisku, využívané materiály (jejich proces výroby, vlastnosti, výhody a omezení), degradace díky okolním vlivům, klasické metody výroby polymerních dílů a také zkoušky pro zjištění mechanických vlastností materiálů. V práci je také porovnána výhodnost využití 3D tisku v oblasti prototypování. Experimentální část je věnována měření vlivu degradace materiálů na houževnatost, tvrdost a pevnost v tahu materiálů PLA a PA6 CF15. Případová studie se zabývá návrhem úchytu zapalovací cívky a mobilního pracoviště pro 3D tisk.

## **Klíčová slova**

3D tisk, polymery, mechanické vlastnosti, degradace materiálů, prototypování

## **Abstract**

This bachelor thesis is devoted to 3D printing. The main methods of 3D printing, widely used materials (their production, their properties and the advantages and disadvantages of using them), degradation due to environmental conditions, other common methods of producing polymer parts and mechanical test are described in the theoretical part. This paper also compares the advantages of using 3D printing for prototyping. The experimental section is dedicated to measuring the impact of material degradation on the toughness, hardness, and tensile strength of PLA and PA6 CF15 materials. The case study focuses on the design of an engine spark coil holder and a mobile workstation for 3D printing.

## **Keywords**

3D printing, polymers, mechanical properties, material degradation, prototyping

## **Bibliografická citace**

BALVÍN, Patrik. Posouzení technologie 3D tisku jako alternativy ve výrobě. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160074>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Tomáš Binar.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *Patrik Balvín*

**VUT ID studenta:** *240 829*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2023/24*

**Téma závěrečné práce:** *Posouzení technologie 3D tisku jako alternativy ve výrobě*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 30. května 2024

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Binarovi, Ph.D. za pedagogickou pomoc, užitečné rady a ochotu při zpracovávání mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Bc. Miroslavovi Blechovi za pomoc při měření mechanických zkoušek a také Ing. Přemyslu Menšíkovi, Ph.D. za umožnění měření na FCH VUT.

V Brně dne: 30. května 2024

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>1. OBECNÉ INFORMACE O 3D TISKU.....</b>	<b>13</b>
1.1 CO JE TO 3D TISK.....	13
1.2 POSTUP VÝROBY MODELU POMOCÍ 3D TISKÁRNÝ.....	13
<b>2. METODY 3D TISKU.....</b>	<b>15</b>
2.1 FOTOPOLYMERIZACE.....	15
2.2 FUSED DEPOSITION MODELING – FDM .....	16
2.3 SELECTIVE LASER SINTERING – SLS.....	18
<b>3. MATERIÁLY PRO 3D TISK .....</b>	<b>20</b>
3.1 KYSELINA POLYMLÉČNÁ – PLA .....	20
3.2 POLYETHYLENTEREFTALÁT – PET .....	21
3.3 GLYKOLEM MODIFIKOVANÝ POLYETHYLENTEREFTALÁT – PETG.....	22
3.4 NYLON .....	23
3.5 NYLON-KARBON – PA6 CF15 .....	24
<b>4. KLASICKÉ METODY VÝROBY POLYMERNÍCH DÍLŮ .....</b>	<b>26</b>
4.1 VSTŘIKOVÁNÍ.....	26
4.2 ODLÉVÁNÍ.....	26
4.3 LISOVÁNÍ.....	27
4.4 VYFUKOVÁNÍ .....	28
<b>5. VLIV OKOLÍ NA KVALITU POLYMERNÍCH DÍLŮ .....</b>	<b>29</b>
5.1 VLIV TEPLA .....	29
5.2 VLIV UV ZÁŘENÍ.....	29
5.3 VLIV VLHKOSTI .....	30
<b>6. MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ .....</b>	<b>31</b>
6.1 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	31
6.2 ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU .....	32
6.3 ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	33
<b>7. POSOUZENÍ VHODNOSTI 3D TISKU.....</b>	<b>35</b>
7.1 CENA .....	35
7.2 FLEXIBILITA VÝROBY .....	35
7.3 RYCHLOST VÝROBNÍHO PROCESU.....	35
7.4 AUTOMATIZACE .....	36
7.5 VÝSLEDNÁ KVALITA.....	36
7.6 SHRUTÍ POMOCÍ SAATYHO METODY .....	36
<b>8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>41</b>

<b>9.</b>	<b>PŘÍPRAVA VZORKŮ .....</b>	<b>43</b>
9.1	TISK VZORKŮ.....	43
9.2	DEGRADACE V UV KOMOŘE.....	44
9.3	DEFEKTY PŘI TISKU .....	46
<b>10.</b>	<b>VLASTNÍ MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ.....</b>	<b>47</b>
10.1	ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	47
10.2	ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	55
10.3	ZKOUŠKA PEVNOSTI V TAHU.....	59
<b>11.</b>	<b>PŘÍPADOVÁ STUDIE .....</b>	<b>65</b>
11.1	NÁVRH ÚCHYTU ZAPALOVACÍ CÍVKY .....	65
11.2	NÁVRH MOBILNÍHO PRACOVIŠTĚ PRO 3D TISK .....	66
<b>12.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>68</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>76</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Porovnání inverzní a klasické metody SLA 3D tisku [49] .....	16
2.2	FDM delta 3D tiskárna Flsun Super Racer (vlevo) [50].....	17
2.3	FDM 3D tiskárna Creality Ender 3 S1 (vpravo) [51] .....	17
2.4	Čištění dílu vyrobeného pomocí SLS od přebytečného práškového materiálu [52].....	19
6.1	Typická deformační křivka při měření pevnosti v tahu [24] .....	32
8.1	Diagram postupu měření experimentu [zdroj vlastní] .....	42
9.1	Uchycené vzorky uvnitř klimatické komory [vlastní zdroj].....	45
9.2	Detail nepřetrženého vadného vzorku pro měření pevnosti v tahu [vlastní zdroj] .....	46
9.3	Přetržené vadné vzorky pro měření pevnosti v tahu [vlastní zdroj] .....	46
10.1	Vzorky pro měření vrubové houževnatosti [vlastní zdroj] .....	47
10.2	Zařízení pro vrubování – Ceast NOTCHVIS 6951 [vlastní zdroj].....	48
10.3	Zařízení použité pro měření houževnatosti Zwick 5113.100 [vlastní zdroj] .....	48
10.4	Horkovzdušná pec Climatic Test Systems ltd. 91250 [vlastní zdroj].....	49
10.5	Dusíková komora pro ochlazování vzorků [43] .....	50
10.6	Nepřeražené nedegradované vzorky z PLA měřené při teplotě 70 °C při zkoumání vrubové houževnatosti [vlastní zdroj] .....	51
10.7	Tvrdoměr značky Insize se stupnicí Shore D [vlastní zdroj].....	55
10.8	Výkres vzorku pro měření tvrdosti s vyznačenými body pro měření [vlastní zdroj] .....	56
10.9	Výkres vzorku pro měření pevnosti [vlastní zdroj] .....	59
10.10	Trhací přístroj LABOR MACHINE UTS 5 [vlastní zdroj] .....	60
10.11	Prostředí ovládacího programu LabControl [vlastní zdroj].....	61
11.1	Referenční úchyt zapalovací cívky sloužící pro vytvoření digitálního modelu [vlastní zdroj] .....	65
11.2	3D model úchytu zapalovací cívky [vlastní zdroj].....	66
11.3	Půdorys navrhnutého mobilního pracoviště pro 3D tisk [vlastní zdroj] .....	67
11.3	Deformační křivka vzorku č. 1 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	77
11.3	Deformační křivka vzorku č. 2 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	77
11.3	Deformační křivka vzorku č. 3 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	78
11.3	Deformační křivka vzorku č. 4 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	78
11.3	Deformační křivka vzorku č. 5 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	79
11.3	Deformační křivka vzorku č. 6 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	79
11.3	Deformační křivka vzorku č. 7 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	80
11.3	Deformační křivka vzorku č. 8 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	80
11.3	Deformační křivka vzorku č. 9 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	81
11.3	Deformační křivka vzorku č. 10 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj].....	81
11.3	Deformační křivka vzorku č. 11 degradovaného PLA [vlastní zdroj].....	82
11.3	Deformační křivka vzorku č. 12 degradovaného PLA [vlastní zdroj].....	82
11.3	Deformační křivka vzorku č. 13 degradovaného PLA [vlastní zdroj].....	83
11.3	Deformační křivka vzorku č. 14 degradovaného PLA [vlastní zdroj] .....	83
11.3	Deformační křivka vzorku č. 15 degradovaného PLA [vlastní zdroj].....	84
11.3	Deformační křivka vzorku č. 16 degradovaného PLA [vlastní zdroj].....	84
11.3	Deformační křivka vzorku č. 17 degradovaného PLA [vlastní zdroj].....	85
11.3	Deformační křivka vzorku č. 18 degradovaného PLA [vlastní zdroj].....	85
11.3	Deformační křivka vzorku č. 19 degradovaného PLA [vlastní zdroj].....	86
11.3	Deformační křivka vzorku č. 20 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj].....	87
11.3	Deformační křivka vzorku č. 21 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj].....	87
11.3	Deformační křivka vzorku č. 22 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj].....	88

11.3 Deformační křivka vzorku č. 23 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj].....	88
11.3 Deformační křivka vzorku č. 24 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj].....	89
11.3 Deformační křivka vzorku č. 25 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj].....	89
11.3 Deformační křivka vzorku č. 26 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj].....	90
11.3 Deformační křivka vzorku č. 27 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj].....	90
11.3 Deformační křivka vzorku č. 28 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	91
11.3 Deformační křivka vzorku č. 29 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	91
11.3 Deformační křivka vzorku č. 30 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	92
11.3 Deformační křivka vzorku č. 31 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	92
11.3 Deformační křivka vzorku č. 32 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	93
11.3 Deformační křivka vzorku č. 33 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	93
11.3 Deformační křivka vzorku č. 34 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	94
11.3 Deformační křivka vzorku č. 35 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	94
11.3 Deformační křivka vzorku č. 36 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	95
11.3 Deformační křivka vzorku č. 37 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj] .....	95

# SEZNAM TABULEK

2.1	Vlastnosti SLA tisku [50].....	16
2.2	Vlastnosti FDM tisku [8].....	18
2.3	Vlastnosti SLS tisku [8] .....	19
3.1	Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PLA [14, 15] .....	21
3.2	Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PET [18, 19].....	22
3.3	Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PETG [22, 23].....	23
3.4	Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PA6 [27, 28].....	24
3.5	Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PA6 CF15 [30, 31].....	25
7.1	Vlastnosti výrobních metod při zvolených kritériích .....	37
7.2	Preference zvolených kritérií a jejich výsledné váhy .....	38
7.3	Výsledné váhy zvolených metod při uvažování ceny za unikátní kus .....	38
7.4	Výsledné váhy zvolených metod při uvažování flexibility výroby .....	38
7.5	Výsledné váhy zvolených metod při uvažování rychlosti výroby .....	38
7.6	Výsledné váhy zvolených metod při uvažování míry automatizace.....	39
7.7	Výsledné váhy zvolených metod při uvažování výsledné kvality dílu.....	39
7.8	Výsledné váhy zvolených metod při uvažování ceny za unikátní kus .....	39
9.1	Typické hodnoty důležitých mechanických vlastností a fyzikálních veličin PLA a PA6 CF15 a nastavené parametry tisku pro tyto materiály [14, 15, 30, 31] .....	44
9.2	Celková hodnota GHI za jeden den ve zvolených lokacích [45].....	45
10.1	Naměřené hodnoty kinetické energie potřebné k přeražení vzorků z PLA bez degradace.....	51
10.2	Naměřené hodnoty kinetické energie potřebné k přeražení vzorků z PLA po 1,5 měsíci degradace v UV komoře.....	52
10.3	Naměřené hodnoty kinetické energie potřebné k přeražení vzorků z nylon-karbonu bez degradace.....	52
10.4	Naměřené hodnoty kinetické energie potřebné k přeražení vzorků z nylon-karbonu po 1,5 měsíci degradace v UV komoře.....	53
10.5	Naměřené hodnoty tvrdosti nedegradovaných PLA vzorků.....	56
10.6	Naměřené hodnoty tvrdosti PLA vzorků degradovaných po dobu 1,5 měsíce v UV komoře.....	57
10.7	Naměřené hodnoty tvrdosti nedegradovaných vzorků z nylon-karbonu .....	57
10.8	Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků z nylon-karbonu degradovaných po dobu 1,5 měsíce v UV komoře .....	58
10.9	Naměřené hodnoty tahové zkoušky nedegradovaných PLA vzorků .....	62
10.10	Naměřené hodnoty tahové zkoušky degradovaných PLA vzorků.....	62
10.11	Naměřené hodnoty tahové zkoušky nedegradovaných PACF vzorků.....	63
10.12	Naměřené hodnoty tahové zkoušky degradovaných PACF vzorků .....	63
10.13	Srovnání průměrných naměřených hodnot tahové zkoušky nedegradovaných i degradovaných vzorků z PLA a PACF.....	63

# ÚVOD

Technologie 3D tisku je v dnešní době velice oblíbená a populární metoda výroby. To napomáhá jejímu neustálému vývoji a pokrokům v technologii 3D tisku. Jedná se o technologii, která se postupem času dostává do stále více odvětví průmyslu a chlubí se také velkou oblíbeností v domácnostech, jelikož se jedná o velmi dostupnou metodu kusové výroby vlastních dílů. Vhodnost malosériové výroby 3D tisku lze využít i pro výrobu prototypů, kde je potřeba častého iterování, nebo například pro rychlé a snadné opravy obtížně dostupných dílů. Pro velkosériovou výrobu ale má 3D tisk stále omezené uplatnění, a to zejména díky svému velmi dlouhému výrobnímu procesu. V dnešní době je kladen stále větší důraz na ekologii a minimalizaci plastového odpadu. V tomto ohledu je dobrou vlastností 3D tisku skutečnost, že se jedná o aditivní technologii, což vede k minimalizaci přebytečného odpadního materiálu.

Tato práce se bude věnovat nejrozšířenějším metodám této aditivní technologie výroby. Popsány budou také některé materiály, které 3D tisk využívá. U materiálů je důležité znát jejich typické vlastnosti a oblasti, kde se běžně využívají. Pozornost však bude věnována i jejich procesu výroby.

Každý materiál má také různou odolnost vůči okolním vlivům, které degradují jak jeho mechanické vlastnosti, tak často i vzhled. Nejběžnějšími vlivy okolí, se kterými se zhotovené výrobky setkávají, jsou UV záření, vlhkost a změny teploty. Z tohoto důvodu bude zhotovena rešerše právě i na toto téma a budou popsány i metody, pomocí kterých lze měřit vybrané mechanické vlastnosti materiálů.

Jak již bylo zmíněno výše, tak 3D tisk má, stejně jako všechny ostatní výrobní metody, své výhody a omezení. Při volbě vhodné výrobní metody je tedy nutno udělat kompromis při zvažování několika kritérií. Možný postup při výběru vhodné technologie výroby bude taktéž v práci popsán.

# 1. OBECNÉ INFORMACE O 3D TISKU

Tato kapitola slouží jako velmi stručný úvod k technologii 3D tisku. Jsou zde vypsány hlavní výhody a nevýhody 3D tisku. Dále tato kapitola popisuje proces vytvoření vstupního souboru pro 3D tiskárnu.

## 1.1 Co je to 3D tisk

3D tisk je relativně mladá výrobní metoda jejíž historie se datuje do 80. let minulého století, kdy byla využívána jako způsob rychlého prototypování ve výrobě. První vynalezenou metodou 3D tisku byla stereolitografie. 3D tisk je aditivní technologie, což znamená, že materiál je vytvrzován/nanášen na definovaná místa po jednotlivých vrstvách. Tímto způsobem můžeme minimalizovat množství materiálu, který bude použit. Jediným přebytečným materiálem, který může u 3D tisku vznikat, jsou podpory. Ty jsou potřeba v případech, že vybraný model obsahuje převisy, protože jak z principu fungování 3D tiskárny vyplývá, tak není možno tisknout „do vzduchu“ a je tedy nutno podpory použít. Minimalizace přebytečného materiálu je velkou výhodou aditivních technologií v porovnání se subtraktivními metodami výroby jako je frézování, soustružení a mnoho dalších. [1]

Další výhodou 3D tisku je možnost vytvářet komplexní tvary, které se klasickými metodami vyrábí obtížně. Jako příkladem mohou být dutá tělesa nebo modely, které mají složité tunely a výřezy uvnitř jejich objemu. Avšak musí se dbát na skutečnost, že je ve většině případů nutné vytisknout i podpory pro všechny převisy, které jsou pod větším úhlem, než pro jaký je tiskárna schopna tisknout bez podpory. To však neplatí pro SLS technologii, která podpory nepotřebuje. U ní je ale na druhou stranu nutné vytvořit otvory pro odvod přebytečného práškového materiálu. 3D tisk je velice užitečný pro malosériovou výrobu nebo výrobu, kde je každý výrobek unikátní, jako třeba protézy v medicíně, protože například výroba formy pro injekční vstřikování by vyšla několikanásobně draž.

## 1.2 Postup výroby modelu pomocí 3D tiskárny

Prvotním krokem 3D tisku je návrh samotného modelu. K tomu lze využít nespočet modelovacích programů, které dnes existují. Jako příkladem mohou být CAD programy jako Solidworks, Autodesk Inventor, které jsou vhodné pro návrh přesných modelů použitelných v technické praxi. Dalším typem modelovacího softwaru jsou programy pracující s polygonovou strukturou modelů jako jsou například Autodesk Maya nebo Blender. Tyto programy lze použít i pro výrobu modelů s přesnými geometrickými parametry, jsou ale daleko vhodnější pro modelování dekorativních výrobků.

Následně je potřeba model exportovat do formátů podporovaných vybraným slicer programem. Většinou se exportuje buď do formátu .stl, který obsahuje informace pouze

o geometrii modelu, nebo .3mf, což je formát obsahující navíc i informace o nastavení slicer programu, rozměrovou jednotku scény, informace o barvě nebo textuře atd. Tento soubor je poté zpracován slicer programem jako třeba Prusa Slicer či Ultimaker Cura. Tyto programy na základě .stl souboru vytvoří soubory s příponou .gcode pro metodu FDM, kdy je popsána trajektorie pohybu tiskové hlavy, resp. jiných formátů, které obsahují masky pro osvětlení jednotlivých vrstev využitelných v SLA. Slicer programy umožňují nastavit velké množství parametrů ovlivňující tisk jako třeba výška vrstvy, typ podpor nebo výplně modelu. [2]

## 2. METODY 3D TISKU

V této kapitole jsou rozepsány tři základní technologie 3D tisku. Tato kapitola přibližuje princip fungování jednotlivých druhů 3D tiskáren, seznamuje čtenáře s typy materiálů, které metody vyžadují a také se věnuje výhodám a nevýhodám těchto metod.

### 2.1 Fotopolymerizace

Nejběžnější fotopolymerizační metodou 3D tisku je SLA (stereolitografie). Její princip spočívá ve vytvrzení resinu pomocí osvětlení UV laserem. Tisk probíhá v nádobě naplněné fotocitlivým resinem. Resin, neboli syntetické pryskyřice, jsou fotopolymerní materiály, které lze vytvrdit účinkem UV záření. Rozdělujeme je do několika skupin, a to akrylátové nebo epoxidové pryskyřice, ale také pryskyřice s výplněmi. Těmi mohou být například kovy či organické materiály. Pomocí těchto výplní lze upravit požadované vlastnosti materiálu. Výhodami stereolitografie jsou její velké rozlišení, které je teoreticky dáno velikostí polymerní molekuly, ale prakticky průměrem laseru, hladkost povrchu, vodotěsnost modelů a rychlost tisku, která závisí pouze na rychlosti vychylování laserového paprsku. [3]

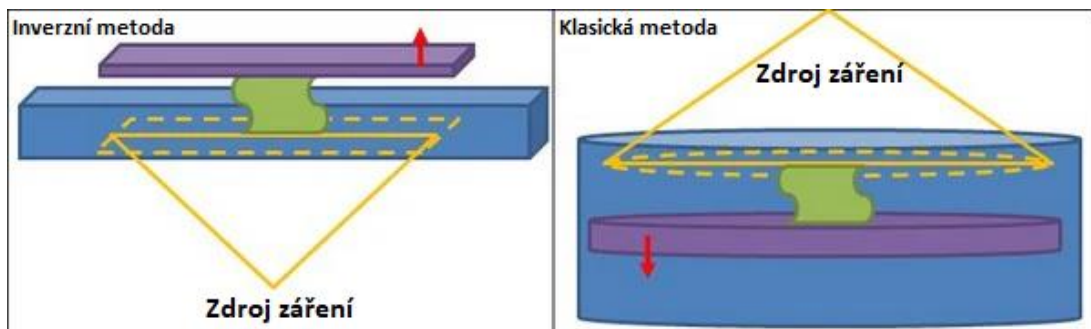
Podle pohybu základové desky lze SLA rozdělit na dvě dílčí metody. Při klasickém SLA je model osvětčován shora a základová deska se vždy posune o vzdálenost rovnou výšce jedné vrstvy dolů, takže je mezi nejvrchnější částí modelu a hladinou resinu právě tato vzdálenost (tzv. top down SLA). Při tisku dutých těles může resin zůstat uvnitř modelu a je ho tedy potřeba následně odstranit. To se nejčastěji řeší zakomponováním tzv. únikových otvorů do modelu, pomocí kterých může přebytečný resin odtéct ven. [4]

Inverzní SLA funguje tak, že deska je posouvána naopak směrem nahoru a laser je umístěn pod nádobou. Výška jedné vrstvy se poté promítne jako vzdálenost nejspodnější části modelu a dna nádoby s resinem (tzv. bottom up SLA). [4]

Podobnou metodou využívající fotopolymerizaci je DLP (digital light processing), ta funguje na stejném principu jako SLA pouze s tím rozdílem, že namísto laserového paprsku je resin vytvrzován pomocí obrazu z projektoru. Každá vrstva je tedy vytvrzena v jednom časovém okamžiku, což má za následek kratší dobu výroby. Na druhou stranu je ale rozlišení této metody omezeno rozlišením projektoru a tedy velikostí jednotlivých pixelů, zatímco u SLA je rozlišení omezeno pouze průměrem laserového paprsku. Při SLA metodě můžeme pomocí plynulého pohybu laseru vytvářet i hladké zaoblené tvary, což u DLP nejde, jelikož pracujeme s bitmapovými obrazy. [5]

Tabulka 2.1 Vlastnosti SLA tisku [50]

metoda	SLA
princip tisku	UV vytvrzení resinu
materiály	fotocitlivý resin
tisk pohyblivých částí	ne
potřeba podpor	ano
výška vrstvy	0,05 - 0,15 mm



Obrázek 2.1 Porovnání inverzní a klasické metody SLA 3D tisku [49]

## 2.2 Fused deposition modeling – FDM

Fused deposition modeling je metoda 3D tisku využívající jako tiskový materiál termoplasty zpracované do formy tenkých strun. Průměr těchto strun závisí na průměru tiskové hlavice. Pohyb této hlavice musí být oproti základové desce či rovině zaručený ve všech 3 osách, čehož je docíleno buď nezávislým pohybem samotné hlavice pomocí motorů v každé ose, nebo různým kombinováním pohybu hlavice a základové desky. Existují ale i jiné technické řešení pohybu tiskové hlavice jako jsou třeba tzv. delta tiskárny, kdy je hlavice připevněná pomocí tří (může být i více, ale to je velmi neobvyklé) ramen. Přesné polohování hlavice je docíleno korigováním jejich výšky upevnění v rámu. Z tohoto principu funkce je zřejmé, že je možné vyrobit FDM tiskárny s širokým rozsahem různých parametrů, ať už se jedná o průměr tiskové hlavice, tak i rozměry samotné tiskárny. Klasické komerčně dostupné tiskárny mají maximální rozměry modelu řádově několik desítek centimetrů v každé ose. Vyrobeny byly ale i takové tiskárny, které byly využity pro tisk domu či trupu lodi. [6]

U FDM tisku je velmi důležitá kalibrace tiskové základny, to znamená, že ať už se tisková hlavice nachází v jakékoliv poloze na rovině xy, tak musí být od tiskové základny vzdálená vždy o stejnou vzdálenost, jinak by mohlo dojít ke zkosení modelu a v horším případě i k tomu, že by hlavice narazila do již vytisknuté části modelu. Důležitým parametrem FDM tiskárny je průměr hlavice, kdy s větším průměrem můžeme dosáhnout

rychlejších tisků (zde závisí i na hodnotě výšky vrstvy) a také větší pevnosti hotových modelů, avšak za cenu horší výsledné povrchové úpravy výrobku. [7]

Dále existují nastavitelné parametry samotného tiskového procesu. Těmi jsou teplota tiskové základny, která ovlivňuje přilnavost modelu k základně, ale také omezuje zvlnění modelu po tisku. Dalším procesním parametrem je teplota tiskové hlavičky, jež má vliv na výslednou mikrostrukturu materiálu a tím i mechanické vlastnosti modelu. [7]

Materiály využívané při FDM tisku jsou nejčastěji termoplasty obohacené o různé příměsi ovlivňující jejich konečné parametry. I když mohou mít používané materiály velkou izotropnost vlastností, tak při tisku pomocí FDM vždy silně závisí na rovině tisku a výsledné modely mají velice anizotropní charakter.



Obrázek 2.2 FDM delta 3D tiskárna Flsun Super Racer (vlevo) [50]

Obrázek 2.3 FDM 3D tiskárna Creality Ender 3 S1 (vpravo) [51]

Tabulka 2.2 Vlastnosti FDM tisku [8]

metoda	FDM
princip tisku	tažení roztaveného vlákna
materiály	termoplasty ve formě vláken
tisk pohyblivých částí	obtížnější (menší přesnost)
potřeba podpor	ano
výška vrstvy	0,1 - 0,3 mm

### 2.3 Selective laser sintering – SLS

Selective laser sintering je technologie 3D tisku založená na principu slinování práškového materiálu pomocí výkonových laserů. SLS tiskárna obsahuje dvě nádoby – jednu tiskovou a druhou sloužící jako zásobník tiskového materiálu. Při tisku každé vrstvy je základová deska snížena o výšku právě jedné vrstvy a ze zásobníkové nádoby je do tiskové přiveden práškový materiál, který je poté rovnoměrně rozprostřen po celé ploše. Následně je paprsek výkonného laseru vychylován podle předdefinované trajektorie a slinováním materiálu tak vytváří jednu vrstvu modelu. Přebytečný materiál v tiskové nádobě zůstane. Po dokončení tisku je potřeba nechat model vychladit a poté očistit od přebývajícího materiálu, který je možno použít pro další tisk a tím zamezit zbytečnému plýtvání materiálu. [7]

Největší výhodou této metody je skutečnost, že není potřeba tisku žádných dodatečných podpor a neslinutý materiál lze použít znovu při dalším tisku, takže je ušetřeno maximální množství tiskového materiálu. Toho je docíleno tím, že v nádobě zůstává i ta část materiálu, která není slinována, a ta funguje právě jako podpora. Další výhodou SLS technologie je velmi velká izotropnost vlastností výsledných modelů díky skvělé mezivrstvé pevnosti. Rozlišení výsledného tisknutého vrstevového obrazce je dáno průměrem laseru, ale může se stát, že při velkém výkonu paprsku dojde ke slnutí materiálu i v blízkém okolí paprsku vlivem odvodu tepla uvnitř materiálu. Tato metoda má podobnou nevýhodu jako klasické SLA – tj. nutnost odstranění přebytečného práškového materiálu při tisku dutých těles (viz obrázek 2.4). [9]



Obrázek 2.4 Čištění dílu vyrobeného pomocí SLS od přebytečného práškového materiálu [52]

Tabulka 2.3 Vlastnosti SLS tisku [8]

<b>metoda</b>	<b>SLS</b>
princip tisku	Slinutí materiálu laserem
materiály	slinovatelné práškové polymery
tisk pohyblivých částí	snadný
potřeba podpor	ne
výška vrstvy	0,06 - 0,15 mm

## 3. MATERIÁLY PRO 3D TISK

Při 3D tisku lze využít mnoho různých materiálů. Tato kapitola se věnuje několika z nich. Popisuje proces výroby těchto materiálů, jejich vlastnosti a oblasti průmyslu, kde jsou v dnešní době využívány. Vybranými zástupci materiálů vhodných pro FDM tisk jsou PLA, PET a jeho glykolová modifikace PETG, obyčejný nylon a také nylon obohacený uhlíkovými vlákny.

### 3.1 Kyselina polymléčná – PLA

Kyselina polymléčná neboli polylaktid (PLA) je jedním z nejrozšířenějších materiálů pro 3D tisk. Je velmi vhodný pro FDM metodu díky své nenáročnosti tisku. Vyžaduje malou teplotu při vytahování a zároveň nepotřebuje ohřev tiskové základny při tisku. PLA je tzv. bioplast – tj. plastová hmota vyrobená z biomasy

Základem PLA je monomer kyseliny mléčné. Existují dvě základní metody pro výrobu tohoto monomeru. První je chemická syntéza a druhá je založena na principu fermentace. Podle bakterií, které jsou využívány, lze proces fermentace, neboli kvašení, rozdělit na dva druhy: homofermentativní a heterofermentativní. Využívanějším je homofermentativní proces, jelikož při něm dochází ke vzniku menšího množství vedlejších produktů. Živiny pro využívané bakterie mohou být například glukóza získaná z kukuřičného škrobu nebo také jiné jednoduché cukry. Následně musí být kyselina mléčná zbavena nečistot pomocí metod jako třeba destilace. [10]

Existuje řada způsobů jak z kyseliny mléčné vytvořit PLA – přímá polykondenzace, přímá polykondenzace v azeotropní směsi nebo polymerizace laktidu. K výrobě PLA s vyhovujícími mechanickými vlastnostmi je výhodné použít proces, při kterém lze dosáhnout vysoké molekulové hmotnosti. Dnes nejpoužívanější výrobní metoda využívá otevírání laktidových kruhů kyseliny mléčné a jejich následné řetězení (tedy polymerizaci). [10, 11]

PLA je označován jako biodegradibilní materiál, avšak to neznamená, že je vhodné materiál vyhodit do přírody s představou, že se během krátké doby rozloží. Rozložení PLA totiž při běžných podmínkách může zabrat okolo 80 let. Tento proces lze ale mnohonásobně urychlit při udržování správných podmínek jako jsou vysoká teplota, velká vlhkost okolí a dostatečné množství vhodných mikroorganismů nutných k rozkladu. Z toho vyplývá, že PLA je rozložitelné v rozumné době pouze při průmyslovém kompostování. [10]

Nevýhodou PLA je malá teplota skelného přechodu (cca 60 °C). To znamená, že díly vyrobené z tohoto materiálu nejsou vhodné na aplikace vyžadující velkou tepelnou odolnost. Teplota skelného přechodu vymezuje bod (nebo úzké rozmezí teplot), při kterém dochází u materiálu ke přechodu z tvrdého sklovitého stavu do měkkého kaučukového stavu. Mechanické vlastnosti PLA mohou být zhoršeny také UV zářením.

PLA z těchto důvodů není tedy nejvhodnějším materiálem pro výrobky, které by měly dlouhodobě odolávat přímému slunečnímu záření. [12, 13]

PLA je díky své nevysoké ceně a ekologické stopě v dnešní době hojně využívaný materiál. Využívá se v lékařském průmyslu například pro implantáty nebo vlákna pro stehy. PLA je vhodné také pro výrobu vláken, v této formě se uplatňuje v automobilním průmyslu nebo pro výrobu různých látek. PLA je využíváno také v obalovém průmyslu, avšak jeho použití je zde limitováno právě malou teplotní odolností. [12]

Makromolekuly PLA mají lineární strukturu, což znamená, že se skládají z monomerních jednotek se dvěma funkčními skupinami. Tvar makromolekul může být také rozvětvený nebo sesíťovaný a do jisté míry určuje vlastnosti materiálu. Materiály s lineární strukturou mají například obvykle vyšší pevnost, větší teplotní odolnost, nižší tažnost, atd. než materiály s rozvětvenými makromolekulami. U materiálů se sesíťovanými makromolekulami velmi závisí na hustotě sítě. Experimentálně je možno strukturu materiálu zjistit několika způsoby, jedním z nich je například mikroskopie (zejména elektronová nebo využívající atomových sil). [13]

Tabulka 3.1 Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PLA [14, 15]

materiál	PLA
teplota trysky [°C]	190-220
teplota podložky [°C]	35-60
chlazení [%]	100
potřeba uzavřené komory	ne
pevnost v tahu [MPa]	70
houževnatost [kJ·m <sup>-2</sup> ]	3,4
tvrdost [H <sub>SD</sub> ]	83
hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	1,24

### 3.2 Polyethyltereftalát – PET

PET je zkratka pro materiál nazývaný polyethyltereftalát. PET spadá do kategorie polyesterů. Tento materiál je nejvíce známý pro své použití v oblasti balícího průmyslu jako nádoby pro nápoje, potraviny či ostatní domácí potřeby jako oleje, mýdla atd. Z tohoto vyplývá, že PET je fyziologicky nezávadný s dobrou chemickou odolností.

Výroba PET spočívá v esterifikaci ethylenglykolu s kyselinou tereftalovou. Výsledkem jsou tenké a dlouhé struny, které jsou za tepla vytahovány a následně hned rychle chlazeny. Posléze jsou nařezány na malé pelety, ty jsou roztaveny a z této taveniny jsou vyráběny PET výrobky všemožných tvarů, včetně filamentu pro FDM tiskárny. [12]

Tento materiál se vyznačuje svou dobrou chemickou odolností a malou navlhavostí, což jej činí vhodným materiálem právě pro vodotěsné nádoby. Avšak je nutné dbát na to, že při FDM tisku může dojít ke vzniku vzduchových mezer mezi jednotlivými vrstvami.

Dalšími vlastnostmi materiálu PET jsou vysoká mechanická pevnost, tvrdost a tuhost a dobré elektroizolační vlastnosti. [13]

PET je kompletně recyklovatelný materiál a také se jedná o nejvíce recyklovaný plast na světě. Recyklace probíhá buď omytím výrobku a jeho následným roztavením, nebo pomocí chemických reakcí, které rozloží PET zpět na dílčí materiály, ze kterých lze opětovně PET vytvořit. [16]

3D tisknutí s PET je doporučováno v uzavřené komoře z důvodu zlepšení rovnoměrnosti rozložení teploty a tím snížení míry zvlnění modelu při tisku. I když se PET vyznačuje malou navlhavostí, tak by filament měl být skladován v co nejsušším prostředí, aby nedošlo ke zhoršení vlastností materiálu při procesu samotného tisku. Dále by měla být nastavena nižší rychlost pohybu tiskové hlavičky, aby měl již vytažený materiál čas vychladnout. Výsledný model by se měl nechat na alespoň 4 hodiny po vytisknutí vychladnout. [17]

Stejně jako PLA má i PET lineární strukturu makromolekul. I v tomto případě to tedy materiálu dodává relativně vysokou pevnost v tahu nebo tuhost. [13]

Tabulka 3.2 Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PET [18, 19]

materiál	PET
teplota trysky [°C]	190-230
teplota podložky [°C]	40-80
chlazení [%]	20-100
potřeba uzavřené komory	ne
pevnost v tahu [MPa]	70
houževnatost [kJ·m <sup>-2</sup> ]	1,7
tvrdost [H <sub>SD</sub> ]	75,3
hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	1,34

### 3.3 Glykolem modifikovaný polyethyltereftalát – PETG

PETG je, jak již z názvu vyplývá, upravená verze materiálu PET. Písmeno G v názvu znamená, že se jedná o polyethyltereftalát modifikovaný glykolem. Při výrobním procesu je etylenglykol nahrazen cyklohexandimethanolem, ten ovlivňuje strukturu výsledného materiálu a mění některé jeho vlastnosti. To má ale vliv i na to, že je PETG pouze z části recyklovatelný (cca z 67 %) na rozdíl od PET, které je recyklovatelné 100%. Tvar makromolekul však zůstává pořád lineární (stejně jako v případě PET). [20]

Glykolová modifikace má za následek změnu struktury ze semikrystalické, kterou má PET, na amorfni, což zmenšuje jeho křehkost a činí jej ohebnějším. Amorfni struktura znamená, že jsou částice uvnitř materiálu na velké vzdálenosti uspořádány náhodně a samotný materiál vykazuje izotropnost, má tedy vlastnosti stejné ve všech směrech. To však nemá na izotropnost vlastností výsledného modelu při tisku pomocí FDM velký

vliv. PETG je oproti PET vhodnější pro 3D tisk, protože vlivem právě amorfni struktury nedochází k tak výraznému zvlnění při změně teplot. [20]

Vzhledem k velké mezivrstvé pevnosti při tisku u PETG se může stát, že podpory budou držet až moc pevně k samotnému modelu a při jejich generování je vhodné mít tuto skutečnost na paměti. Stejně jako u PET je vhodné filament skladovat v prostředí s co nejmenší vlhkostí nebo jej před použitím vysušit. Dále má PETG v porovnání s PET menší pevnost v tahu, ale na druhou stranu větší odolnost při nárazu. [21]

Tabulka 3.3 Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PETG [22, 23]

materiál	PETG
teplota trysky [°C]	235-250
teplota podložky [°C]	80
chlazení [%]	0-60
potřeba uzavřené komory	ne
pevnost v tahu [MPa]	50
houževnatost [kJ·m <sup>-2</sup> ]	8,1
tvrdost [H <sub>SD</sub> ]	74,4
hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	1,27

### 3.4 Nylon

Nylon je označení pro celou řadu materiálů spadajících do skupiny polyamidů. Jednotlivé druhy nylonu se od sebe odlišují například výrobním procesem nebo příměsemi, které obsahují. Těmito příměsemi mohou být třeba sklo či uhlíková vlákna. Prvním druhem nylonu, který byl vynalezen, je materiál s označením nylon 6-6 (PA6-6). Označení vyplývá z toho, že se tento druh vyrábí polykondenzací kyseliny adipové a hexamethylendiaminu, což jsou monomery, které obsahují oba 6 atomů uhlíku. Vedlejším produktem této reakce jsou molekuly vody, které musí být odváděny pryč, protože jejich přítomnost zabraňuje pokračování reakce. Nylon se pro 3D tisk vyrábí ve formě strunových filamentů pro FDM nebo práškového polymeru pro SLS. [24]

Stejně jako ve všech výše uvedených případech má i nylon lineární tvar svých makromolekul, což mu opět propůjčuje podobné vlastnosti jako výše zmíněným materiálům. [13]

Nejpoužívanější nylonový filament pro FDM tisk je PA6. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho vyšší absorpce vlhkosti a je tedy nutné jej uschovávat v prostředí s co nejmenší vlhkostí, stejně jako PET a PETG. Dalšími významnými vlastnostmi jsou dobrá ohebnost a velká pevnost a tvrdost. PA6 má také dobrou odolnost proti otěru a nízký koeficient tření. Při tisku s PA6 je potřeba mít tiskárnu vybavenou vyhřívanou tiskovou základnou z důvodu špatné přilnavosti materiálu k základně. [25]

SLS metoda 3D tisku je pro nylon vhodnější než FDM. Pro SLS tisk jsou nejrozšířenějšími typy nylonu PA11 a PA12. Polyamid 11 je vyráběn z ricinového oleje, což je obnovitelný zdroj, zatímco polyamid 12 se vyrábí z ropy. PA11 je materiál, který má výbornou teplotní odolnost, ohebnost a je oproti PA12 stabilnější při působení vnějších degračních jevů jako UV záření či počasí. PA12 dokáže vystát velmi nízké teploty a je velmi odolný vůči praskání. [26]

Nylon se díky svému nízkému koeficientu tření a velké otěruvzdornosti používá k výrobě pantů, ozubených kol, interiérových částí v automobilu. Jedná se ale také o biokompatibilní materiál, což znamená, že je nezávadný při kontaktu se živou tkání, to jej činí vhodným pro výrobu protéz. [25]

Tabulka 3.4 Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PA6 [27, 28]

materiál	nylon PA6
teplota trysky [°C]	250-280
teplota podložky [°C]	85-100
chlazení [%]	0-30
potřeba uzavřené komory	doporučeno
pevnost v tahu [MPa]	67
houževnatost [kJ·m <sup>-2</sup> ]	6,8
tvrdost [H <sub>SD</sub> ]	70
hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	1,15

### 3.5 Nylon-karbon – PA6 CF15

Název PA6 CF15 znamená, že se jedná o materiál PA6, který je z 15 % vyplněn nasekanými uhlíkovými vlákny. Modifikace pomocí uhlíkových vláken poskytuje tomuto materiálu zlepšení mnoha vlastností v porovnání s obyčejným polyamidem 6.

Z datasheetu pro tento materiál lze vyčíst, že oproti nemodifikované variantě nabízí tento materiál výrazně větší mechanickou pevnost. Pro proces 3D tisku je velmi výhodným zlepšením také to, že je tento materiál o polovinu méně navlhavý a absorpce vody je čtyřnásobně menší (opět v porovnání s klasickým PA6). Přesto je však uvedeno, že je nutno uchovávat PA6 CF15 v suchém prostředí a případně jej před tiskem vysušit, jestli došlo k jeho navlhnutí. Výplň z uhlíkových vláken dodává materiálu větší teplotní objemovou stabilitu, čímž je minimalizováno zvlnění při tisku a je tak zlepšena reprodukovatelnost výroby. S tímto souvisí i doporučení vyhřívání komory pro tisk, která v tomto případě není potřebná, ale v případě nemodifikovaného PA6 doporučená je. [29, 30]

Tabulka 3.5 Typické parametry tisku a hodnoty mechanických veličin pro PA6 CF15 [30, 31]

<b>materiál</b>	<b>nylon-karbon PA6 CF15</b>
teplota trysky [°C]	270
teplota podložky [°C]	100
chlazení [%]	0-10
potřeba uzavřené komory	ne
pevnost v tahu [MPa]	170
houževnatost [kJ·m <sup>-2</sup> ]	6,5
tvrdost [H <sub>SD</sub> ]	72,6
hustota [g·cm <sup>-3</sup> ]	1,25

## 4. KLASICKÉ METODY VÝROBY POLYMERNÍCH DÍLŮ

3D tisk je relativně novou metodou výroby a také má v průmyslu pouze omezené využití. Tato kapitola se tedy věnuje ostatním metodám výroby polymerních dílů využívaných v průmyslu. Pro každou metodu je popsán výrobní proces a jsou vypsány její výhody a nevýhody.

### 4.1 Vstřikování

Vstřikování je jednou z nejpoužívanějších technologií pro výrobu polymerních dílů. Součásti vyrobené pomocí vstřikování mají vysokou tvarovou a rozměrovou přesnost a dobrou kvalitu povrchu. Základními částmi vstřikovacího stroje jsou: násypka, šnekový dopravník, tavící (plastifikační) komora, tryska, forma (tvárnice + tvárník). [32]

Materiál pro vstřikování ve formě granulí je nasypán do násypky. Část granulátu je následně odebrána pomocí šnekového dopravníku z násypky a je tlačena přes tavící komoru, kde je granulát roztaven a homogenizován. Tavenina zaplňuje prostor před tryskou a s dalším otáčením šnekového dopravníku se v této části zvyšuje tlak. Při správném tlaku je tryska otevřena, tavenina je vstřikována do formy a zaplňuje celý její objem. Po vychladnutí je možno formu otevřít, odstranit výrobek a celý proces cyklicky opakovat. [33]

Tlak před tryskou je nutné nastavit na přesně definovanou hodnotu, aby došlo k co nejkvalitnějšímu konečnému výrobku. Tlakem se totiž koriguje i rychlost, kterou je přes trysku tavenina tlačena. Při příliš velkém tlaku může dojít ke zvýšení teploty nad vhodnou úroveň a tím i k degradaci materiálu. Na druhou stranu ale při malém tlaku může dojít k přílišnému ochlazení a tím i tuhnutí materiálu před vstřikem do formy. [34]

Vstřikování je velmi vhodné pro velkosériovou výrobu. Vstřikovací stroje, ale také samotné formy, jsou velice finančně nákladné. Výrobní cyklus je velmi krátký a zcela automatizovaný, což znamená maximalizování počtu vyrobených dílů. Další faktor, který má vliv na cenu vstřikovaných dílů je typ použitého granulátu. [34]

### 4.2 Odlévání

Odlévání je velmi technologicky nenáročný způsob výroby polymerních dílů. Odlévání lze z technologického hlediska rozdělit na 3 druhy: statické, rotační a odstředivé. [35]

Statické odlévání je technologicky nejjednodušší z metod odlévání. Formy jsou nepohyblivé a jsou ohřívány na teplotu určenou podle použitého materiálu. Na odlévaný materiál působí pouze hydrostatický tlak. Pro dosažení nejlepší kvality konečného odlitku je tedy potřeba použít co nejvíce tekutý materiál, aby se co nejlépe zaplnila celá forma. Jakmile se forma zaplní, tak je nutno počkat na ztuhnutí materiálu, než bude možno odlitek z formy odstranit. Tato metoda je vhodná pro výrobu plných těles. [34]

Druhou metodou je rotační odlévání. Forma je naplněna přesně daným množstvím materiálu a je vložena do vyhřívané komory. V ní je forma uchycena do stroje, který s ní otáčí nejčastěji kolem dvou navzájem kolmých os. Otáčky jsou při této metodě nízké (méně než cca 50 ot./min) a bývají jiné na různých osách. Gravitační síla je v této metodě větší než odstředivá síla. Dalším krokem je ochlazení formy, která stále rotuje. Doba trvání procesu výroby závisí zejména na tloušťce stěny výrobku. Rotační metoda se využívá pro výrobu dutých těles. [34]

Poslední metodou je odstředivé odlévání. Ta funguje na podobném principu jako rotační odlévání s tím rozdílem, že je formou otáčeno pouze kolem jedné osy. Otáčky jsou zároveň při odstředivém odlévání mnohonásobně větší (až 1500 ot./min). Odstředivá síla je u této metody větší než gravitační. Stejně jako rotační odlévání je odstředivé vhodné pro výrobu dutých dílů. [34]

Odlévání je výrobní metoda, která má poměrně dlouhou dobu jednoho výrobního cyklu a hodí se tedy zejména pro malosériovou a kusovou výrobu. Výhodou odlévání je konstrukční jednoduchost strojů a forem a tím i jejich malá finanční nákladnost. [33]

### 4.3 Lisování

Lisování je jedním z nejstarších technologických procesů pro výrobu plastových dílů. Podle toho, jestli se při lisování používá tlak vyšší nebo nižší jako 3,5 MPa, tak lze lisování rozdělit na nízkotlaké a vysokotlaké. [34]

Prvním krokem při lisování je naplnění formy požadovaným materiálem. Materiál je nejčastěji ve formě tablet, prášku atd. Část formy je vyhřívaná, aby došlo k plastifikaci materiálu. Následně tvárník definovaným tlakem působí na materiál a ten poté zaplní celý objem formy. Objem materiálu se volí větší, než je objem výsledného dílu, aby se zaručilo stoprocentní zaplnění objemu formy. To má ale za následek vytvoření tzv. přetoků, neboli přebytečného materiálu vyplňujícího mezeru mezi formou a tvárníkem. [33, 34]

Na podobném principu jako lisování funguje i přetlačování, jen s tím rozdílem, že se materiál nekládá přímo do formy, ale do pomocné komory. Stejně jako u lisování se používá větší objem materiálu, než je objem výsledné součásti. Díly vyrobené pomocí přetlačování neobsahují přetoky, ale část materiálu zůstává v již zmíněné pomocné komoře a ten je také nutné po výrobním procesu z dílu odstranit. [33, 34]

Doba výrobního cyklu při lisování může být relativně krátká, záleží však na mnoha faktorech jako například použitém materiálu, velikosti výrobku, způsobu chlazení, aj. Produktivitu lze zvýšit využitím forem navržených pro výrobu více kusů najednou. Lisování lze tedy využít pro velkosériovou výrobu. V dnešní době je však lisování nahrazováno vstřikováním díky mnoha výhodám jako zejména výrazně kratšímu výrobnímu cyklu. [33]

## 4.4 Vyfukování

Vyfukování je technologie využívaná pro výrobu dutých těles. Při vyfukování je zapotřebí tzv. předlisků, což jsou polotovary vyráběné nejčastěji vytlačováním nebo vstřikováním.

Předlisek je vložen do vyfukovací formy a je nutno ho zahřát na takovou teplotu, aby se materiál dostal do plastického stavu. Do předlisku je poté pomocí trysky tlačěn plyn, čímž se předlisek roztáhne a vyplní tvar formy. Podle způsobu, jakým je předlisek vyroben, se vyfukování dělí na vytlačovací a vstřikovací. [33]

Vytlačovací vyfukování používá předlisek ve tvaru duté trubky. Ta je vysouvána a při dosažení dostatečné délky je odříznuta noží. Následně je předlisek nafouknut vzduchem a díky přetlaku zaujme tvar formy. Vytlačovací vyfukování má nevýhodu v tom, že na spodní straně vznikají sváry v místech, kde byl předlisek ustřižen. Dále nemá tato metoda velmi velkou tvarovou přesnost konečných dílů a také vzniká relativně velké množství odpadu. [34]

Při vstřikovacím vyfukování je předlisek vyroben jako samostatný polotovar pomocí vstřikování (viz kapitola 4.1). To má za následek, že výsledný díl neobsahuje žádné svary. Lze také zabudovat do předlisku například hrdlo lahve nebo jiné komplexní části, které by se při vytlačovacím vyfukování musely k dílu připojit dodatečně. Vstřikovací vyfukování nevytváří žádný odpadní materiál. Díky tomu, že předlisek lze vyrobit s přesnými parametry, tak je možno vyfukovat díly s proměnnou tloušťkou stěn v různých místech. [34]

Použitelnost vyfukování je v praxi omezena tím, že je možná výroba pouze dutých dílů. Pořizovací cena vyfukovacích strojů a forem je, například oproti strojům pro vstřikování, výrazně nižší. Avšak do ceny konečného výrobku je nutné uvažovat i výrobu předlisků. Výrobní proces vyfukování může být plně automatizovaný. Vyfukování je taktéž metoda vhodná pro velkosériovou výrobu. [33]

## 5. VLIV OKOLÍ NA KVALITU POLYMERNÍCH DÍLŮ

Okolní podmínky do určité míry ovlivňují vlastnosti polymerních dílů. V následujících podkapitolách jsou vypsány pouze ty, které mají na výrobky největší vliv při našem měření. Těmi jsou teplota, UV záření a vlhkost, jelikož se jedná o parametry, které je možno regulovat v klimatické komoře.

### 5.1 Vliv tepla

Při zvyšování teploty dochází ke zvětšení intenzity vibrací uvnitř molekul a tím k namáhání vazeb mezi atomy. Tím může dojít k rozpadnutí polymerního řetězce a vzniku radikálů. [13]

Existují tři druhy tepelné degradace. Prvním je depolymerace, kdy dochází k rozkladu polymerních řetězců na nízkomolekulární látky bez změny chemického složení. Dalším druhem je destrukce. Při destrukci dochází při štěpení nízkomolekulárních látek ke změně chemického složení a také k výraznému poklesu molární hmotnosti. Posledním druhem je degradační síťování, což je jev, který můžeme pozorovat třeba při tepelném stárnutí pryží. [13]

K degradaci polymerů díky vysokým teplotám za normálních podmínek, jako například účinkem slunečního záření, nedochází. Avšak při jakékoliv změně teploty dochází ke změně objemu tělesa. Při spojení dvou materiálů s různými hodnotami teplotní roztažnosti dochází při změně teploty ke vzniku vnitřního pnutí, což může vést ke tvorbě trhlin. Dále se můžou z materiálu uvolňovat jeho přísady jako třeba změkčovadla. To má za následek zvýšení křehkosti materiálu. [36]

### 5.2 Vliv UV záření

UV záření má menší vlnovou délku než viditelné záření, konkrétně 10 až 400 nm. Jelikož je energie fotonů nepřímo úměrná jejich vlnové délce, tak to znamená, že má UV záření vůči viditelnému nebo infračervenému záření vyšší energii. Působení UV záření má vliv na chemické a mechanické vlastnosti polymerních materiálů právě díky vysoké energii, kterou mají jeho fotony. Fotony dopadají na povrch, ale také částečně pronikají do objemu materiálu a srážkami s atomy mohou narušit vazby mezi atomy v řetězci. To má za následek fotooxidaci, tedy štěpení makromolekul na menší celky, které jsou náchylné k reakci s okolním kyslíkem. Po působení UV záření se materiál stává křehčím. Dalším účinkem působení UV záření může být změna barvy materiálu. [13, 37]

UV záření je používáno pro urychlení procesu stárnutí materiálů. Výrobky jsou vloženy do komory, kde jsou po určitou dobu (obvykle několik dní/týdnů) vystaveny účinkům speciálních lamp (typicky xenonových) vyzařujících světlo v UV spektru. Je také nutno brát v potaz skutečnost, že UV záření proniká do hloubky vzorků postupně, tudíž v objemu vzorků není fotodegradace rovnoměrná. [37]

Vlivem UV záření na nylon 12 se experimentálně zabývala zahraniční práce s názvem „*Degradation of Laser Sintered polyamide 12 parts due to accelerated exposure to ultraviolet radiation*“. Při měřeních byly nylonové vzorky uloženy po dobu 2 měsíců v UV komorách, kde na ně působilo konstantní UV záření. Hned po 24 hodinách bylo dosaženo znatelného zbarvení vzorků do žluta, což vedlo také ke zvýšení absorpce modrého světla a tím i UV záření. V práci je uvedena hodnota 336 hodin osvětlení, kdy došlo k výraznému zhoršení mechanických vlastností vzorků. Snížila se pevnost v tahu a maximální prodloužení, materiál se tedy stal křehčím. Youngův modul pružnosti však zůstal nezměněný. UV záření degradovalo pouze vnější část vzorku. Zhoršení vlastností na povrchu ale stačilo ke zvýšení šíření trhlin při namáhání. [38]

### 5.3 Vliv vlhkosti

K navlhání materiálu dochází buď ponořením tělesa přímo do vody nebo z vlhkosti okolí. V polymerech působí voda především na hydrolyzovatelné skupiny (esterové, amidové, nitrilové). Tyto skupiny se mohou vyskytovat jak v samotných makromolekulách materiálu, tak i v molekulách jeho přísad. Voda je z okolí absorbována do doby vyrovnání vlhkosti materiálu a vlhkosti okolí. [39]

Obsah vody ovlivňuje mechanické vlastnosti polymerů jako například jeho pevnost a houževnatost. S absorbováním vody také dochází k nárůstu objemu nebo zvyšováním plasticity materiálu, jelikož může voda působit jako plastifikátor. [13]

Vlivem vlhkosti na mechanické vlastnosti polymerů se zabývala vědecká práce s názvem „*The effect of environmental humidity/water absorption on tribo-mechanical performance of polymers and polymer composites – a review*“. Výsledky experimentů, které tato práce popisuje, byly následující: v prostředích s vysokou relativní vlhkostí dochází k zvětšení míry opotřebení díky plastifikaci a tím i následnému snížení pevnosti pro materiály jako PA6 a PA66. Dále bylo zjištěno, že činitel tření pro plniva jako například uhlíková vlákna s rostoucí relativní vlhkostí okolí klesá. [40]

Další práce zabývající se vlivem vlhkosti na mechanické vlastnosti uhlíkovými vlákny obohacený nylon 6 má název „*Effect of Temperature and Moisture on the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Nylon 6 Composites*“. V této práci bylo zjištěno, že míra absorpce vlhkosti je ovlivněna okolní teplotou i délkou a orientací uhlíkových vláken. Větší teploty zapříčinily vyšší míru absorpce vlhkosti. Vzorky s náhodnou orientací uhlíkových vláken také vykazovaly vyšší absorpci vlhkosti. Tato práce rovněž potvrzuje výsledky z předchozího odstavce, a to že vlhkost negativně ovlivňuje mez pevnosti v tahu. [41]

Při 3D tisku je důležité kontrolovat vlhkost filamentů, jelikož to je důležitý parametr pro kvalitu výsledného výrobku. Při vysokém obsahu vody ve filamentu může při tisku dojít k vytváření bublin, nití (tzv. „stringování“) a také obecně ke zhoršení mechanických vlastností výsledného dílu. Proto je vhodné filamenty skladovat v co nejsušším prostředí nebo je před použitím vysušit a zbavit se tak nechtěné absorbované vlhkosti.

## 6. MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ

Tato kapitola je věnována teoretickému popisu mechanických zkoušek materiálu, pomocí kterých lze zjistit vlastnosti jako houževnatost, pevnost v tahu a tvrdost. Tyto vlastnosti je velmi výhodné znát při jakémkoliv navrhování výrobků s danými materiály.

### 6.1 Zkouška vrubové houževnatosti

Houževnatost je vlastnost materiálu popisující jeho schopnost odolávat proti vzniku trhlin při mechanických nárazech a deformování. Je-li materiál náchylný k porušení struktury a vzniku trhlin při malé plastické deformaci, tak se jedná o křehké materiály.

Pro měření houževnatosti lze využít několik metod. Metoda zvolená pro naše měření byla metoda stanovení rázové houževnatosti Charpy definovaná v normě ČSN EN ISO 179-1. Při této metodě se měří energie potřebná k přeražení testovaného vzorku. Metoda Charpy využívá pro přetažení tělesa kyvadlové kladivo o dané nominální energii. Před samotným měřením je nutno stroj s kladivem kalibrovat, a to tím způsobem, že do přístroje není vložen vzorek a kladivo je tedy zpuštěno „naprázdno“ a je měřena jeho ztrátová energie. [13]

Při měření více houževnatých materiálů se může stát, že nedojde k úplnému přeražení vzorku. Tomu lze zabránit pomocí použití kladiva s větší nominální energií nebo vrubováním vzorku. Při vrubování je ve středu délky měřeného tělesa vytvořen vrub o přesně definovaných rozměrech. Díky vrubu je při nárazu kladiva do vzorku energie soustředěna do zeslabené části – tj. do místem pod vrubem. Vzorek je do přístroje umístěn vždy tak, aby kladivo narazilo do tělesa v místě přímo naproti vrubu. [13]

Výsledná hodnota rázové a vrubové houževnatosti Charpy je vypočítána pomocí následujícího vzorce:

$$KCV = \frac{E_c}{h \cdot b_A} [kJ \cdot m^{-2}] \quad (1)$$

kde:

index  $A$  označuje typ vrubu

$KCV$  je rázová a vrubová houževnatost vyjádřená v kilojoulech na metr čtvereční [ $kJ \cdot m^{-2}$ ]

$E_c$  je kinetická energie potřebná k přeražení vzorku vyjádřená v joulech [J]

$h$  je tloušťka vzorku vyjádřená v milimetrech [mm]

$b_A$  je šířka vzorku pod vrubem vyjádřená v milimetrech [mm]

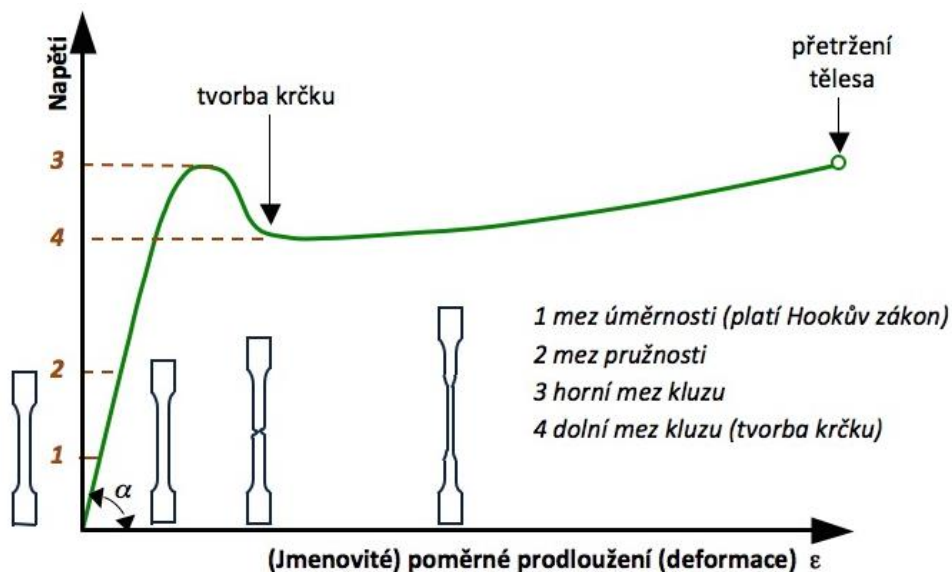
## 6.2 Zkouška pevnosti v tahu

Pevnost v tahu udává, jak velkou silou je možno působit v tahu na materiál, aniž by došlo k jeho porušení. Znalost pevnosti dílu je velmi důležitá pro správné dimenzování součástí a také správný výběr materiálu.

Zjišťování pevnosti v tahu spočívá v experimentálním měření deformační křivky, což je závislost normálového napětí na poměrném prodloužení vzorku. Měření pevnosti probíhá pro vzorky ve tvaru tzv. „oboustranné lopatky“, které mají rozšířené konce za které je vzorek uchycen. Tento tvar vzorků napomáhá ke koncentraci napětí ve středové části vzorku a minimalizuje tak šanci, že by došlo k přetržení dílu na úchytech. Norma definující tvar vzorků a průběh zkoušky pro polymerní materiály je ČSN EN ISO 527-2. [13]

Vzorky jsou do testovacího zařízení tak, aby byly uchopeny zhruba v půlce svých rozšířených koncových částí. Ovládací program umožňuje nastavení parametrů zkoušky jako například rychlost posunu ramene zařízení nebo maximální pokles působící síly, po jehož dosažení je zkouška ukončena. Pomocí tohoto programu je následně zkouška zahájena a po dobu zkoušky je měřena aplikovaná síla a protažení vzorku.

Z naměřených hodnot je možno vytvořit deformační křivku, což je závislost vyvíjeného napětí na poměrném prodloužení vzorku (viz obrázek 6.1). Deformační křivku lze rozdělit na několik částí. První část je omezena mezí úměrnosti a platí v ní Hookův zákon, což znamená, že napětí je lineárně závislé na prodloužení. Druhá část je omezena mezí pružnosti, což je bod, do kterého je deformace vzorku stále vratná. Od meze pružnosti dále je deformace vzorku trvalá. Mez kluzu definuje bod, při kterém dojde k tvorbě krčku ve zúžené části vzorku. Při dalším prodlužování vzorku dojde v určitém bodě k přetržení tělesa. [13]



Obrázek 6.1 Typická deformační křivka při měření pevnosti v tahu [24]

Po dokončení zkoušky je programem vytvořena tabulka s následujícími významnými hodnotami: maximální aplikovaná síla ( $F_{max}$ ), protažení vzorku během  $F_{max}$  ( $S_{max}$ ), síla působící těsně před přetržením ( $F_{end}$ ), protažení těsně před přetržením ( $S_{end}$ ), poměrné prodloužení při  $F_{max}$  ( $A_{max}$ ) a poměrné prodloužení těsně před přetržením ( $A_{end}$ ).

Z těchto hodnot lze dle následujícího vzorce vypočítat *mez pevnosti v tahu* jako:

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

kde:

$\sigma_m$  je největší dosažitelné napětí v tahu vyjádřené v megapascálech [MPa]

$F_{max}$  je maximální naměřená síla vyjádřená v newtonech [N]

$S_0$  je plocha průřezu vzorku před zahájením zkoušky vyjádřená v milimetrech čtverečních [mm<sup>2</sup>]

Programem počítaná hodnota *tažnosti (poměrného protažení)* je definována jako:

$$A = \frac{L_k - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

kde:

$A$  je tažnost (poměrné protažení) vyjádřené v procentech [%]

$L_k$  je konečná délka vzorku po dokončení zkoušky vyjádřená v milimetrech [mm]

$L_0$  je počáteční délka zkušební vzorku vyjádřená v milimetrech [mm]

Pro zjištění zmenšení plochy průřezu vzorku při testování pevnosti lze určit hodnotu *kontrakce* vzorku pomocí následujícího vzorce:

$$Z = \frac{S_k - S_0}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4)$$

kde:

$Z$  je kontrakce vyjádřená v procentech [%]

$S_k$  je konečná plocha průřezu vzorku po dokončení zkoušky vyjádřená v milimetrech čtverečních [mm<sup>2</sup>]

$S_0$  je počáteční plocha průřezu zkušební vzorku vyjádřená v milimetrech čtverečních [mm<sup>2</sup>]

### 6.3 Zkouška tvrdosti

Tvrdoměr udává míru odporu, kterou klade materiál vůči vniku jiného tělesa. Pro měření tvrdosti existuje několik různých metod, které lze kategorizovat na zkoušky vrypové, vnikací a odrazové. [13]

Pro měření tvrdosti polymerů je vhodné použít vnikací metodu Shore. Tato metoda je pro plasty a ebonit definována normou ČSN EN ISO 868. Metoda využívá pro měření tvrdoměry, pomocí kterých je do zkoušeného tělesa vtlačován hrot o definovaném tvaru.

Měřicí hrot je připevněn na pružinu, která na něj při měření působí určitou přitlačnou silou. Tvrdoměr obsahuje také opěrné patky, které mají poloměr minimálně 6 mm. Při měření by mělo dojít ke kontaktu vzorku s celou plochou opěrných patek. Norma povoluje použití vzorků s minimální tloušťkou 4 mm. Jednotlivé měřicí body by měly být mezi sebou vzdáleny minimálně 6 mm a zároveň by neměly být od okraje vzorku ve vzdálenosti menší než 9 mm. [42]

Pro měkké polymery je využívána metoda Shore A, která má hrot ve tvaru komolého kužele a velikost přitlačné síly 8,05 N. Pro polymery s větší tvrdostí se využívá metody Shore D, při které je do povrchu měřeného tělesa tlačeno hrotem ve tvaru kužele s kulatým vrchlíkem zatěžovací silou 44,45 N. [13]

## **7. POSOUZENÍ VHODNOSTI 3D TISKU**

Tato část se věnuje posouzení vhodnosti 3D tisku jako alternativě ke klasickým metodám výroby plastových dílů. Jelikož má každá metoda nějaké nedostatky a omezení, tak je v následujících podkapitolách rozepsáno několik faktorů, které je nutno posoudit při výběru vhodné výrobní technologie. V podkapitole shrnutí je následně pomocí Saatyho metody posouzena výhodnost využití 3D tisku v oblasti prototypování.

### **7.1 Cena**

Když se hovoří o ceně, tak je nutno rozlišovat, zdali je myšlena cena výrobního zařízení, nebo kusová cena jednoho výrobku. Metody vhodné pro velkosériovou výrobu jako vstřikování, lisování a vyfukování nabízí velmi nízkou cenu za jeden vyrobený kus. Avšak výrobní linky těchto metod jsou finančně nákladné – zejména pro vstřikování. Na cenu zařízení má vliv také stupeň automatizace celého výrobního procesu. Na druhou stranu jsou zařízení pro malosériovou nebo kusovou výrobu sice levnější, ale při výrobě velkého množství kusů je výsledná cena za jeden kus větší.

### **7.2 Flexibilita výroby**

Flexibilitou je myšlena obtížnost změny výrobku, ať už tvaru, rozměru, nebo i materiálu. To je velmi důležité například při výrobě protéz v medicíně, jelikož by měl být každý kus vyrobený pacientovi přímo na míru. Dalším oborem, kde je flexibilita výroby velmi výhodná, tak je prototypování. Při prototypování je totiž hlavním požadavkem rychlá výroba nových verzí modelů, které jsou navrhovány. V tomto ohledu je zdaleka nejvhodnější použít technologii 3D tisku, jelikož stačí pouze nahrát nový model do tiskárny. Lze také říci, že 3D tisk obecně vyniká ve výrobě dílů s komplexní vnitřní geometrií. Všechny ostatní zmíněné metody pracují s formami, které by bylo nutné v tomto případě vyrobit vždy nové, což je finančně velmi nákladné. Je také nutné brát v potaz, že některé metody mají určitá omezení, například pomocí vyfukování lze vytvořit pouze dutá tělesa a pomocí odlévání (zejména rotačního) je velmi obtížné docílit různé tloušťky stěn.

### **7.3 Rychlost výrobního procesu**

Rychlost výrobního procesu je, společně s automatizací, hlavním faktorem, který určuje vhodnost metody pro velkosériovou nebo malosériovou výrobu. Při 3D tisku je v tomto ohledu velký rozdíl mezi jednotlivými technologiemi, protože při DLP dochází k tisku celé vrstvy najednou, kdežto u většiny ostatních tomu tak není. Zároveň hraje velkou roli v době jednoho výrobního cyklu velikost vyráběného dílu. Mimo 3D tisk nabízí ostatní metody mnohem kratší dobu výrobního cyklu. Nejdélší částí v jejich výrobním procesu

bývá obecně chlazení plastů ve formě, což je proces, který lze do jisté míry také optimalizovat.

Výrobou několika dílů současně použitím vhodných forem lze u většiny zmíněných technologií výrazně zvýšit produktivitu daných procesů a snížit tak dobu potřebnou pro výrobu jednoho kusu. Tohoto lze využít i při DLP 3D tisku.

## 7.4 Automatizace

Téměř všechny zmíněné metody výroby lze plně automatizovat, jedinou výjimkou může být 3D tisk. Řešení automatizace 3D tisku by bylo velmi náročné. V oblastech, kde je 3D tisk používán a také s ohledem na dobu jednoho výrobního cyklu, by implementování plné automatizace nebylo praktické. Existují řešení automatizování SLA a FDM 3D tisku, zde se ale jedná pouze o automatizaci odstranění vytisknutého modelu z podstavy a zahájení tisku nového modelu. Následné zpracování modelu po tisku, jako odstranění podpor, není většinou nijak řešeno. To by byl výrazný problém pro SLS tisk, jelikož je model před dalším použitím nutno očistit od přebytečného práškového materiálu.

## 7.5 Výsledná kvalita

Na výsledné kvalitě výrobku se podílí jeho mechanické vlastnosti, ale také rozměrová a tvarová přesnost, se kterou byl díl vyroben a jeho konečná povrchová úprava. Díly vyrobené pomocí klasických metod vykazují při dodržení správného technologického postupu izotropní vlastnosti. Oproti tomu díly vyrobené pomocí 3D tisku, zejména tedy FDM metody, vykazují velmi anizotropní vlastnosti, což je většinou nechtěná vlastnost.

Jednotlivé technologie 3D tisku se liší i v konečné povrchové úpravě. Nejlepší povrchovou úpravu má po tisku SLA metoda, kterou lze vytvořit díly s velmi rovinným povrchem. O něco větší drsnost povrchu nabízí SLS metoda. Nejhůře je na tom FDM, u kterého jsou jednotlivé vrstvy tisku velmi znatelné. Oproti 3D tisku mají klasické metody výroby velmi dobrou povrchovou úpravu.

Tvarová i rozměrová přesnost je u klasických metod výroby při dodržení správného pracovního postupu velmi dobrá. Vrstvová struktura vytisknutých dílů omezuje přesnost, klasickým metodám se tedy lze přiblížit například zmenšením výšky jedné vrstvy.

## 7.6 Shrnutí pomocí Saatyho metody

Pomocí Saatyho metody je v následující podkapitole porovnána vhodnost 3D tisku pro prototypování s vybranými klasickými metodami výroby polymerních součástek. Zvolenými kritérii byly:  $k1$  – cena,  $k2$  – flexibilita,  $k3$  – rychlost procesu,  $k4$  – automatizace,  $k5$  – výsledná kvalita. Z výrobních procesů vypsanych v kapitole 4 byly pro porovnání s 3D tiskem ( $M1$ ) vybrány dva zástupci, a to vstřikování ( $M2$ ) a odlévání ( $M3$ ).

Prvním krokem při porovnávání pomocí Saatyho metody bylo vytvoření tabulky 7.1, kde jsou sepsány vlastnosti metod při jednotlivých kritériích. Pomocí této tabulky budou určovány preference při jednotlivých kritériích v dalších krocích.

Tabulka 7.1 Vlastnosti výrobních metod při zvolených kritériích

metoda	cena unikátního dílu	flexibilita	rychlost procesu	automatizace	výsledná kvalita
Označení	k1	k2	k3	k4	k5
3D tisk	nízká	velká	velmi pomalé	částečná	střední
vstřikování	vysoká	střední	velmi rychlé	kompletní	velmi vysoká
odlévání	střední	relativně nízká	poměrně rychlé	kompletní	vysoká

Poté byla vytvořena tabulka 7.2, která slouží k výpočtu váhy každého kritéria. Tabulka hodnotí, jak významné jsou vůči sobě jednotlivá kritéria.

Pro objasnění bude popsán první sloupec tabulky 7.2, tedy pro kritérium k1 – cenu unikátního dílu. Každý řádek popisuje do jaké míry je preferováno příslušné kritérium. Stupnice preferencí je následující: 1 – rovnocenné, 3 – slabě preferované, 5 – preferované, 7 – silně preferované, 9 – absolutně preferované. K2 (flexibilita) je oproti ceně unikátního dílu silně preferována, buňce tedy náleží hodnota 7. Rychlost procesu je dle našeho hodnocení méně důležitým kritériem jako cena za unikátní díl, která je slabě preferována. V buňce je tedy hodnota 1/3. Ze zbytku sloupce je vidno, že cena za unikátní díl je námi preferována oproti možnosti automatizace, ale naopak výsledná kvalita je pro nás slabě preferována.

Pro výpočet geometrického průměru byl použit vzorec 5 uvedený níže. Jednotlivé váhy jsou poté rovny podílu příslušného geometrického průměru hodnot v řádku k sumě geometrických průměrů všech řádků, viz rovnice 6. Pro názornost byla pomocí rovnic níže vypočítána váha prvního kritéria v tabulce 7.2.

$$geom. \text{průměr}_{k1} = \left( \prod_{i=1}^n x_i \right)^{\frac{1}{n}} = \left( 1 \cdot 0,14 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \frac{1}{3} \right)^{\frac{1}{5}} = 0,93 \quad (5)$$

$$váha_{k1} = \frac{geom. \text{průměr}_{k1}}{\sum geom. \text{průměr}} \cdot 100 = \frac{0,93}{7,49} \cdot 100 = 12,5 \% \quad (6)$$

Tabulka 7.2 Preference zvolených kritérií a jejich výsledné váhy

	k1	k2	k3	k4	k5	geo. prům.	váha
k1	1,00	0,14	3,00	5,00	0,33	0,93	12,5 %
k2	7,00	1,00	7,00	9,00	3,00	4,21	56,2 %
k3	0,33	0,14	1,00	5,00	3,00	0,93	12,5 %
k4	0,20	0,11	0,20	1,00	0,14	0,23	3,0 %
k5	3,00	0,33	0,33	7,00	1,00	1,18	15,8 %
					suma	7,49	1

Dalším krokem bylo vytvoření tabulek porovnávající metody při jednotlivých kritériích (viz tabulky 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7). Tyto tabulky jsou vytvořeny na stejném principu jako tabulka 7.2.

Tabulka 7.3 Výsledné váhy zvolených metod při uvažování ceny za unikátní kus

k1	M1	M2	M3	geo. prům.	váha
M1	1,00	9,00	7,00	3,98	78,5 %
M2	0,11	1,00	0,33	0,33	6,6 %
M3	0,14	3,00	1,00	0,75	14,9 %
			suma	5,07	1

Z tabulky 7.3 lze vyčíst, že při uvažování kritéria ceny výroby unikátního dílu je výrazně nejvhodnější použít 3D tisk (*M1*), poté odlévání (*M3*) a nakonec vstřikování (*M2*).

Tabulka 7.4 Výsledné váhy zvolených metod při uvažování flexibility výroby

k2	M1	M2	M3	geo. prům.	váha
M1	1,00	3,00	5,00	2,47	63,7 %
M2	0,33	1,00	3,00	1,00	25,8 %
M3	0,20	0,33	1,00	0,41	10,5 %
			suma	3,87	1

Tabulka 7.4 ukazuje, že dle našeho hodnocení nabízí největší flexibilitu výroby 3D tisk, dále vstřikování a odlévání je pro toto kritérium nejméně preferované.

Tabulka 7.5 Výsledné váhy zvolených metod při uvažování rychlosti výroby

k3	M1	M2	M3	geo. prům.	váha
M1	1,00	0,11	0,14	0,25	5,1 %
M2	9,00	1,00	5,00	3,56	72,2 %
M3	7,00	0,20	1,00	1,12	22,7 %
			suma	4,93	1

Při uvažování rychlosti výrobního procesu (tabulka 7.5) je nejvýhodnější metodou vstřikování, následované odléváním a 3D tisk je v tomto ohledu nejméně vhodný.

Tabulka 7.6 Výsledné váhy zvolených metod při uvažování míry automatizace

k4	M1	M2	M3	geo. prům.	váha
M1	1,00	0,33	0,33	0,48	14,3 %
M2	3,00	1,00	1,00	1,44	42,9 %
M3	3,00	1,00	1,00	1,44	42,8 %
			suma	3,37	1

Tabulka 7.6 porovnává metody na základě obvyklé míry automatizace. Odlévání i vstřikování mají v tomto ohledu stejné hodnocení a jsou pro automatizaci výrobního procesu vhodnější než 3D tisk.

Tabulka 7.7 Výsledné váhy zvolených metod při uvažování výsledné kvality dílu

k5	M1	M2	M3	geo. prům.	váha
M1	1,00	0,14	0,20	0,31	7,2 %
M2	7,00	1,00	3,00	2,76	64,9 %
M3	5,00	0,33	1,00	1,19	27,9 %
			suma	4,25	1

Posledním hodnoceným kritériem je výsledná kvalita výrobků (tabulka 7.7). Zde má 3D tisk opět nejmenší hodnocení. Dle uvedeného hodnocení nabízí nejlepší kvalitu výrobků vstřikování a poté odlévání.

Tabulka 7.8 Výsledné váhy zvolených metod při uvažování ceny za unikátní kus

váha	12,5 %	56,2 %	12,5 %	3,0 %	15,8 %	
výsledek	k1	k2	k3	k4	k5	hodnocení
M1	78,5 %	63,7 %	5,1 %	14,3 %	7,2 %	47,8 %
M2	6,6 %	25,8 %	72,2 %	42,9 %	64,9 %	35,9 %
M3	14,9 %	10,5 %	22,7 %	42,8 %	27,9 %	16,3 %

$$\begin{aligned}
 \text{hodnocení} &= \text{váhy}_{\text{kritérií}} \times \text{váhy}_{\text{metody}} \\
 &= 0,125 \cdot 0,785 + 0,562 \cdot 0,637 + 0,125 \cdot 0,051 + 0,03 \\
 &\quad \cdot 0,143 + 0,158 \cdot 0,072 = 0,478 = 47,8 \%
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

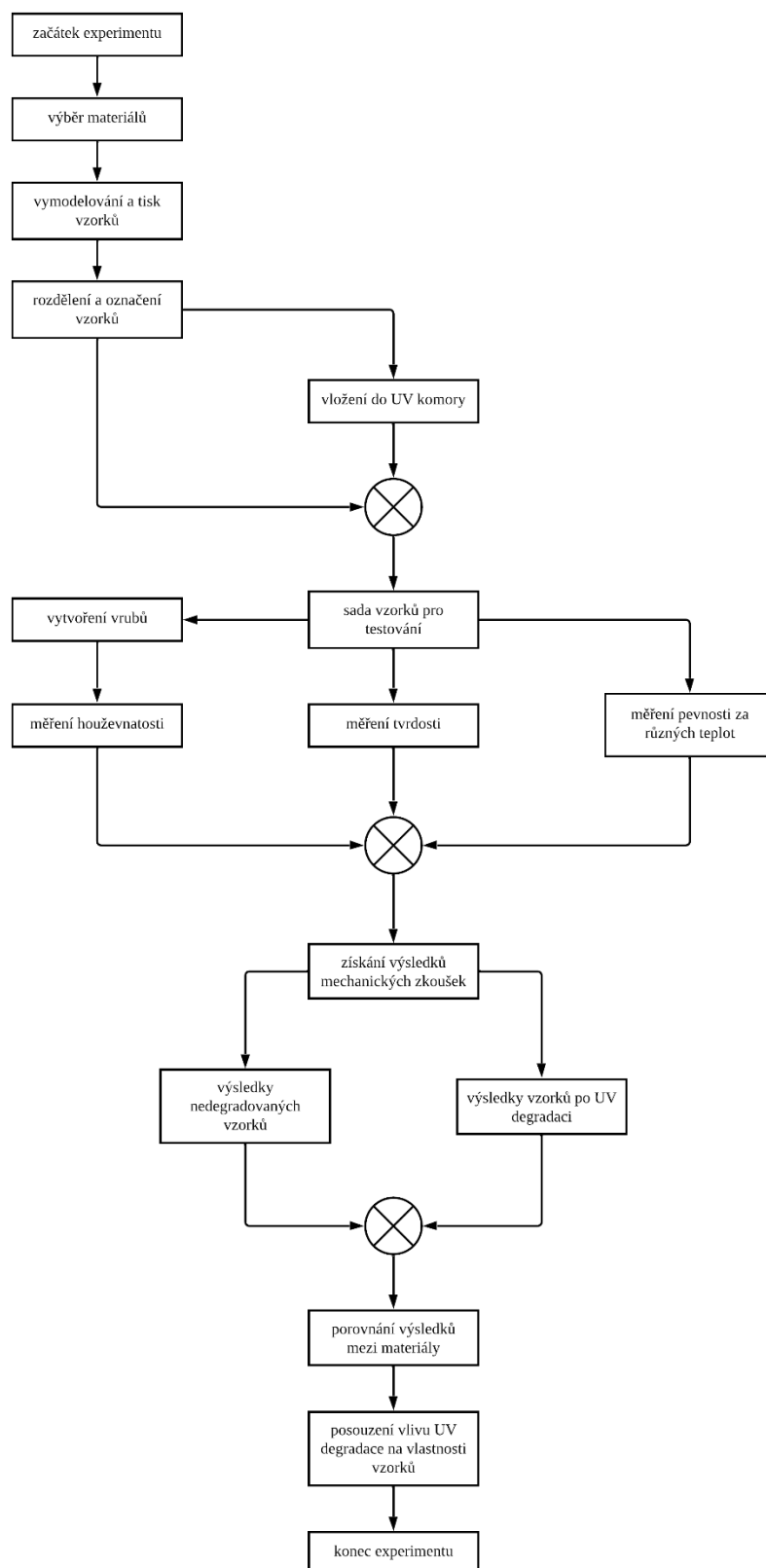
Tabulka 7.8 kombinuje výsledky z předešlých tabulek a slouží ke konečnému vyhodnocení vhodnosti metody 3D tisku k prototypování oproti ostatním uvažovaným metodám. Výsledné hodnocení je vypočítáno jako skalární součin výsledků metody při daných kritériích s váhami těchto kritérií. Pro přehlednost bylo vypočítáno hodnocení metody M1 z tabulky 7.8 v rovnici 7.

Z této tabulky je vidno, že dle našeho hodnocení vychází metoda 3D tisku (*MI*) jako nejvhodnější varianta pro prototypování s výsledkem 47,8 %. Lze si povšimnout, že ve třech kritériích vyšel 3D tisk jako nejméně vhodná metoda, jelikož ale měly tyto kritéria malou váhu, tak se to na výsledku příliš neprojevilo. Čím vyšší číslo vychází v porovnání s ostatními metodami, tím vhodnější je použití dané metody dle zvolených parametrů srovnávání. Tento výsledek je samozřejmě založen na subjektivním hodnocení a při jiných požadavcích nebo porovnávaných metodách by vyšly různé výsledky.

## 8. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této bakalářské práce obsahuje výběr materiálů pro měření mechanických vlastností, konkrétně pevnosti v tahu, vrubové houževnatosti a tvrdosti. Vybranými materiály byly PLA a nylon-karbon PA6 CF15. PLA byl zvolen jako referenční materiál, který je velmi cenově dostupný a také vysoce rozšířený v oblasti 3D tisku. Nylon-karbon byl poté vybrán pro své vlastnosti, které jsou vhodné pro výrobu dílu, který je popsán v případové studii. Tyto materiály byly zvoleny také z důvodu navázání na bakalářskou práci Bc. Blechy a diplomovou práci Ing. Hyhlíka. Oproti těmto pracím, kde byly vzorky podrobeny degradaci po dobu 1 a 2 měsíců v UV komoře, byla zde zvolena doba degradace 1,5 měsíce. [43, 44]

Na obrázku 8.1 je znázorněn diagram předpokládaného průběhu experimentů. Po již popsaném výběru materiálu následovalo vymodelování vzorků pro měření mechanických vlastností podle rozměrů danými příslušnými normami. Jedna skupina vzorků poté byla vložena do klimatické komory, kde na ně působilo UV záření, byly pravidelně ostříkovány destilovanou vodou a kde byla nastavena přesná relativní vlhkost okolí. Měřenými mechanickými vlastnosti byla rázová houževnatost, tvrdost a pevnost v tahu podle teorie popsané v kapitole 6. Následně byly porovnány výsledky těchto zkoušek nedegradovaných a degradovaných vzorků, což nám umožnilo určit vliv degradace na mechanické vlastnosti použitých materiálů. Dosažené výsledky byly poté porovnány i s výsledky z výše zmíněných prací, jelikož zkoumaly jiné doby degradace stejných materiálů.



Obrázek 8.1 Diagram postupu měření experimentu [zdroj vlastní]

## 9. PŘÍPRAVA VZORKŮ

V této kapitole je pozornost věnována tomu jak byly zhotoveny vzorky použité pro měření mechanických vlastností vybraných materiálů. Jedna podkapitola je určena také defektu, který se vyskytl v jedné várce vzorků určených pro měření pevnosti a kvůli které nebylo možno tuto zkoušku pro zmíněnou sadu provést se směřovatými výsledky.

### 9.1 Tisk vzorků

Jak vyplývá z diagramu postupu práce při experimentu na předchozí stránce, tak samotnému tisku vzorků předcházela ještě výběr materiálů a vytvoření modelů vzorků pro tisk. Důvod výběru PLA a PA6 CF15 jako použitých materiálů je rozveden v kapitole 8, takže tu není opakován. V následující tabulce (tabulka 9.1) jsou uvedeny typické hodnoty jejich významných fyzikálních vlastností, které slouží k vytvoření představy, jakých zhruba hodnot by se mělo při měření dosáhnout. Je však nutné brát v potaz, že vlastnosti materiálu závisí velmi silně na výrobním procesu a liší se tak mezi jednotlivými výrobci. Dále jsou tyto vlastnosti do určité míry ovlivněny také stářím materiálu (i když je filament po celou dobu vhodně skladován) a také nastavenými parametry tisku.

Z následující tabulky je možno vyčíst, že podle předpokladů by mělo mít PA6 CF15 v porovnání s PLA větší pevnost v tahu, větší houževnatost, ale menší tvrdost. Všechny tyto vlastnosti samozřejmě platí pro nedegradované materiály při pokojové teplotě.

Parametry tisku, které byly pro výrobu materiálů využívány, jsou taktéž uvedené v tabulce níže. Všechny vzorky byly vytvořené pomocí 3D tiskárny Creality Ender 3 Pro. Jak je vidno, tak PLA bylo tisknuto s menší teplotou trysky i podložky, ale zároveň bylo při tisku spuštěné chlazení na 100 %. Na druhou stranu vzorky z PA6 CF15 byly tisknuty s většími teplotami jak trysky, tak i podložky, ale nebylo zapnuto chlazení. Výplň vzorků byla nastavena vždy pouze na perimetry (100% koncentrická výplň), což znamená, že tisk probíhal tím způsobem, že tryska sledovala obvodové linie modelu a postupně je s každým cyklem zmenšovala a přibližovala se ke středu.

Tabulka 9.1 Typické hodnoty důležitých mechanických vlastností a fyzikálních veličin PLA a PA6 CF15 a nastavené parametry tisku pro tyto materiály [14, 15, 30, 31]

materiál	PLA	PA6 CF15
Mechanické vlastnosti		
pevnost v tahu [MPa]	70	170
houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	3,4	6,5
tvrdost [H <sub>SD</sub> ]	83	72,6
fyzikální veličiny		
hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1,24	1,25
absorpce vody [%]	0,20	0,30
parametry tisku		
teplota trysky [°C]	210	270
teplota podložky [°C]	60	100
chlazení [%]	100	0
typ výplně	pouze perimetry	pouze perimetry

## 9.2 Degradace v UV komoře

Jelikož byl zkoumán vliv degradace materiálů pomocí vystavení UV záření, tak byly vzorky umístěny do UV komory. Cílem využití klimatické komory je do určité míry simulovat přirozené stárnutí materiálů, které by nastalo například při používání materiálu ve venkovním prostředí, kde by na ně dopadalo sluneční záření a případně i působil déšť. Výhodou klimatické komory oproti podmínkám v terénu je snadná kvantifikace a přesná regulace dopadajícího záření a dalších okolních podmínek.

Použitým modelem klimatické komory byl Q-SUN Xe-3. Tento typ umožňuje nastavení několika parametrů, pomocí kterých lze upravit průběh degradace. Osvit vzorků probíhal v cyklech trvajících 24 hodin. V každém cyklu bylo nastavena doba osvitů na 8 hodin s takovým průběhem, že se postupně zvyšovala z hodnoty 80 W/m<sup>2</sup> na hodnotu 150 W/m<sup>2</sup> a následně se opět snižovala. Klimatická komora umožňovala konfiguraci jak relativní vlhkosti, která byla nastavena na 26 % po dobu ozařování, ale také možnost ostřiku vzorků. Vzorky byly ostřikovány destilovanou vodou, a to vždy půl hodiny denně. Jak již bylo zmíněno v kapitole 8, tak vzorky byly vystaveny účinkům klimatické komory po dobu 1,5 měsíce. Při ukončení degradování byla celková vyzářená energie rovna hodnotě 98 789 kJ/m<sup>2</sup>.

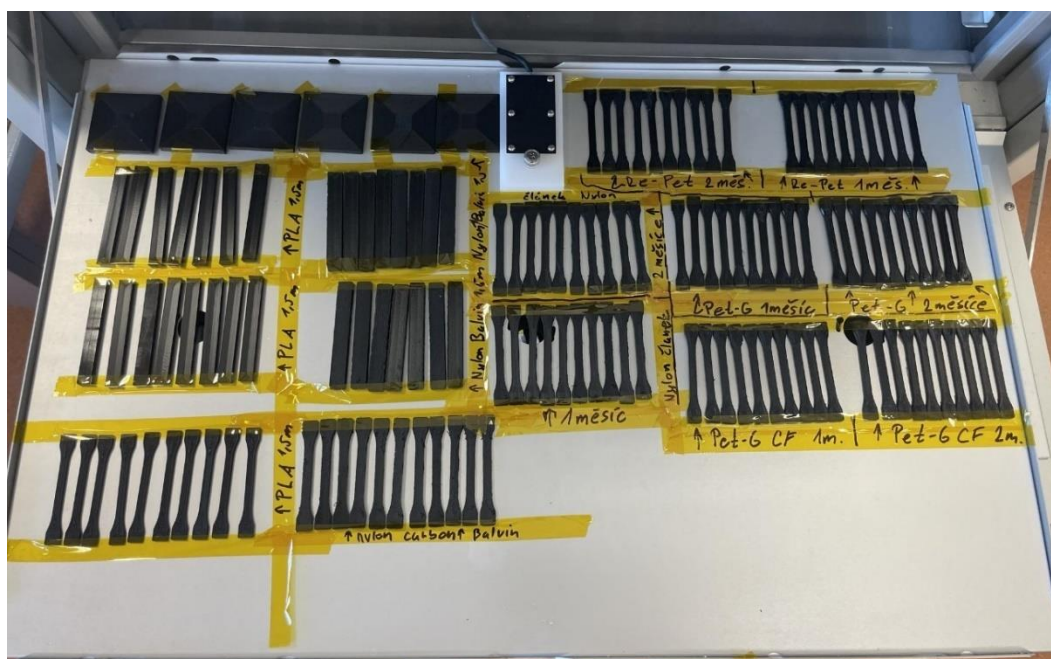
Celkovou vyzářenou energii je možno pro lepší názornost vztáhnout k určité lokaci. K tomu je zapotřebí převést vyzářenou energii z hodnoty v kJ/m<sup>2</sup> na jednotky Wh/m<sup>2</sup>. Převodní poměr je následující: 1Wh/m<sup>2</sup> = 3,6 kJ/m<sup>2</sup>. Celková vyzářená energie v klimatické komoře tedy byla 27 441 Wh/m<sup>2</sup>. Systém Solcast poskytuje mnoho dat

souvisejících se slunečním zářením. Pro výpočet ekvivalentní doby degradace v určité lokaci je ale nejdůležitější hodnotou GHI (global horizontal irradiance) kvantifikující množství přímého i rozptýleného slunečního záření dopadajícího na horizontální plochu. Celkové hodnoty GHI za jeden den ve zvolených lokacích jsou uvedeny v tabulce 9.2. Tyto hodnoty odpovídají časovému rozmezí 21. – 28. května 2024. Tabulka obsahuje také dobu za kterou by byla dosažena zhruba stejná míra degradace jako v provedeném experimentu. Je vidno, že za 1,5 měsíce v klimatické komoře je degradace úměrná pouze několika dnům venkovního záření. Při testování dlouhodobé degradace UV zářením by tedy bylo výhodné použít v klimatické komoře zdroj záření s větším výkonem. [45]

Tabulka 9.2 Celková hodnota GHI za jeden den ve zvolených lokacích [45]

	$E_{den,prům.}$ [Wh/m <sup>2</sup> ]	Ekvivalentní množství záření [dny]
Oslo	5241	5,2
Madrid	8245	3,3
Tunis	7819	3,5

Vzorky byly do komory umístěny na hliníkovou podložku a připevněny pomocí kaptonové pásky (viz obrázek 9.1). Po celou dobu, kdy byly vzorky umístěny v klimatické komoře, tak nedošlo k jejich otočení, což mělo za následek ostřík pouze z jedné strany. Z provedených zkoušek mechanických vlastností může mít tato nerovnost vliv pouze na měření tvrdosti vzorků, jelikož byla měřena zvlášť horní a spodní stranu vzorků.



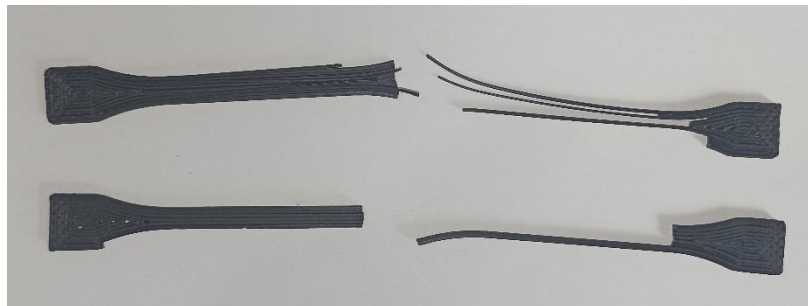
Obrázek 9.1 Uchycené vzorky uvnitř klimatické komory [vlastní zdroj]

### 9.3 Defekty při tisku

Při měření pevnosti materiálů došlo u jedné sady vzorků z PLA k vadnému tisku v tom smyslu, že nebylo dosaženo dostatečného spojení dvou vedlejších tras v jedné vrstvě vzorku. Nepřetržený vadný vzorek je zobrazen na obrázku 9.2. Z této fotografie je hned jasné, že horní strana vzorku není vůbec jednolitá a lze od sebe snadno rozeznat jednotlivé trasy tisku. V přechodu z širší do užší části vzorku byla změna trasy pod ostrým úhlem a v těchto místech docházelo dokonce k tomu, že ve vzorku vznikaly díry přes celou tloušťku vzorků. Na obrázku 9.3 je vidět, jak tento defekt ovlivňoval měření pevnosti. V jeden okamžik došlo k přetržení vždy jen několika vláken namísto prasknutí vzorku po celém zúženém průřezu naráz. To se projevilo i na deformační křivce a tyto výsledky zajisté nebyly směrodatné.



Obrázek 9.2 Detail nepřetrženého vadného vzorku pro měření pevnosti v tahu [vlastní zdroj]



Obrázek 9.3 Přetržené vadné vzorky pro měření pevnosti v tahu [vlastní zdroj]

Na vzniku této vady mohlo mít vliv několik různých podnětů. Mohlo dojít nevědomky k nastavení příliš malé teploty trysky při tisku nebo až moc silného chlazení, což by znamenalo, že by při tisku nebyl materiál roztaven na vyhovující úroveň a nebyl by tedy schopen vytvořit dostatečně silnou vazbu s vedlejší trasou. Toto je ale málo pravděpodobné, jelikož nastavení parametrů tisku je uloženo ve sliceru a většinou se nemění.

Mnohem pravděpodobnější by bylo přílišné navlhnutí materiálu. Vzorky, které byly uloženy do klimatické komory, byly vytisknuty na konci ledna, zatímco tato várka byla tisknuta v dubnu. Tento časový rozdíl má do určité míry zajisté vliv na relativní vlhkost okolí, například díky deštům nebo sněžení v daných dnech, ale také kvůli způsobu udržování teploty v místnosti s tiskárnou.

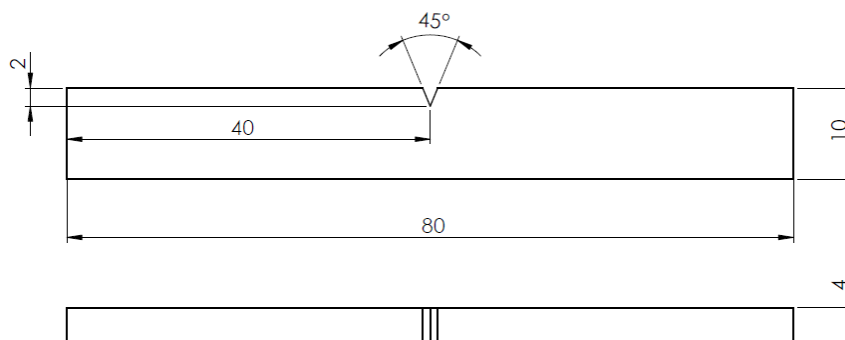
## 10. VLASTNÍ MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ

Tato kapitola se zabývá vlastním měřením mechanických vlastností vybraných materiálů. V následujících podkapitolách jsou podrobněji popsány průběhy měření vrubové houževnatosti, tvrdosti a pevnosti v tahu. Všechny mechanické zkoušky byly prováděny jak pro nedegradovaný materiál, tak i pro vzorky, které byly vystaveny po dobu 1,5 měsíce degradačním účinkům UV komory. Vrbová houževnatost byla navíc měřena při 5 různých teplotách, aby byl prozkoumána i závislost houževnatosti na teplotě a tvrdost byla měřena zvlášť pro horní i spodní stranu vzorků.

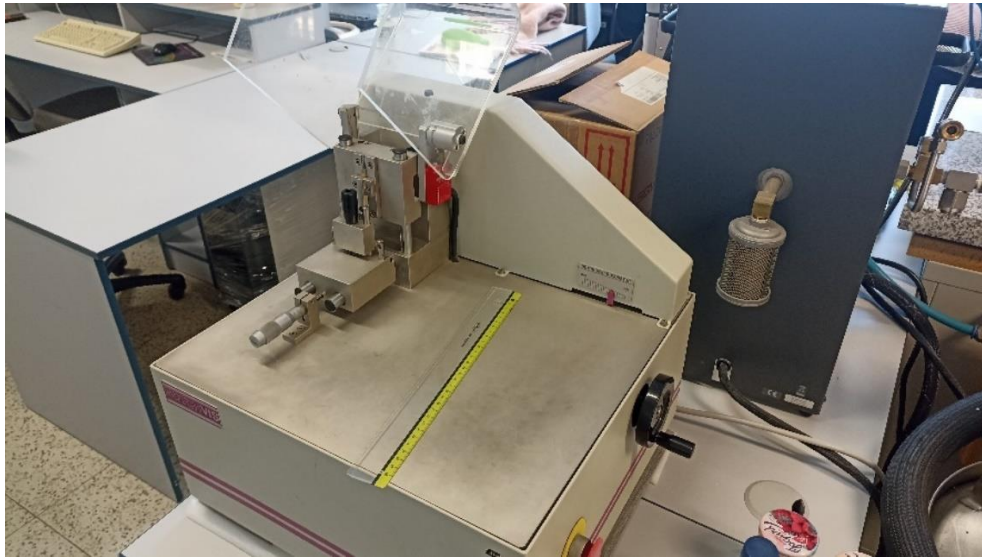
### 10.1 Zkouška vrubové houževnatosti

Jelikož měření vrubové houževnatosti bylo uskutečněno při různých teplotách, tak prvním krokem bylo právě určení těchto teplot. Hodnoty teplot se stanovily takové, jaké se zdály v práci Ing. Hyhlíka zajímavé, ať už kvůli velké směrodatné odchylce nebo například kvůli odklonění od předpokládané hodnoty houževnatosti. Byly tedy zvoleny následující teploty: -70, -20, 25, 60, 70 °C. Měření probíhalo při každé teplotě vždy pro 3 vzorky z dané kategorie, tzn. pro nedegradované vzorky i vzorky po vystavení působení UV komory po dobu 1,5 měsíce a v obou případech pro materiály PLA i PA6 CF15. [55]

Vzorky měly tvar hranolu s obdélníkovou podstavou o rozměrech 80 × 10 × 4 mm (viz obrázek 10.1). Před samotným měřením byly všechny vzorky ještě vrubovány. Vrbování by pro vzorky z PLA nejspíše nebylo nutné, ale z výsledků měření Bc. Blechy a Ing. Hyhlíka lze předpokládat, že u vzorků z materiálu PA6 CF15 by bez vrbování nemuselo dojít k přeražení. Pro sjednocení měření byly tedy vrbovány všechny vzorky. Vrbování bylo prováděno na stroji značky Ceast – viz obrázek 10.2. [43, 44]



Obrázek 10.1 Vzorky pro měření vrubové houževnatosti [vlastní zdroj]



Obrázek 10.2 Zařízení pro vrubování – Ceast NOTCHVIS 6951 [vlastní zdroj]

Samotné měření poté probíhalo na zařízení Zwick 5113.100 – viz obrázek 10.3. Pro zaručení přeražení všech vzorků bylo použito kladivo s nominální energií 10,8 J. Před zahájením měření bylo ještě potřeba kalibrovat kladivo a změřit velikost jeho ztrátové energie. Ta v našem případě vyšla 0,088 J. Tuto hodnotu je při výpočtu vrubové houževnatosti nutno odečíst od všech naměřených hodnot energií nutných k přeražení vzorků.



Obrázek 10.3 Zařízení použité pro měření houževnatosti Zwick 5113.100 [vlastní zdroj]

Temperování vzorků probíhalo dvěma způsoby. V laboratorní horkovzdušné peci (konkrétně modelu Climatic Test Systems ltd. 91250, viz obrázek 10.4) byly vzorky ohřívány na teploty 25, 60 a 70 °C. Vzorky byly rovnoměrně umístěny na kovový táč tak, aby měly od sebe rozstup nejméně 10 mm, a také byly alespoň 50 mm od stěn tácu. Pec umožňovala přímo nastavení teploty, takže nebylo nutné se starat o její následnou regulaci.



Obrázek 10.4 Horkovzdušná pec Climatic Test Systems ltd. 91250 [vlastní zdroj]

Ochlazování vzorků na záporné teploty bylo docíleno pomocí dusíkové komory. Do komory byl naléván tekutý dusík, který byl ředěn technickým lihem. Kapaliny byly neustále promíchávány pomocí magneticky ovládaného míchátka na dně nádoby. Na rozdíl od výše zmíněné pece zde bylo nutno teplotu regulovat ručně. Vzorky byly do komory rovnoměrně rozloženy na vnitřní mřížku, která zajistila, aby vzorky byly nad hladinou použitých kapalin.



Obrázek 10.5 Dusíková komora pro ochlazování vzorků [43]

Tabulky naměřených hodnot, ať už houževnatosti, ale i tvrdosti a pevnosti, obsahují také vypočítané statistické veličiny jako průměr, rozptyl –  $D(X)$  a směrodatnou odchylku –  $\sigma$ . Níže jsou vypsány příklady výpočtu těchto veličin pro nedegradované PLA vzorky měřené při teplotě  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  z tabulky 10.1 (rovnice 8, 9, 10).

$$\text{průměr} = \overline{KCV_{-70}} = \frac{\sum_{i=1}^n KCV_{-70,i}}{n} = 3,406 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \quad (8)$$

$$D(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (KCV_{-70,i} - \overline{KCV_{-70}})^2}{n} = 0,375 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \quad (9)$$

$$\sigma = \sqrt{D(X)} = \sqrt{0,375} = 0,612 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \quad (10)$$

Tabulka 10.1 Naměřené hodnoty kinetické energie potřebné k přeražení vzorků z PLA bez degradace

T [°C]	č. vzorků	E <sub>c</sub> [J]	KCV [kJ·m <sup>-2</sup> ]	průměr	D (X)	σ
-70	22	0,085	2,656	3,406	0,375	0,612
	23	0,133	4,156			
	24	0,109	3,406			
-20	16	0,133	4,156	3,406	0,563	0,750
	17	4,682	146,313			
	18	0,085	2,656			
25	28	0,109	3,406	4,698	5,649	2,377
	29	0,257	8,031			
	30	0,085	2,656			
60	19	0,133	4,156	4,156	0,000	0,000
	20	0,133	4,156			
	21	0,133	4,156			
70	25	1,688	52,750	36,625	244,305	15,630
	26	1,333	41,656			
	27	0,495	15,469			

Z tabulky výše lze vidět, že při zvyšování teploty se nejprve zvyšovala houževnatost nedegradovaného PLA, ale při teplotě 60 °C došlo k jejímu poklesu. Červeně je v tabulce vyznačena hodnota, která byla velmi odlišná od ostatních naměřených hodnot. Oranžově je poté zvýrazněno měření při 70 °C, jelikož nedošlo k přeražení vzorků. Vzorky se pouze plasticky protáhly, jak lze vidět na obrázku 10.6. To znamená, že teplota skelného přechodu použitého PLA se pohybuje v rozmezí 60 až 70 °C



Obrázek 10.6 Nepřeražené nedegradované vzorky z PLA měřené při teplotě 70 °C při zkoumání vrubové houževnatosti [vlastní zdroj]

Tabulka 10.2 Naměřené hodnoty kinetické energie potřebné k přeražení vzorků z PLA po 1,5 měsíci degradace v UV komoře

T [°C]	č. vzorků	E <sub>c</sub> [J]	KCV [kJ·m <sup>-2</sup> ]	průměr	D (X)	σ
-70	7	0,158	4,938	4,563	1,274	1,129
	8	0,183	5,719			
	9	0,097	3,031			
-20	1	0,109	3,406	5,083	8,516	2,918
	2	0,085	2,656			
	3	0,294	9,188			
25	13	0,219	6,844	6,729	2,973	1,724
	14	0,146	4,563			
	15	0,281	8,781			
60	4	0,109	3,406	4,302	0,425	0,652
	5	0,158	4,938			
	6	0,146	4,563			
70	10	0,109	3,406	5,333	3,862	1,965
	11	0,257	8,031			
	12	0,146	4,563			

V tabulce 10.2 jsou vypsány naměřené hodnoty kinetické energie při různých teplotách pro degradované PLA vzorky. Degradace způsobila nárůst houževnatosti a také posun teploty skelného přechodu.

Tabulka 10.3 Naměřené hodnoty kinetické energie potřebné k přeražení vzorků z nylon-karbonu bez degradace

T [°C]	č. vzorků	E <sub>c</sub> [J]	KCV [kJ·m <sup>-2</sup> ]	průměr	D (X)	σ
-70	22.	0,207	6,469	7,047	0,334	0,578
	23.	0,738	23,063			
	24.	0,244	7,625			
-20	16.	0,558	17,438	10,260	25,978	5,097
	17.	0,232	7,250			
	18.	0,195	6,094			
25	28.	0,232	7,250	8,927	4,461	2,112
	29.	0,381	11,906			
	30.	0,244	7,625			
60	19.	0,406	12,688	11,906	0,610	0,781
	20.	0,356	11,125			
	21.	1,895	59,219			
70	25.	0,751	23,469	16,813	23,813	4,880
	26.	0,482	15,063			
	27.	0,381	11,906			

Tabulka 10.3 obsahuje opět červeně označené hodnoty, tedy ty, které se příliš lišily od ostatních. Lze si povšimnout, že houževnatost nedegradovaného nylon-karbonu je výrazně vyšší než u PLA. Také má tento materiál vyšší teplotu skelného přechodu, jelikož ani při teplotě 70 °C nedošlo při měření k plastickému protažení vzorků.

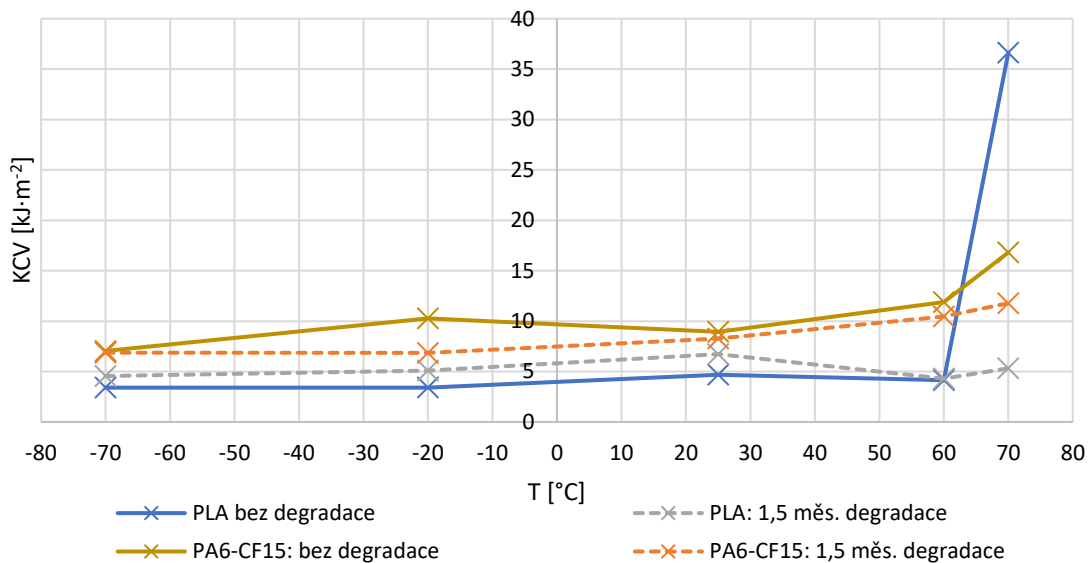
Tabulka 10.4 Naměřené hodnoty kinetické energie potřebné k přeražení vzorků z nylon-karbonu po 1,5 měsíci degradace v UV komoře

T [°C]	č. vzorků	$E_c$ [J]	KCV [ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	průměr	D (X)	$\sigma$
-70	7.	0,207	6,469	6,865	0,704	0,839
	8.	0,257	8,031			
	9.	0,195	6,094			
-20	1.	0,232	7,250	6,854	0,102	0,319
	2.	0,219	6,844			
	3.	0,207	6,469			
25	13.	0,257	8,031	8,281	0,031	0,177
	14.	0,269	8,406			
	15.	0,269	8,406			
60	4.	0,331	10,344	10,479	0,232	0,482
	5.	0,356	11,125			
	6.	0,319	9,969			
70	10.	0,406	12,688	11,781	0,438	0,662
	11.	0,369	11,531			
	12.	0,356	11,125			

Z hodnot v tabulce 10.4 lze vidět, že při degradaci nylon-karbonu došlo na rozdíl od PLA ke snížení jeho houževnatosti.

Výsledná hodnota rázové a vrubové houževnatosti Charpy byla vypočítána pomocí rovnice 1 z průměrné naměřené hodnoty kinetické energie  $E_c$ . Šířka pod vrubem je určena jako hloubka vrubu (2 mm) odečtená od celkové šířky vzorku (10 mm), což je tedy rovno 8 mm. Při dosazení průměrné hodnoty naměřené kinetické energie pro nedegradované vzorky z PLA při teplotě -70 °C získáme:

$$KCV = \frac{0,109}{4 \cdot 8} \cdot 10^3 = 3,406 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \quad (11)$$



Graf 1 Závislost KCV na teplotě degradovaných i nedegradovaných vzorků z PLA a nylon-karbonu PA6 CF15 [vlastní zdroj]

Do grafu 1 je vynesena závislost hodnoty vrubové houževnatosti KCV na teplotě, kterou byly vzorky temperovány. Porovnáním jednotlivých křivek lze vidět, že u PLA došlo po vystavení účinkům UV komory ke zvýšení houževnatosti materiálu. V případě materiálu PA6 CF15 tomu ale bylo přesně naopak. Vzorky, které byly degradovány v UV komoře měly za stejných teplot menší hodnoty houževnatosti.

Co se týče změny houževnatosti v závislosti na teplotě, tak u PLA v obou případech docházelo v rozmezí -70 až 25 °C ke zvyšování houževnatosti s rostoucí teplotou, při teplotě 60 °C ale houževnatost v obou případech klesla. Jak již bylo zmíněno výše, tak při 70 °C nedošlo u nedegradovaných PLA vzorků k přeražení, ale pouze k protažení. Degradované vzorky přeraženy byly, což znamená, že degradace v UV komoře způsobila u vzorků větší křehkost a zároveň došlo ke zvýšení teploty skelného přechodu.

Křivky degradovaného a nedegradovaného PA6 CF15 měly oproti sobě rozdílný průběh. Houževnatost degradovaného PA6 CF15 se v měřeném rozsahu teplot zvyšovala téměř exponenciálně s rostoucí teplotou. Nedegradované PA6 CF15 mělo takový průběh houževnatosti, že nejprve klesala až do 25 °C a poté začala růst s dále se zvyšující teplotou.

Porovnáním výsledků z práce Ing. Hyhlíka jsou zřejmé jisté odchylky mezi jednotlivými měřeními, zejména při teplotách 60 a 70 °C, kdy námi změřené hodnoty vrubové houževnatosti byly výrazně menší. Ve zmíněné práci docházelo při degradaci v UV komoře po dobu 1 měsíce ke zvýšení houževnatosti PA6 CF15 a při degradaci po dobu 2 měsíců k poklesu jeho houževnatosti. Námi změřené výsledky houževnatosti po 1,5 měsíci působení UV komory však byly vždy v rozmezí hodnot naměřených při

1 a 2 měsících, což potvrzuje, že s rostoucí dobou působení UV záření na materiál PA6 CF15 dochází ke snížení jeho houževnatosti. [43]

## 10.2 Zkouška tvrdosti

Tvrdot měření materiálů byla měřena pomocí metody Shore D. Tvrdot byla měřena u nedegradovaných i degradovaných vzorků z materiálů PLA a PA6 CF15. Vzorky pro měření tvrdosti měly tvar kvádrů o rozměrech 50 x 50 x 5 mm (viz obrázek 10.8). K měření tvrdosti materiálů bylo využito tvrdoměru (viz obrázek 10.7), jenž má podstatu, jak je popsáno v kapitole 6.3, ve vtlačení definovaného hrotu do materiálu.



Obrázek 10.7 Tvrdoměr značky Insize se stupnicí Shore D [vlastní zdroj]

Měření probíhalo podle normy ČSN EN ISO 868. Tato norma stanovuje minimální vzdálenost od okraje vzorku 9 mm a vzdálenost mezi jednotlivými body měření 6 mm. Na vzorku bylo před měřením zvoleno 10 bodů ve kterých byla měřena tvrdost. Tyto body jsou znázorněny na obrázku níže (obrázek 10.8). Vzorky byly měřeny z horní i spodní strany, aby bylo zjištěno, zdali se liší jejich tvrdost a případně jak moc odlišné tyto hodnoty jsou.



Obrázek 10.8 Výkres vzorku pro měření tvrdosti s vyznačenými body pro měření [vlastní zdroj]

Tabulka 10.5 Naměřené hodnoty tvrdosti nedegradovaných PLA vzorků

měř. bod	číslo vzorku					
	horní strana [ $H_{SD}$ ]			spodní strana [ $H_{SD}$ ]		
	1	2	3	1	2	3
1	84	83	82	83	86	84
2	84,5	84	85	84,5	85	85
3	83	84	84	84	85	84
4	82	85	83	84	85	85
5	84	84	78	84	86	84
6	83,5	83	79	84	85	83,5
7	83	84	83	84	85	83,5
8	83	81	85	84	85	84
9	81	81	83	84	84	85
10	83	82	81	84	84,5	84,5
průměr	83,10	83,10	82,30	83,95	85,05	84,25
D (X)	0,94	1,69	5,01	0,12	0,32	0,31
$\sigma$	0,97	1,30	2,24	0,35	0,57	0,56
	průměr horní strany		82,83	průměr spodní strany		84,42

V tabulce výše (10.5) jsou výsledky měření tvrdosti nedegradovaných PLA vzorků. Měření probíhalo z horní i spodní strany vždy pro 3 vzorky.

Tabulka 10.6 Naměřené hodnoty tvrdosti PLA vzorků degradovaných po dobu 1,5 měsíce v UV komoře

měř. bod	číslo vzorku					
	horní strana [ $H_{SD}$ ]			spodní strana [ $H_{SD}$ ]		
	1	2	3	1	2	3
1	81,5	78,5	83	85,5	84	85
2	82	82	83	84	86	84
3	82	82	82	83,5	85,5	84
4	82,5	79	82	83	85	84
5	83	81	82,5	83	83	84
6	80	81	80	84,5	85,5	84
7	80	82	80	84,5	84	84
8	82	80	82,5	85	84	84
9	79	79	78,5	84	84	83
10	79	81	79	84	85	84
průměr	81,10	80,55	81,25	84,10	84,60	84,00
D (X)	1,94	1,62	2,61	0,59	0,79	0,20
$\sigma$	1,39	1,27	1,62	0,77	0,89	0,45
	průměr horní strany		80,97	průměr spodní strany		84,23

Z tabulky 10.6 si lze povšimnout, že při degradování PLA došlo ke snížení tvrdosti zejména na horní straně, tvrdost spodní strany byla ovlivněna minimálně.

Tabulka 10.7 Naměřené hodnoty tvrdosti nedegradovaných vzorků z nylon-karbonu

měř. bod	číslo vzorku					
	horní strana [ $H_{SD}$ ]			spodní strana [ $H_{SD}$ ]		
	1	2	3	1	2	3
1	77	78	78	81	80	79
2	73,5	79	79,5	79	82	82
3	78	78	78	80,5	78	81
4	79	78,5	77	80	78	82,5
5	79	77,5	79	84	78	82
6	81	78	79	81	79,5	80
7	79	76,5	79	78	81,5	79,5
8	77	77	76	81	80,5	80,5
9	76	77,5	76	83	80,5	84
10	77	77,5	78	81	82	82
průměr	77,65	77,75	77,95	80,85	80,00	81,25
D (X)	3,80	0,46	1,42	2,70	2,30	2,11
$\sigma$	1,95	0,68	1,19	1,64	1,52	1,45
	průměr horní strany		77,78	průměr spodní strany		80,70

Tabulka 10.7 obsahuje naměřené hodnoty tvrdosti vzorků z nylon-karbonu bez degradace. V porovnání s PLA je tvrdost nylon-karbonu nižší o zhruba 3  $H_{SD}$ .

Tabulka 10.8 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorků z nylon-karbonu degradovaných po dobu 1,5 měsíce v UV komoře

měř. bod	číslo vzorku					
	horní strana [ $H_{SD}$ ]			spodní strana [ $H_{SD}$ ]		
	1	2	3	1	2	3
1	79	80	79	79	78	82
2	77	79,5	79,5	79	78,5	82
3	80	80	80	84	77	81,5
4	80	79,5	80,5	85	79	79,5
5	78	78,5	77,5	81	81	81
6	76,5	79	80	80	81	82
7	77	79,5	78,5	83	79	81
8	79,5	77	80	82	78	82,5
9	78	80	79,5	84	81,5	84
10	77,5	79	79,5	82,5	80	84
průměr	78,25	79,20	79,40	81,95	79,30	81,95
D (X)	1,51	0,76	0,69	4,12	2,06	1,67
$\sigma$	1,23	0,87	0,83	2,03	1,44	1,29
	průměr horní strany		78,95	průměr spodní strany		81,07

Na rozdíl od PLA došlo u nylon-karbonu ke zvýšení tvrdosti při degradování vzorků v klimatické komoře, jak lze vidět v tabulce 10.8.

Výše uvedené tabulky (tabulky 10.5-10.8) obsahují změřené hodnoty tvrdosti všech vzorků. Lze si povšimnout, že u vzorků z PLA je značný rozdíl mezi rozptylem hodnot tvrdosti měřených na horní a spodní straně. To mohlo být zapříčiněno větší rovností spodní strany oproti té horní, na které je reliéf jednotlivých tras tisku daleko znatelnější. Tato skutečnost je způsobena vyhřívanou podložkou, na kterou byla spodní vrstva natištěna. U vzorků z nylon-karbonu tomu bylo ale naopak, na horní straně byla tvrdost měřena s menším rozptylem v porovnání se spodní stranou.

U všech vzorků byla tvrdost spodní strany naměřena větší než u té horní. Tento rozdíl byl 1,58  $H_{SD}$  pro nedegradované PLA; 3,27  $H_{SD}$  pro degradované PLA; 2,92  $H_{SD}$  pro nedegradovaný nylon-karbon a 2,12  $H_{SD}$  pro degradovaný nylon-karbon. Tento rozdíl byl nejspíše způsoben taktéž díky vyhřívané tiskové podložce, která spodní stranu více vytvrdila.

Vlivem působení UV komory po dobu 1,5 měsíce došlo u PLA ke snížení tvrdosti o 1,87  $H_{SD}$  na horní straně a 0,18  $H_{SD}$  na spodní straně. Zmenšení tvrdosti odpovídá předpokladům uvedeným v kapitole 5.2. Na rozdíl od PLA došlo v případě nylon-karbonu po degradaci ke zvýšení tvrdosti vzorků o 1,17  $H_{SD}$  na horní straně a 0,37  $H_{SD}$

na spodní straně. To odporuje předpokladům z kapitoly 5.2, avšak toto měření je v souladu s poznatky z práce Bc. Blechy, kdy také došlo ke zvýšení tvrdosti nylon-karbonu při degradaci v UV komoře po dobu 1 a 2 měsíců. [44]

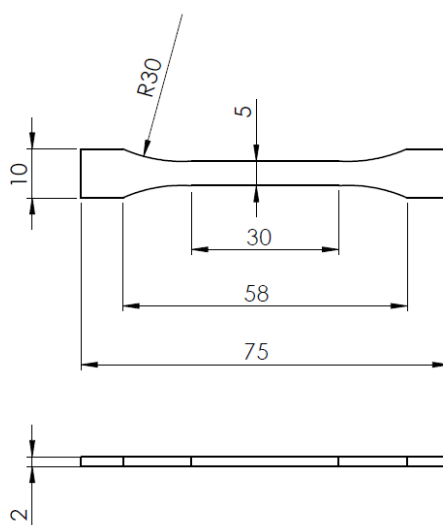
Z předchozího odstavce je zřejmé, že degradace materiálu měla menší vliv na tvrdost měřenou na spodní straně vzorků. Z tohoto lze vyvodit, že degradace pomocí UV záření, vlhkosti okolí a odstříku destilovanou vodou v klimatické komoře za dobu 1,5 měsíce nestihla proniknout do celé hloubky vzorku.

Tvrdost zkoumal ve své práci Bc. Blecha, kde byla měřena pro nedegradované PLA a PA6 CF15 degradované po dobu 1 a 2 měsíců v UV komoře. Porovnáním výsledků pro PA6 CF15 mezi těmito pracemi lze vidět, že námi naměřená tvrdost nedegradovaného nylon-karbonu je o něco vyšší než v měření Bc. Blechy. To mohlo být způsobeno například použitím filamentu od jiného výrobce nebo jinou dobou jeho skladování. Lze však sledovat vývoj tvrdosti v závislosti na degradaci. Měření v této práci dokazuje, že při degradaci nylon-karbonu dochází ke zvýšení jeho tvrdosti. Možnost příčiny tohoto nárůstu uvádí Bc. Blecha jako částečné vyžiháním vzorků v UV komoře. [44]

### 10.3 Zkouška pevnosti v tahu

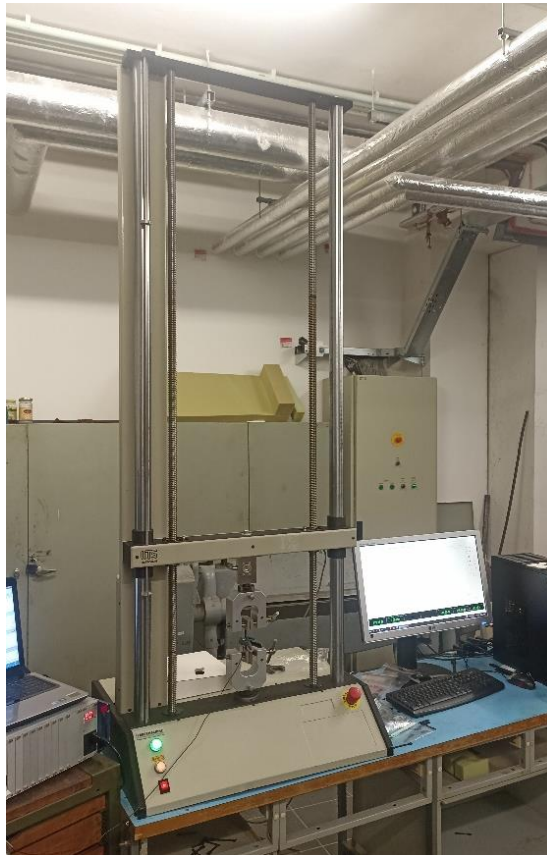
Testování pevnosti materiálů PLA a nylon-karbonu PA6 CF15 bylo uskutečněno pro degradované i nedegradované vzorky, aby bylo možno porovnat výsledky a zhodnotit tak vliv degradace pomocí UV záření na tuto mechanickou vlastnost a také porovnat pevnost obou materiálů navzájem mezi sebou.

Měření pevnosti v tahu probíhalo podle postupu stanoveného v normě ČSN EN ISO 527-2. Tato norma udává několik tvarů testovacích vzorků. Pro naše měření bylo využito vzorků tvaru 1BA, jehož rozměry jsou znázorněny na obrázku 10.9. Tento typ byl využit pro oba materiály.

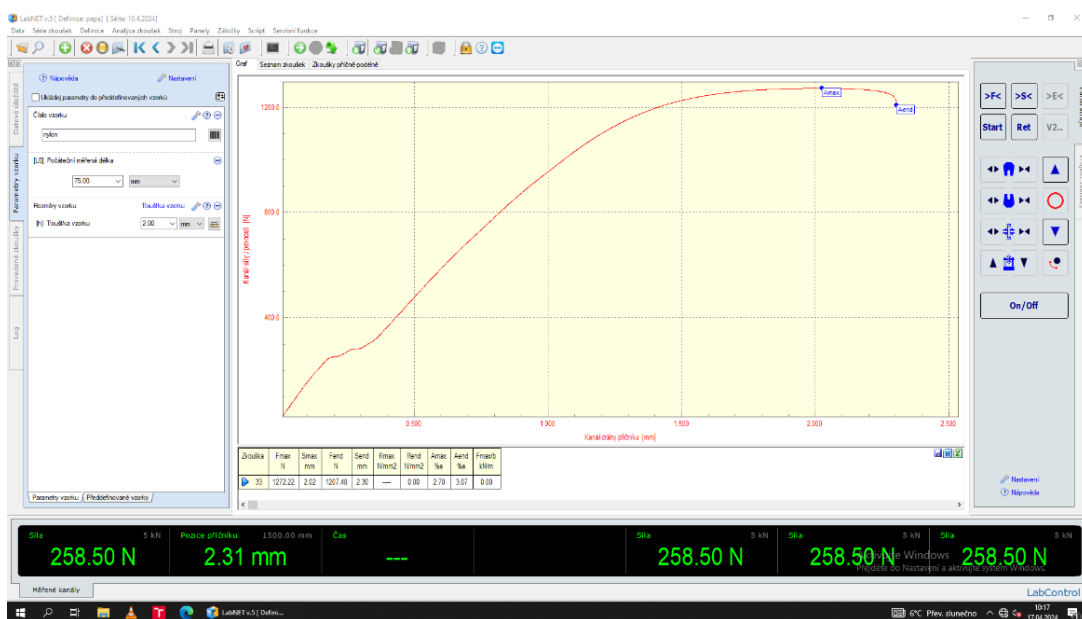


Obrázek 10.9 Výkres vzorku pro měření pevnosti [vlastní zdroj]

Při měření byl vždy vzorek uchycen do trhacího zařízení tak, aby byl vzorek uchopen v čelistech zhruba v polovině rozšířené části. Použitý trhací přístroj byl LABOR MACHINE UTS 5 (viz obrázek 10.10), kde číslice 5 v názvu znamená, že je stroj schopen vyvinout maximální sílu 5 kN. Přístroj byl ovládán přes připojený počítač v programu LabControl. Prostředí tohoto programu je ukázáno na obrázku 10.11. Parametry zkoušky byly nastaveny pro všechna testování následovně: rychlost pohybu příčnicku 5 mm/min a jako kritérium pro ukončení zkoušky bylo nastaven pokles síly na 50 % hodnoty  $F_{max}$ .



Obrázek 10.10 Trhací přístroj LABOR MACHINE UTS 5 [vlastní zdroj]



Obrázek 10.11 Prostředí ovládacího programu LabControl [vlastní zdroj]

Z deformační křivky na obrázku 10.11 lze vidět, že na počátku měření došlo v určitém okamžiku k prudkému skoku ve vzdálenosti čelistí, s čímž souvisí i protažení vzorku vyhodnocované programem. Tento jev nastal při každém měření a byl způsoben vyrovnáním čelistí přístroje tak, aby byly přesně v jedné rovině. Tuto chybu nebylo možno odstranit, avšak na výsledné hodnoty by měla mít minimální vliv a lze ji tedy zanedbat.

Po dobu průběhu zkoušky program zaznamenával hodnoty použité síly a vzdálenosti čelistí, a tedy prodloužení vzorku. Tyto hodnoty byly průběžně vynášeny i do grafu deformační křivky. Po ukončení zkoušky program z naměřených dat vyjmul maximální a konečné hodnoty síly, protažení a relativního prodloužení. Z těch byly poté sestrojeny tabulky pro každý typ vzorků zvlášť (tabulky 10.9-10.12).

Tabulka 10.9 Naměřené hodnoty tahové zkoušky nedegradovaných PLA vzorků

č. vzorku	F <sub>max</sub> [N]	S <sub>max</sub> [mm]	F <sub>end</sub> [N]	S <sub>end</sub> [mm]	A <sub>max</sub> [%e]	A <sub>end</sub> [%e]
1	539,66	1,73	383,03	2,01	2,30	2,68
2	460,25	1,64	458,37	1,73	2,19	2,31
3	539,71	1,75	275,77	2,13	2,33	2,84
4	434,50	1,27	434,50	1,27	1,70	1,70
5	573,48	2,07	553,10	2,08	2,76	2,77
6	592,59	1,78	568,99	1,78	2,37	2,38
7	519,41	1,47	517,41	1,47	1,96	1,97
8	528,40	1,75	506,70	1,79	2,33	2,39
9	584,34	1,98	476,75	2,17	2,63	2,89
10	515,33	1,85	439,08	2,44	2,46	3,25
průměr	528,77	1,73	461,37	1,89	2,31	2,52

Z hodnot získaných při jednotlivých měření pevnosti nedegradovaných PLA vzorků je vidno, že bylo vhodné využití většího množství vzorků, jelikož docházelo k relativně velkému rozptylu naměřených hodnot.

Tabulka 10.10 Naměřené hodnoty tahové zkoušky degradovaných PLA vzorků

č. vzorku	F <sub>max</sub> [N]	S <sub>max</sub> [mm]	F <sub>end</sub> [N]	S <sub>end</sub> [mm]	A <sub>max</sub> [%e]	A <sub>end</sub> [%e]
11	462,91	1,38	352,29	1,99	1,83	2,65
12	517,36	1,67	397,06	1,98	2,23	2,64
13	435,64	1,27	411,28	1,27	1,70	1,70
14	565,54	1,77	483,57	2,14	2,36	2,85
15	564,02	1,88	511,09	1,91	2,51	2,55
16	482,71	1,43	481,57	1,43	1,91	1,91
17	510,21	1,84	457,15	1,93	2,46	2,58
18	529,56	1,51	529,53	1,51	2,01	2,01
19	522,51	1,58	451,79	1,97	2,10	2,63
průměr	510,05	1,59	452,82	1,79	2,12	2,39

Tabulka 10.10 ukazuje, že při degradaci PLA vzorků v klimatické komoře došlo k mírnému poklesu maximální síly, které byl vzorek schopen pojmout před přetržením. Zároveň došlo ke zmenšení maximálního protažení PLA vzorků po degradaci.

Tabulka 10.11 Naměřené hodnoty tahové zkoušky nedegradovaných PACF vzorků

č. vzorku	F <sub>max</sub> [N]	S <sub>max</sub> [mm]	F <sub>end</sub> [N]	S <sub>end</sub> [mm]	A <sub>max</sub> [%e]	A <sub>end</sub> [%e]
20	1611,24	1,72	1371,98	1,74	2,30	2,32
21	1391,21	1,53	1338,55	1,58	2,05	2,10
22	1172,99	1,72	1120,69	1,78	2,29	2,38
23	1438,26	1,64	1394,58	1,67	2,18	2,23
24	1466,45	1,66	1387,77	1,70	2,21	2,27
25	1491,11	1,60	1466,12	1,63	2,14	2,18
26	1573,39	1,93	1533,69	2,01	2,57	2,68
27	1578,36	2,03	1483,80	2,08	2,71	2,77
průměr	1465,38	1,73	1387,15	1,78	2,31	2,37

Do tabulky 10.11 jsou vyneseny výsledky měření pevnosti pro nedegradované vzorky z nylon-karbonu. Oproti PLA má nylon-karbon téměř trojnásobnou mez pevnosti v tahu, jelikož je přímo úměrná maximální vyvinuté síle (viz rovnice 2).

Tabulka 10.12 Naměřené hodnoty tahové zkoušky degradovaných PACF vzorků

č. vzorku	F <sub>max</sub> [N]	S <sub>max</sub> [mm]	F <sub>end</sub> [N]	S <sub>end</sub> [mm]	A <sub>max</sub> [%e]	A <sub>end</sub> [%e]
28	1061,76	1,34	1057,45	1,34	1,79	1,79
29	1102,08	1,53	1094,54	1,54	2,04	2,05
30	1100,59	1,30	1090,93	1,31	1,73	1,75
31	1074,70	1,43	1072,73	1,43	1,90	1,91
32	1126,70	1,52	1112,30	1,55	2,03	2,07
33	1208,59	1,58	1191,33	1,60	2,11	2,14
34	1098,65	1,29	1095,37	1,30	1,72	1,73
35	1207,38	1,56	1069,89	1,58	2,08	2,11
36	1090,72	1,48	1086,70	1,49	1,98	1,99
37	1185,25	1,42	1176,34	1,43	1,90	1,91
průměr	1125,64	1,45	1104,76	1,46	1,93	1,95

Degradováním nylon-karbonu v klimatické komoře došlo ke snížení meze pevnosti v tahu a také k maximálnímu protažení vzorků před jejich přetržením.

Tabulka 10.13 Srovnání průměrných naměřených hodnot tahové zkoušky nedegradovaných i degradovaných vzorků z PLA a PACF

		F <sub>max</sub> [N]	S <sub>max</sub> [mm]	F <sub>end</sub> [N]	S <sub>end</sub> [mm]	A <sub>max</sub> [%e]	A <sub>end</sub> [%e]	σ <sub>m</sub> [MPa]
PLA	nedeg.	528,77	1,73	461,37	1,89	2,31	2,52	52,88
	deg.	510,05	1,59	452,82	1,79	2,12	2,39	51,01
PACF	nedeg.	1465,38	1,73	1387,15	1,78	2,31	2,37	146,54
	deg.	1125,64	1,45	1104,76	1,46	1,93	1,95	112,56

Poslední sloupec v tabulce 10.13 jsou výsledné hodnoty pevnosti v tahu vypočítané podle vzorce 2 do rovnice 12. Pro názornost je níže uveden příklad výpočtu meze pevnosti pro nedegradované PLA. Za hodnoty maximální síly vyvinuté na vzorek je dosazena její průměrná hodnota z tabulky: 528,77 N. Průřez vzorků je roven šířce zúžené části (5 mm) násobené tloušťkou vzorku (2 mm).

$$\sigma_{m;PLA,ndeg} = \frac{F_{max}}{S_0} = \frac{528,77}{5 \cdot 2} = 52,88 \text{ MPa} \quad (12)$$

Porovnáním průměrných výsledků všech provedených zkoušek pevnosti je možno vyvodit následující skutečnosti: S maximální silou vyvinutou na vzorek souvisí přímo úměrně i mez pevnosti, tzn. že mez pevnosti nylon-karbonu je výrazně vyšší než mez pevnosti u PLA. U nedegradovaných vzorků docházelo u PLA i nylon-karbonu ke stejnému protažení. Degradace u vzorků způsobila u obou materiálů snížení meze pevnosti i maximálního protažení vzorku. U vzorků z nylon-karbonu měla degradace ale znatelně větší dopad na zhoršení těchto vlastností.

Dále lze dosažené výsledky opět porovnat s výsledky z bakalářské práce Bc. Blechy. Při jeho měření došlo při působení UV komory po dobu 1 měsíce k snížení meze pevnosti na méně jak polovinu. Při degradaci po dobu 2 měsíců byla poté mez pevnosti naměřena jako pouze mírně menší než u nedegradovaných vzorků. Jak je již zmíněno výše, tak u našeho měření došlo ke zmenšení meze pevnosti nylon-karbonu po degradaci, avšak toto zmenšení bylo daleko menší než při 1měsíční degradaci, ale také znatelně větší jako při 2měsíční degradaci v práci Bc. Blechy. Z tohoto lze tedy vyvodit pouze to, že při degradování nylon-karbonu dochází ke zmenšení jeho meze pevnosti. [44]

# 11. PŘÍPADOVÁ STUDIE

V této práci je případová studie rozdělena na dvě části. První je návrh objektu, který by byl vhodný pro výrobu ze zkoumaného materiálu PA6 CF15. Vybraným tělesem je úchyt zapalovací cívky. Nylon-karbon je tepelně odolný materiál, což je důvod, proč byl vybrán zrovna právě úchyt cívky, jelikož je v motorovém prostoru teplotně namáhán.

Druhá část se zabývá návrhem mobilního stanoviště určeného pro 3D tisk. Tím je myšleno konkrétně pracoviště, které by sloužilo například pro rychlou opravu porouchaných zařízení. Pracoviště by nabízelo hlavně 3D skener pro rychlé vytvoření digitálního modelu potřebného tělesa, počítač pro případné úpravy a samozřejmě také 3D tiskárny pro samotný tisk nových součástek.

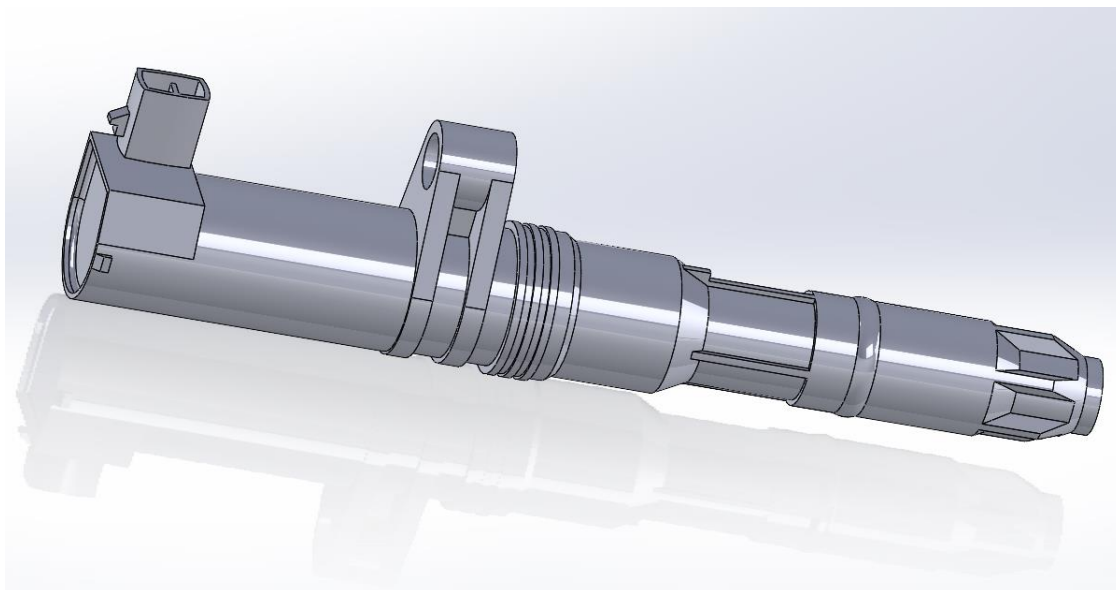
## 11.1 Návrh úchytu zapalovací cívky

Jak napovídá název této podkapitoly, tak jako těleso pro případovou studii byl vybrán úchyt zapalovací cívky. Tato součástka je teplotně namáhána, takže je vhodné použít jako materiál právě například nylon-karbon PA6 CF15, jehož mechanické vlastnosti byly v této práci zkoumány. Jelikož se jedná o skořepinový objekt s dírou pouze na jedné straně, tak lze využít jedné výhody 3D tisku, a to konkrétně možnosti pozastavení tisku v určitý moment. To nám umožňuje do výrobku vložit dílčí součásti, které by jinak bylo dovnitř obtížné umístit.



Obrázek 11.1 Referenční úchyt zapalovací cívky sloužící pro vytvoření digitálního modelu [vlastní zdroj]

Po důkladném změření všech rozměrů součástky bylo možno pomocí CAD programu sestojit digitální model úchytu zapalovací cívky (viz obrázek 11.2). Z toho modelu byl následně vytvořen i výkres, který je přílohou této bakalářské práce.



Obrázek 11.2 3D model úchytu zapalovací cívky [vlastní zdroj]

## 11.2 Návrh mobilního pracoviště pro 3D tisk

Tato kapitola je věnována návrhu mobilního pracoviště pro 3D tisk. Jak bylo již v předmluvě této kapitoly popsáno, tak hlavním cílem tohoto pracoviště by mělo být umožnění rychlého a flexibilního způsobu opravy poškozených dílů nebo výroby nových součástek.

Základními částmi pracoviště jsou: 3D tiskárna, 3D skener, pracovní stůl, pracoviště s počítačem, místo pro skladování filamentů, sušící komora pro filameny a klimatizace. Jelikož bylo vybráno mobilní pracoviště, tak bude všechno obsaženo v jednom standardním skladovém kontejneru, který lze pořídit za cca 120 000 Kč. To umožňuje snadnou přepravu případným naložením například na nákladní automobil. V následujících odstavcích jsou rozvedeny jednotlivé části pracoviště a je zhodnocena i jeho možná cena.

Nejdůležitějším prvkem tohoto pracoviště je určitě 3D tiskárna. Při jejím výběru je nutno brát v potaz několik kritérií. Hledané budou pouze FDM tiskárny. Při uvažování, že by toto pracoviště mohlo být využíváno například vojáky v terénu, tak může být důležitá velikost tiskové plochy a zároveň může být kladen menší důraz na pořizovací cenu tiskárny. Dále je nutno zjistit jaké materiály je tiskárna schopna využívat, což ovlivňuje hotend (tryska, chladič, topný blok, ...). Uzavřená komora tiskárny v tomto případě není zcela nutná, jelikož bude pracoviště zahrnovat i klimatizaci. Tiskárnou by tedy mohl být například model VEHO-1000 od firmy Tronxy, který umožňuje tisk součástek o velikosti až  $1\text{ m}^3$  s hotendem podporujícím tisk až při  $320\text{ °C}$ , to je dostačující pro většinu používaných materiálů. Pořizovací cena tohoto modelu se pohybuje kolem 73 000 Kč. S velikostí tisknutých součástek pochopitelně narůstá i čas potřebný k jejich

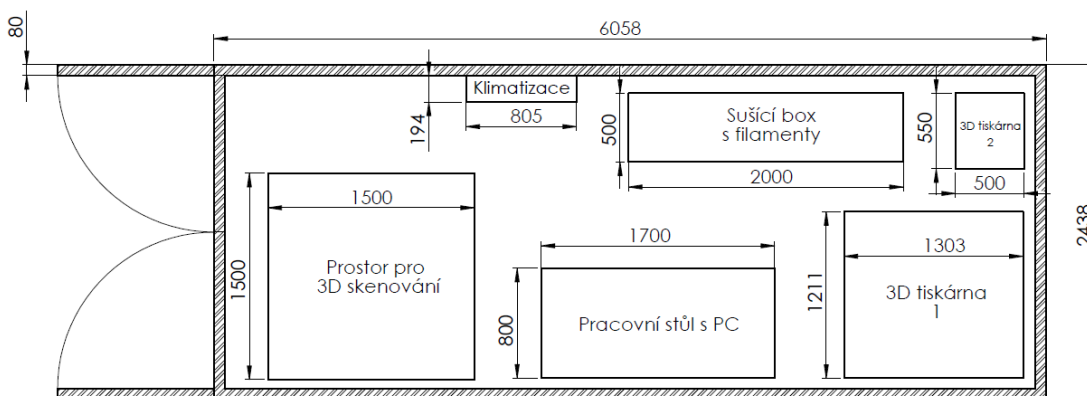
tisku, a proto by bylo vhodné pořízení i druhé menší tiskárny, třeba Prusa MK4. Tento model lze zakoupit za cenu zhruba 21 000 Kč. [46, 47]

Další důležitou součástí je 3D skener, který může mnohonásobně usnadnit a urychlit tvoření komplexních modelů, když je k dispozici referenční objekt. Skener je ve formě ručního zařízení, je ale vhodné vymezit prostor pro skenované objekty přímo uvnitř pracoviště. Nákupní cena profesionálního 3D skeneru se může pohybovat kolem 300 000-400 000 Kč. Konkrétním příkladem by mohl být Shining 3D EinScan HX, který lze v balíčku s příslušným softwarem pořídit za 362 000 Kč. [48]

Se 3D skenerem i 3D tiskárnou souvisí pochopitelně i pracoviště s počítačem pomocí kterého lze zpracovat data ze skeneru a zároveň vytvářet modely pro tiskárnu. Dostatečně výkonný počítač s potřebnými periferiemi lze pořídit za cca 40 000 Kč.

Většinu FDM filamentů je vhodné uchovávat v suchém prostředí, aby nedošlo ke zhoršení jejich vlastností vlivem absorpce vlhkosti. Proto by byly pořízeny sušící boxy pro filameny, jejichž cena se pohybuje okolo 2 000 Kč.

Poslední důležitou částí pracoviště je klimatizace. Možnost udržení konstantní teploty je velmi výhodná pro docílení co nejvíce kvalitního FDM tisku. Ceny komerčně dostupných klimatizací se pohybují okolo 50 000 Kč. Opět ale při uvažování vojenské aplikace by nebyl kladen příliš velký důraz na cenu, ale na výkon. Teplota pracoviště udržovaná klimatizací záleží velmi na používaných materiálech. Např. pro PLA je vhodné udržovat teplotu v rozmezí zhruba 20-25 °C, zatímco u ABS je výhodné tisknout při okolní teplotě kolem 40-50 °C, takto vysoké teploty jsou ale většinou docíleny pomocí tisku v uzavřené komoře. Pro klimatizaci je důležitější spíše minimalizovat teplotní výkyvy okolí. Tím je docíleno co nejmenší zvlnění modelu při tisku.



Obrázek 11.3 Půdorys navrhnutého mobilního pracoviště pro 3D tisk [vlastní zdroj]

## 12. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala problematikou 3D tisku. Jsou popsány principy funkce různých metod 3D tisku, jako například FDM, SLA a SLS. Jsou také vypsány výhody a nevýhody jednotlivých technologií.

Dále se tato práce věnuje několika materiálům, které jsou v oblasti 3D tisku využívány. Je rozebrán postup výroby daných materiálů a jejich důležité vlastnosti. Jsou také uvedeny jejich přednosti a omezení a s tím i související uplatnění v různých oblastech průmyslu.

Jedna kapitola je věnována klasickým metodám výroby polymerních dílů, čímž je myšleno vstřikování, lisování, vyfukování a odlévání. Podrobně je popsán výrobní proces každé zmíněné technologie.

Pomocí Saatyho metody byla zhodnocena výhodnost využití technologie 3D tisku při prototypování oproti zástupcům klasických metod, přesněji vstřikování a odlévání. Hodnocení výhodnosti 3D tisku vyšlo 47,8 % dle námi stanovených kritérií a preferencí.

Pro experimentální část této práce bylo důležité znát vliv okolního prostředí na polymerní díly. Byla proto provedena rešerše na degradaci materiálů díky vlivu UV záření, vlhkosti a změny tepla. Tyto tři podněty kontrolovaně působily na vzorky při degradaci v klimatické komoře.

Bakalářská práce se zabývá třemi mechanickými zkouškami polymerních materiálů: zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy, zkouška tvrdosti pomocí metody Shore D a zkouška pevnosti v tahu. Teorie zkoušek definuje vždy danou mechanickou vlastnost a dále uvádí postupy využívané při měření těchto vlastností a vzorce potřebné pro výpočty

Zkoumanými materiály byly PLA a nylon-karbon PA6 CF15. Materiál PLA byl zvolen jakožto referenční, jelikož se jedná o jeden z nejvíce používaných materiálů pro FDM tisk. PA6 CF15 bylo zvoleno kvůli svým dobrým charakteristikám, jako například tepelné odolnosti. Materiály byly vybrány také kvůli tomu, že tato bakalářská práce navazuje svou experimentální částí na bakalářskou práci Bc. Blechy a diplomovou práci Ing. Hyhlíka. Ve zmíněných pracích byly zkoumány stejné materiály s tím rozdílem, že byly vystaveny účinkům degradace po doby 1 a 2 měsíců. Tato práce tedy rozšiřuje obzory degradace materiálů díky různé době působení klimatické komory. [43, 44]

Experimentální část zkoumala vliv degradace materiálů na jejich mechanické vlastnosti. Slouží také k prohloubení znalostí v oblasti působení tepla na mechanické vlastnosti vybraných polymerních materiálů. Degradace materiálů probíhala v klimatické komoře, kde na vzorky působilo v definovaných 24hodinových cyklech UV záření, vzorky byly zároveň ošťikovány destilovanou vodou a v komoře byla nastavena určitá relativní vlhkost. Vzorky byly degradovány po dobu 1,5 měsíce.

Degradace způsobila u PLA zvýšení houževnatosti a při měření byl zároveň zpozorován nárůst teploty skelného přechodu. Došlo také ke snížení tvrdosti PLA

o cca 1,9  $H_{SD}$  na horní straně, na spodní straně byl pokles tvrdosti minimální (cca 0,2  $H_{SD}$ ), což znamená, že degradace nepronikla do celého objemu vzorků. Mez pevnosti PLA se po degradaci snížila o cca 1,8 MPa a maximální protažení se zmenšilo o 0,14 mm.

U nylon-karbonu došlo při měření houževnatosti k opačnému jevu jako u PLA – v celém rozsahu měřených teplot byla po degradaci naměřena menší hodnota rázové houževnatosti. Změna tvrdosti vzorků z nylon-karbonu při degradaci byla opět opačného charakteru vzhledem k PLA, došlo tedy ke zvýšení tvrdosti vzorků o zhruba 1,2  $H_{SD}$  na horní straně a přibližně 0,4  $H_{SD}$  na spodní straně. Mez pevnosti nylon-karbonu se ale snížila stejně jako v případě PLA, avšak degradace měla v případě nylon-karbonu daleko větší vliv na tento pokles. Mez pevnosti klesla po degradaci o cca 34 MPa a maximální protažení vzorku o 0,28 mm.

Poslední kapitola byla věnována případové studii návrhu součástky vhodné pro výrobu ze zkoumaného materiálu PA6 CF15, tou byl zvolen úchyt zapalovací cívky automobilu. Výběr součástky vycházel z naměřených hodnot mechanických vlastností a tepelné odolnosti nylon-karbonu. Součástka byla důkladně změřena a pomocí programu Solidworks byl vytvořen její digitální model a z něho i následně výrobní výkres.

Část případové studie se zabývala také návrhem mobilního pracoviště pro 3D tisk. To znamená, že veškeré potřebné vybavení bylo umístěno do přepravního kontejneru, který lze snadno přemísťovat pomocí například nákladních automobilů. Pro pracoviště tedy byla zhodnocena veškerá potřebná zařízení a součástí návrhu pracoviště bylo i orientační určení jeho možné pořizovací ceny.

## LITERATURA

- [1] When Was 3D Printing Invented? The History of 3D Printing [online]. 2020 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/the-history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [2] KOČÍ, Jakub. 3MF file format and why it's great [online]. 2019 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: [https://blog.prusa3d.com/cs/co-je-format-3mf-a-proc-by-vas-mel-zajimat\\_30986/](https://blog.prusa3d.com/cs/co-je-format-3mf-a-proc-by-vas-mel-zajimat_30986/)
- [3] FS ČVUT. SLA [online]. c2014-2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/sla-3dtisk/>
- [4] HUBS. What is SLA 3D printing? [online]. c2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [5] BOYD, Gabriel a Leo GREGURIĆ. ALL3DP. What Is a DLP 3D Printer? – Simply Explained [online]. 2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/dlp-3d-printer-digital-light-processing-explained/>
- [6] CAROLO, Lucas. ALL3DP. What Is FDM 3D Printing? – Simply Explained [online]. 2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- [7] 3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). Polymers [online]. 2021, 13(18), 37 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/18/3101>
- [8] 3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS. Online. Arptech. Dostupné z: <https://www.arptech.com.au/blog/3d-printing-technology-comparison-fdm-vs-sla-vs-sls.htm>. [cit. 2024-05-27].
- [9] HUBS. What is SLS 3D printing? [online]. c2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
- [10] V., Carlota. Is PLA filament actually biodegradable? Online. 3D Natives. 2023. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/pla-filament-230720194/>. [cit. 2023-12-12].
- [11] CASTRO-AGUIRRE, E.; IÑIGUEZ-FRANCO, F.; SAMSUDIN, H.; FANG, X. a AURAS, R. Poly(lactic acid)—Mass production, ... Online. In: Advanced Drug Delivery Reviews. 2016, s. 333-366. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169409X16300965>. [cit. 2023-12-12].
- [12] V., Carlota. All You Need to Know About PLA for 3D Printing. Online. 3D Natives. 2023. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/pla-3d-printing-guide-190820194/>. [cit. 2023-12-12].
- [13] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery. Online. 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>. [cit. 2023-12-12].
- [14] Technical Data Sheet PLA. Online. In: BCN3D. Dostupné z: <https://www.bcn3d.com/wp->

- content/uploads/2019/09/BCN3D\_FILAMENTS\_TechnicalDataSheet\_PLA\_EN.pdf. [cit. 2024-05-27].
- [15] Material Data Sheet PLA. Online. In: Roffelsen 3D. Dostupné z: [https://roffelsen3d.com/wp-content/uploads/2023/11/Roffelsen3D\\_FFF\\_PLA\\_Material-Data-Sheet\\_v7.pdf](https://roffelsen3d.com/wp-content/uploads/2023/11/Roffelsen3D_FFF_PLA_Material-Data-Sheet_v7.pdf). [cit. 2024-05-27].
- [16] PETRA. An Introduction to PET (polyethylene terephthalate) [online]. c2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://petresin.org/an-introduction-to-pet/>
- [17] COSTANTINO, Greg. JUGGERBOT3D. POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) [online]. c2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://juggerbot3d.com/pet-filament-review/>
- [18] Material Data Sheet PET. Online. In: RS Components. Dostupné z: <https://docs.rs-online.com/450b/0900766b815ed6cf.pdf>. [cit. 2024-05-27].
- [19] Material Data Sheet PET. Online. In: Roffelsen 3D. Dostupné z: [https://roffelsen3d.com/wp-content/uploads/2023/02/Roffelsen3D\\_FFF\\_PET\\_Material-Data-Sheet\\_v6.pdf](https://roffelsen3d.com/wp-content/uploads/2023/02/Roffelsen3D_FFF_PET_Material-Data-Sheet_v6.pdf). [cit. 2024-05-27].
- [20] PARENTI, Matteo. ALL3DP. PET vs PETG: The Main Differences [online]. 2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/pet-vs-petg-differences-simply-explained/>
- [21] V., Carlota. 3D NATIVES. All You Need to Know About PETG for 3D printing [online]. 2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/petg-3d-printing-guide-181220194/>
- [22] Technical Data Sheet PET-G. Online. In: BCN3D. Dostupné z: [https://3dprint.pe/wp-content/uploads/2018/09/TDS\\_BCN3D\\_Filaments\\_PETG.pdf](https://3dprint.pe/wp-content/uploads/2018/09/TDS_BCN3D_Filaments_PETG.pdf). [cit. 2024-05-27].
- [23] Material Data Sheet PET-G. Online. In: Roffelsen 3D. Dostupné z: [https://roffelsen3d.com/wp-content/uploads/2023/11/Roffelsen3D\\_FFF\\_PET-G\\_Material-Data-Sheet\\_v3.pdf](https://roffelsen3d.com/wp-content/uploads/2023/11/Roffelsen3D_FFF_PET-G_Material-Data-Sheet_v3.pdf). [cit. 2024-05-27].
- [24] THE OPEN UNIVERSITY. How is nylon made? [online]. 2022 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/science/chemistry/how-nylon-made>
- [25] V., Carlota. 3D NATIVES. All You Need to Know About Nylon for 3D printing [online]. 2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/nylon-3d-printing-guide-120320204/>
- [26] WEERG. PA12 VS PA11: WHAT ARE THE DIFFERENCES? [online]. 2021 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.weerg.com/guides/nylon-pa-11-vs-pa-12>
- [27] PA6/66. Online. In: Bigrep. C2024. Dostupné z: <https://bigrep.com/filaments/pa6-66/>. [cit. 2024-05-27].

- [28] Technical Data Sheet PA6 low warp. Online. In: Spectrum Filaments. 2022. Dostupné z: [https://spectrumfilaments.com/wp-content/uploads/2021/09/en\\_tds\\_spectrum\\_pa6\\_low\\_warp.pdf](https://spectrumfilaments.com/wp-content/uploads/2021/09/en_tds_spectrum_pa6_low_warp.pdf). [cit. 2024-05-27].
- [29] JUGGERBOT3D. CARBON FIBER REINFORCED NYLON [online]. c2023 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://juggerbot3d.com/nylon-cf-filament-review/>
- [30] Technical Data Sheet PA6 CF15. Online. In: Spectrum Filaments. 2022. Dostupné z: [https://spectrumfilaments.com/wp-content/uploads/2022/05/en\\_tds\\_spectrum\\_pa6\\_cf15.pdf](https://spectrumfilaments.com/wp-content/uploads/2022/05/en_tds_spectrum_pa6_cf15.pdf). [cit. 2024-05-27].
- [31] Material Data Sheet PA6 CF15. Online. In: Roffelsen 3D. 2023. Dostupné z: [https://roffelsen3d.com/wp-content/uploads/2023/11/Roffelsen3D\\_FFF\\_PA6-CF15-Black\\_Material-Data-Sheet\\_v1.pdf](https://roffelsen3d.com/wp-content/uploads/2023/11/Roffelsen3D_FFF_PA6-CF15-Black_Material-Data-Sheet_v1.pdf). [cit. 2024-05-27].
- [32] SKÁCEL, Jan. Technologie zpracování plastů. Online, Bakalářská práce. Brno: VUT FSI, 2013. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=65933](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65933). [cit. 2023-12-12].
- [33] AUSPERGER, Aleš. Technologie zpracování plastů [online]. [cit. 2023-12-12]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Uvod.html>
- [34] LENFELD, Petr. In: Skripta - Technologie II [online]. [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: [https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/obsah\\_plasty.htm](https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm)
- [35] Charakteristika odlévání plastů [online]. Verlag Dashöfer, 2015 [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.strojirenstviprofi.cz/33/charakteristika-odlevani-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxseFtfkmPiq0/>
- [36] KUDLÁČEK, Ivan. Mechanismus fotochemické degradace. Online. 4.2.2021. Dostupné z: <https://www.ib.cvut.cz/doku.php?id=plasty:mdegradacep>. [cit. 2023-12-12].
- [37] LENFELD, Petr. Online. In: Printing on Polymers. William Andrew Publishing, 2016, s. 353-370. ISBN 9780323374682. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323374682000221>. [cit. 2023-12-12].
- [38] SHACKLEFORD, A.; WILLIAMS, R.; BROWN, R.; WINGHAM, J. a MAJEWSKI, C. Degradation of Laser Sintered polyamide 12 parts ... Online. Additive Manufacturing. 2021, roč. 46. Dostupné z: 43 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860421002967>. [cit. 2023-12-15]
- [39] ČERNOCH, Oldřich. Vliv klimatických podmínek na vlastnosti vybraných polymerů. Online, Diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2018. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/42302>. [cit. 2023-12-12].
- [40] RANDHAWA, K. S. a PATEL, A. The effect of environmental humidity/water absorption on tribo-mechanical performance of polymers and polymer composites - a review. Online. Industrial lubrication and tribology. 2021, roč. 73, č. 9, s.

- 1146-1158. Dostupné z:  
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ILT-02-2021-0045/full/pdf?title=the-effect-of-environmental-humiditywater-absorption-on-tribo-mechanical-performance-of-polymers-and-polymer-composites-a-review>. [cit. 2024-05-27].
- [41] CELESTINE, A. N. a ZHU, S. S. Effect of Temperature and Moisture on the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Nylon 6 Composites. Online. Challenges in Mechanics of Time Dependent Materials. 2016, č. 2, s. 109-118. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41543-7\\_14](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41543-7_14). [cit. 2024-05-27].
- [42] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 868, Plasty a ebonit - Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore).
- [43] HYHLÍK, P. Využití technologie 3D tisku v automobilovém průmyslu. Online, Diplomová práce. Brno: VUT FEKT, 2023. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=255202](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=255202). [cit. 2024-05-27].
- [44] BLECHA, M. Posouzení technologie 3D tisku v průmyslu. Online, Bakalářská práce. Brno: VUT FEKT, 2023. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=258591](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=258591). [cit. 2024-05-27].
- [45] Solar API and Weather Forecasting Tool. Online. Solcast. Dostupné z: <https://solcast.com>. [cit. 2024-05-28].
- [46] Veho 1000. Online. Tronxy. C2024. Dostupné z: <https://www.tronxy3dprinter.com/products/tronxy-veho-1000-large-scale-3d-printer-big-format-direct-drive-3d-printer-build-size-1000x1000x1000mm-320-degree-hotend?variant=43995068301532>. [cit. 2024-05-27].
- [47] MK4 3D Printer kit. Online. Prusa Research. Dostupné z: [https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-mk4-kit-2/#a\\_aid=CNET](https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-mk4-kit-2/#a_aid=CNET). [cit. 2024-05-27].
- [48] Shining 3D EinScan HX. Online. 3D Wiser. C2024. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/3d-skener/shining-3d-einscan-hx-r-e-d-bundle/>. [cit. 2024-05-27].

### **Obrázky**

- [49] SLA operating principle. Online. In: Vivalatina. C2024. Dostupné z: <https://vivalatina-shop.com/blogs/custom-made-jewelry/3d-printer-test-and-review>. [cit. 2024-05-27].
- [50] Super Racer. Online. In: FLSUN. C2024. Dostupné z: <https://eu.store.flsun3d.com/collections/3d-printers/products/super-racer-sr>. [cit. 2024-05-27].
- [51] Ender 3 S1. Online. In: Creality. C2024. Dostupné z: <https://www.crealitystore.cz/produkt/creality-ender-3-s1/>. [cit. 2024-05-27].

- [52] SLS 3D printing. Online. In: All3DP. 2023. Dostupné z: [https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/#google\\_vignette](https://all3dp.com/1/sls-3d-printing-the-ultimate-guide/#google_vignette). [cit. 2024-05-27].
- [53] BINAR, T.; VASIKOVA, S.; SAFL, P.; TALAR, J. a KUTIL, R. Evaluation of 3D printing use for multinational armed forces logistic processes in crisis situations. Online. Transactions of Famena. 2023, roč. 47, č. 4, s. 71-86. Dostupné z: <https://hrcak.srce.hr/309995>. [cit. 2024-05-28].

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

FDM	Fused deposition modeling
SLA	Stereolitography
DLP	Digital light processing
SLS	Selective laser sintering
PLA	Kyselina polymléčná
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem
PA	Polyamid
CF	Uhlíková vlákna

## Symboly:

$E_c$	energie	(J)
$KCV$	rázová a vrubová houževnatost	(kJ·m <sup>-2</sup> )
$F$	síla	(N)
$S$	prodloužení	(mm)
$A$	relativní protažení	(%e)
$\sigma$	mez pevnosti v tahu	(MPa)
$T$	teplota	(°C)
$H_{SD}$	tvrdost Shore D	(H <sub>SD</sub> )

# SEZNAM PŘÍLOH

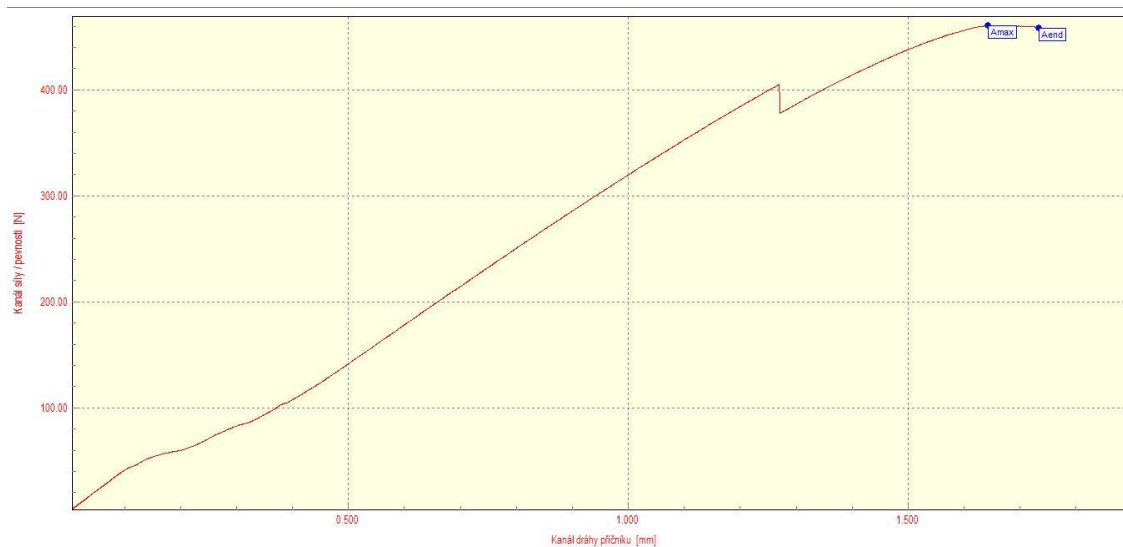
PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ DEFORMAČNÍ KŘIVKY .....	77
--	----

# Příloha A - Naměřené deformační křivky

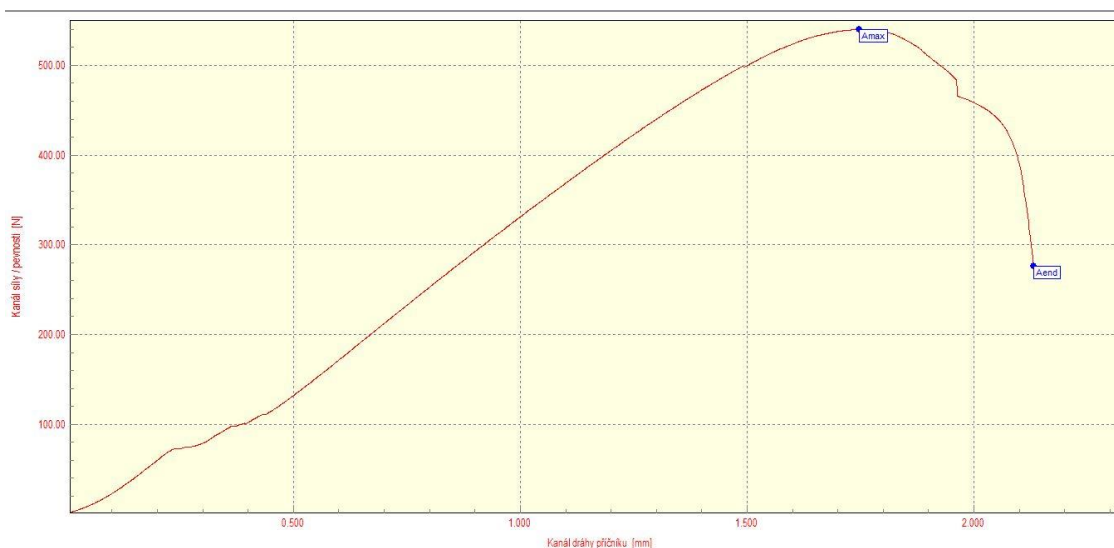
## A.1 Deformační křivky nedegradovaného PLA



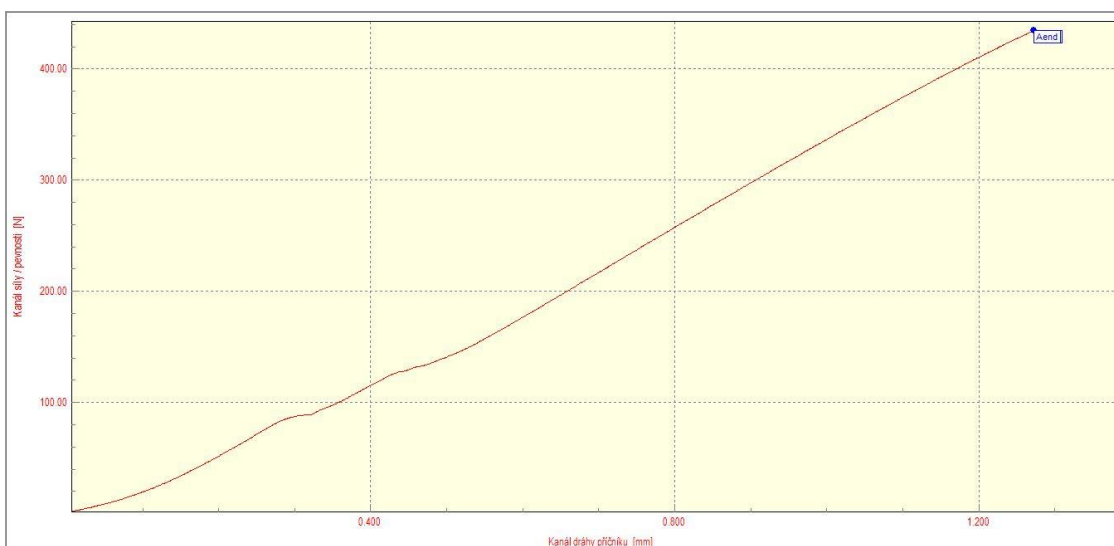
Obrázek 12.1 Deformační křivka vzorku č. 1 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]



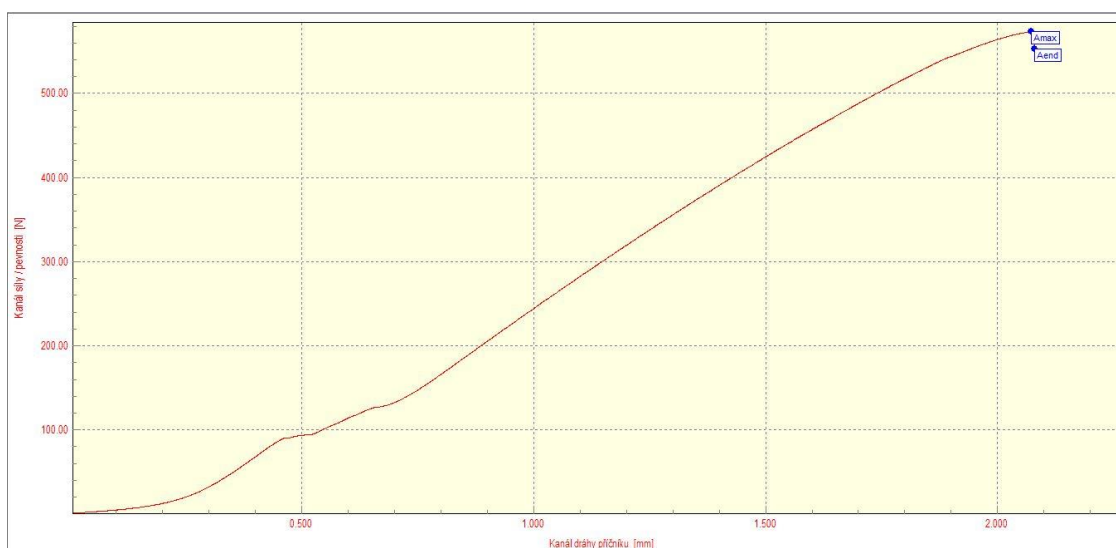
Obrázek 12.2 Deformační křivka vzorku č. 2 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]



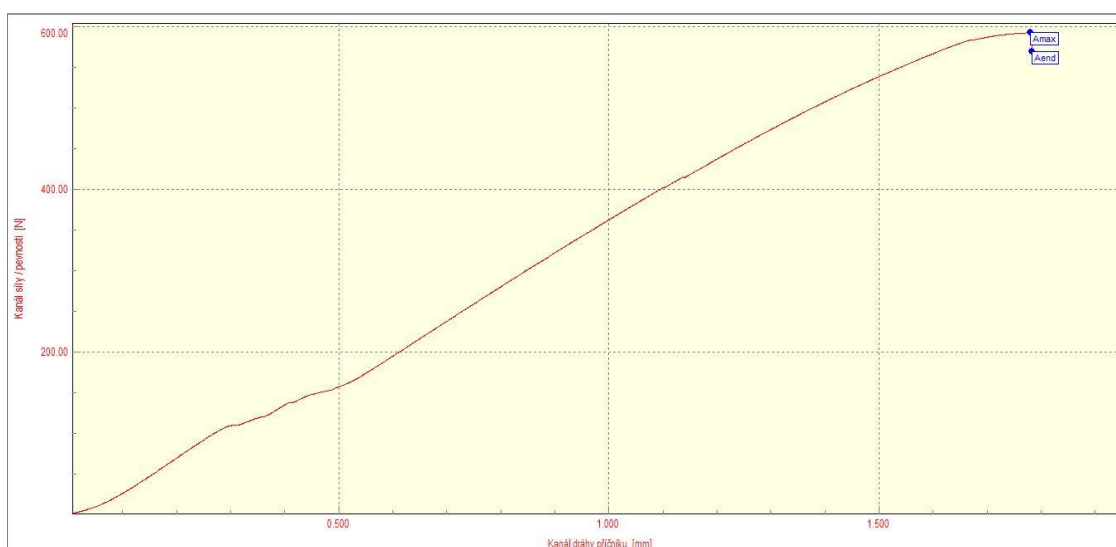
Obrázek 12.3 Deformační křivka vzorku č. 3 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]



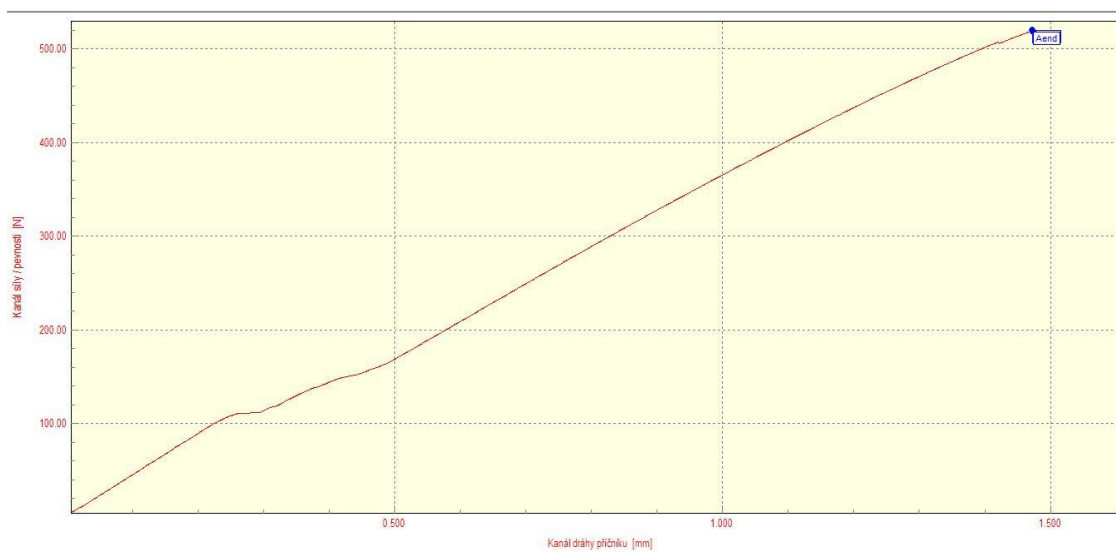
Obrázek 12.4 Deformační křivka vzorku č. 4 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]



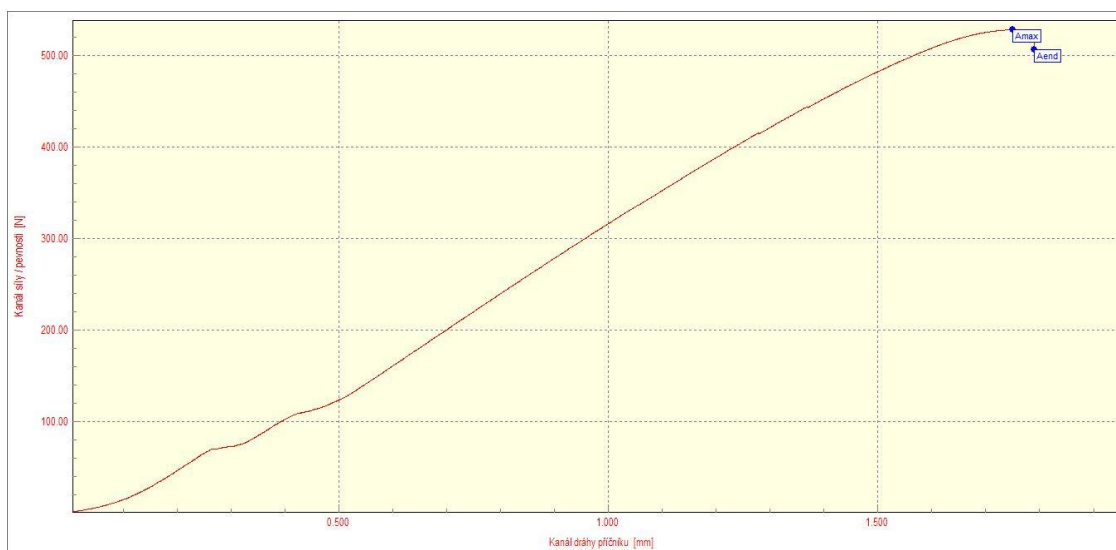
Obrázek 12.5 Deformační křivka vzorku č. 5 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]



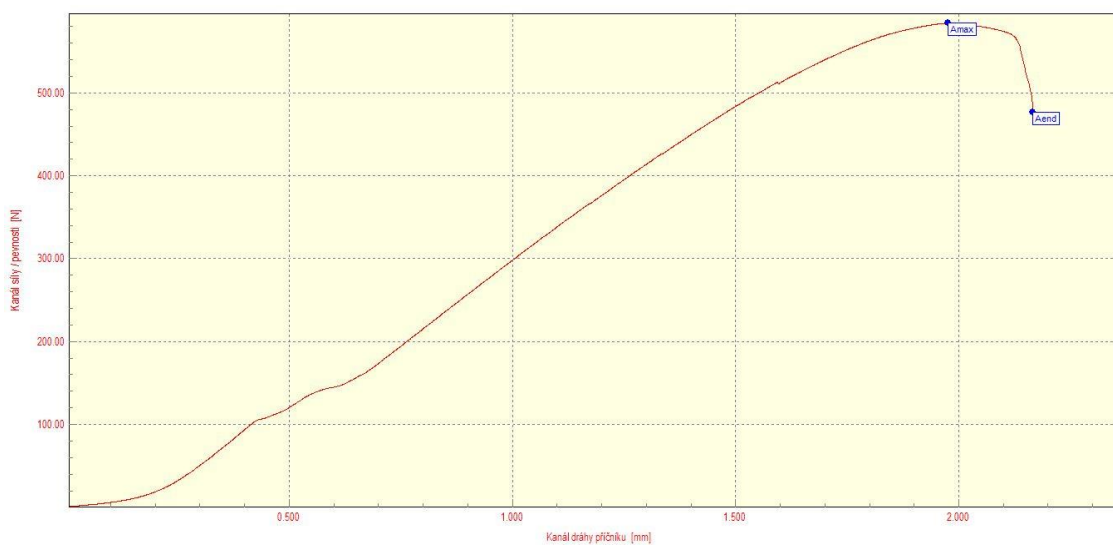
Obrázek 12.6 Deformační křivka vzorku č. 6 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]



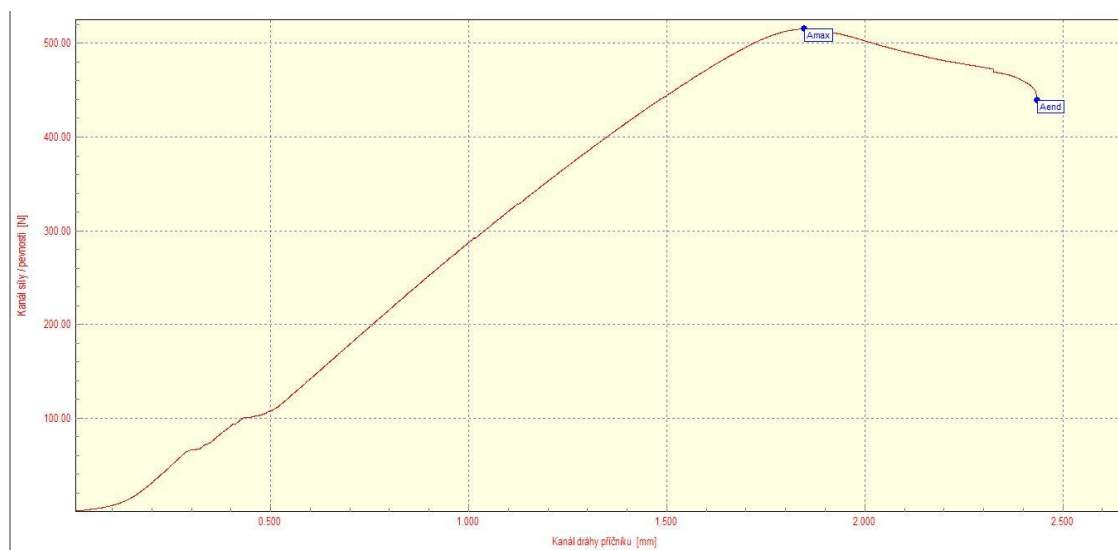
Obrázek 12.7 Deformační křivka vzorku č. 7 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]



Obrázek 12.8 Deformační křivka vzorku č. 8 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]



Obrázek 12.9 Deformační křivka vzorku č. 9 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]

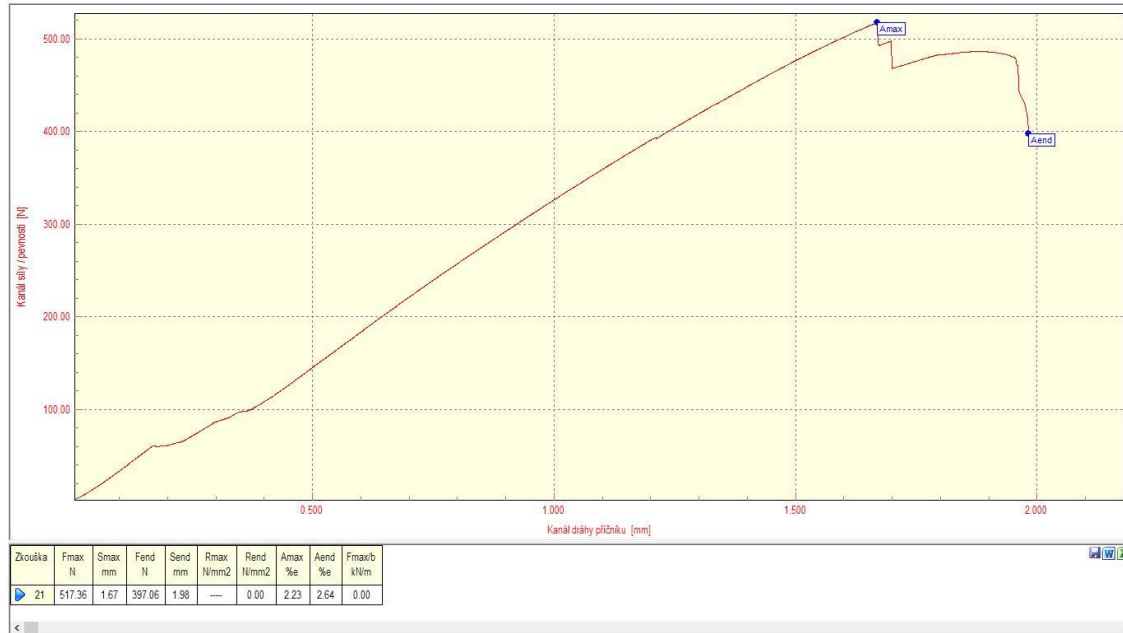


Obrázek 12.10 Deformační křivka vzorku č. 10 nedegradovaného PLA [vlastní zdroj]

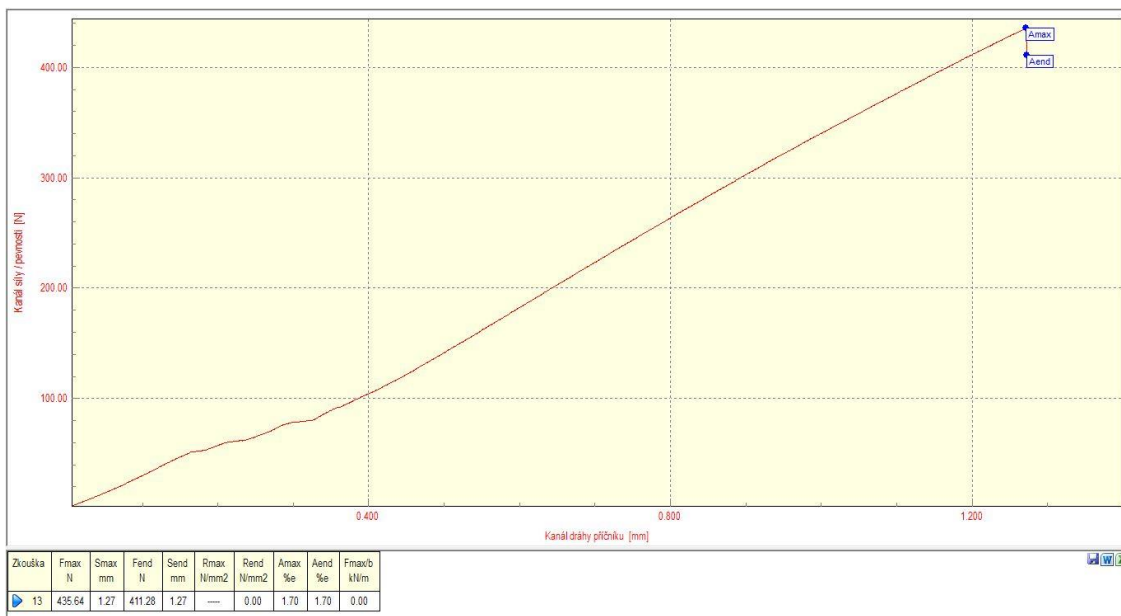
## A.2 Deformační křivky degradovaného PLA



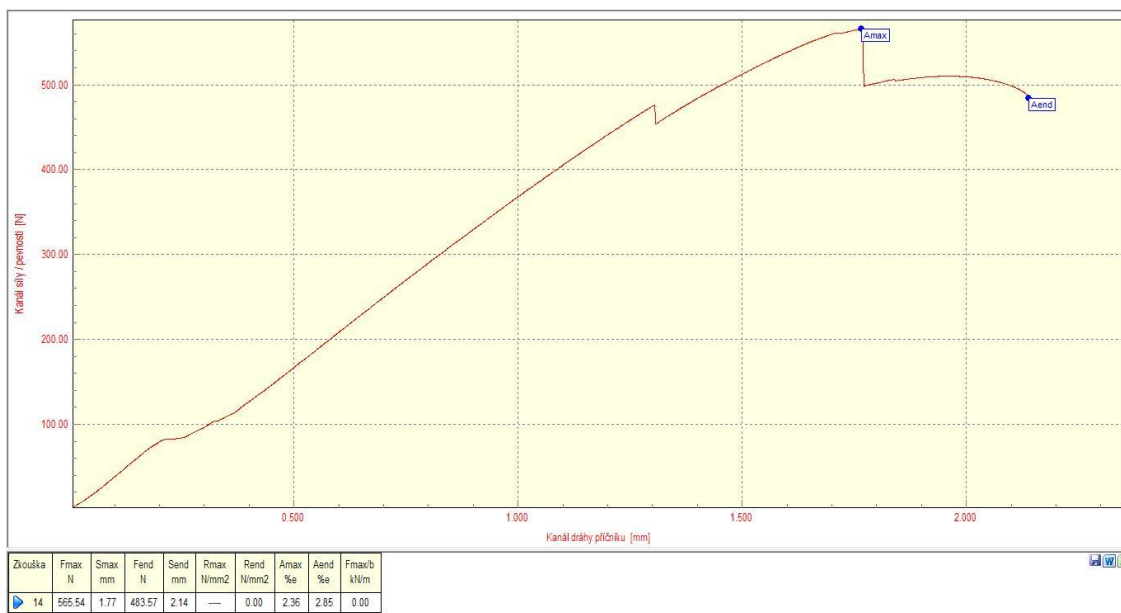
Obrázek 12.11 Deformační křivka vzorku č. 11 degradovaného PLA [vlastní zdroj]



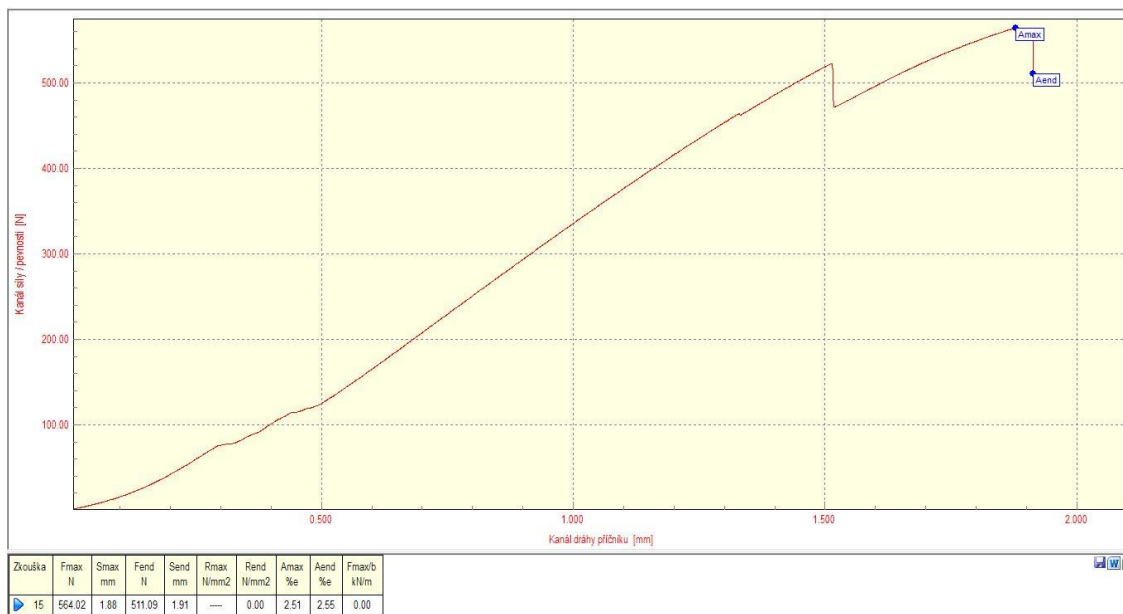
Obrázek 12.12 Deformační křivka vzorku č. 12 degradovaného PLA [vlastní zdroj]



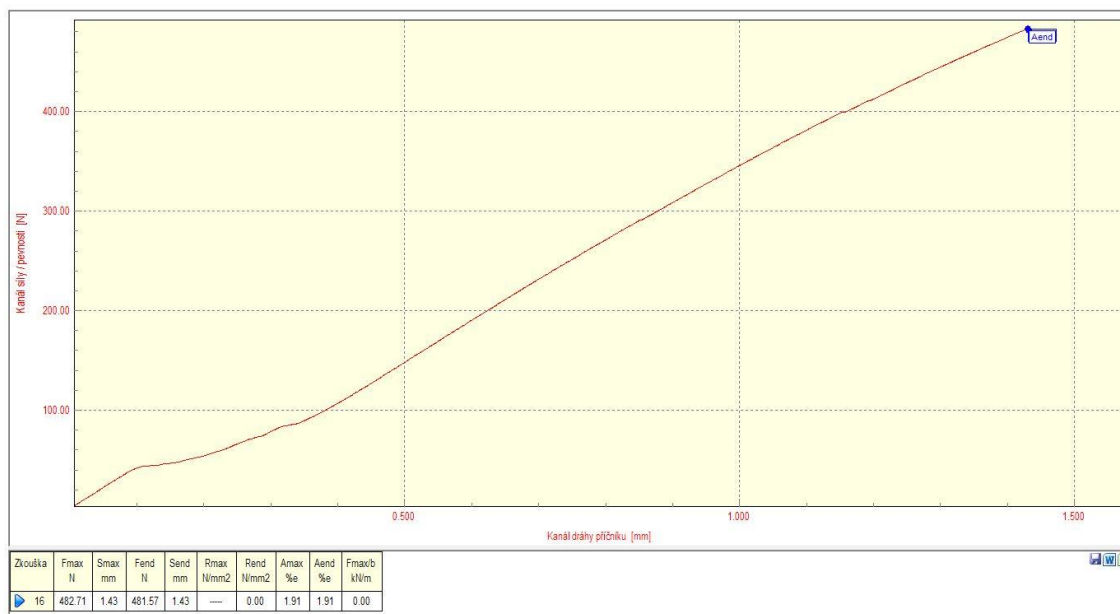
Obrázek 12.13 Deformační křivka vzorku č. 13 degradovaného PLA [vlastní zdroj]



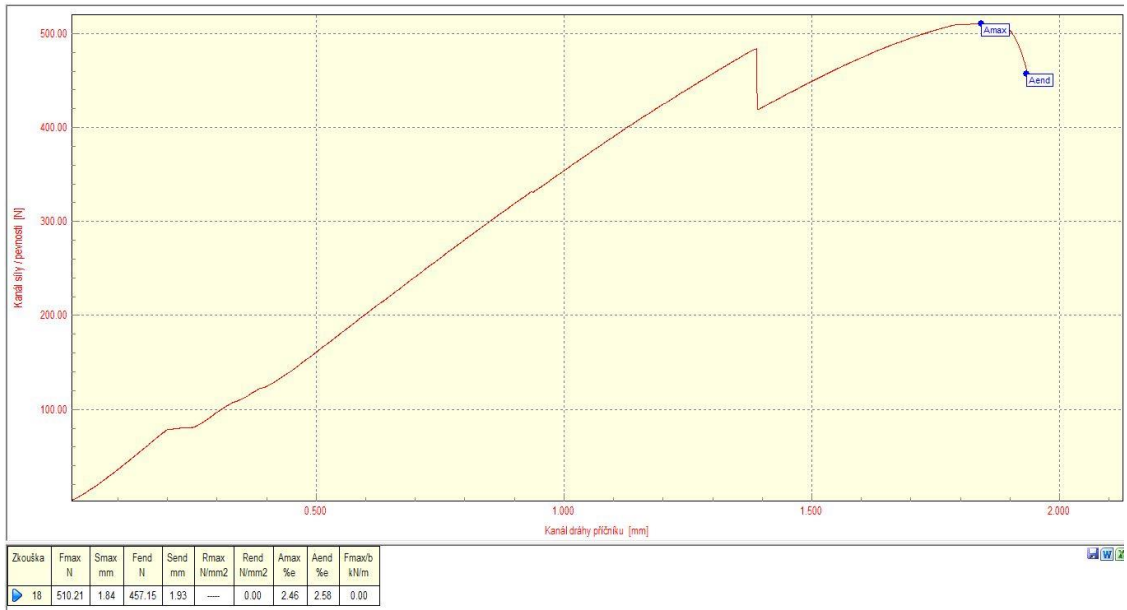
Obrázek 12.14 Deformační křivka vzorku č. 14 degradovaného PLA [vlastní zdroj]



Obrázek 12.15 Deformační křivka vzorku č. 15 degradovaného PLA [vlastní zdroj]



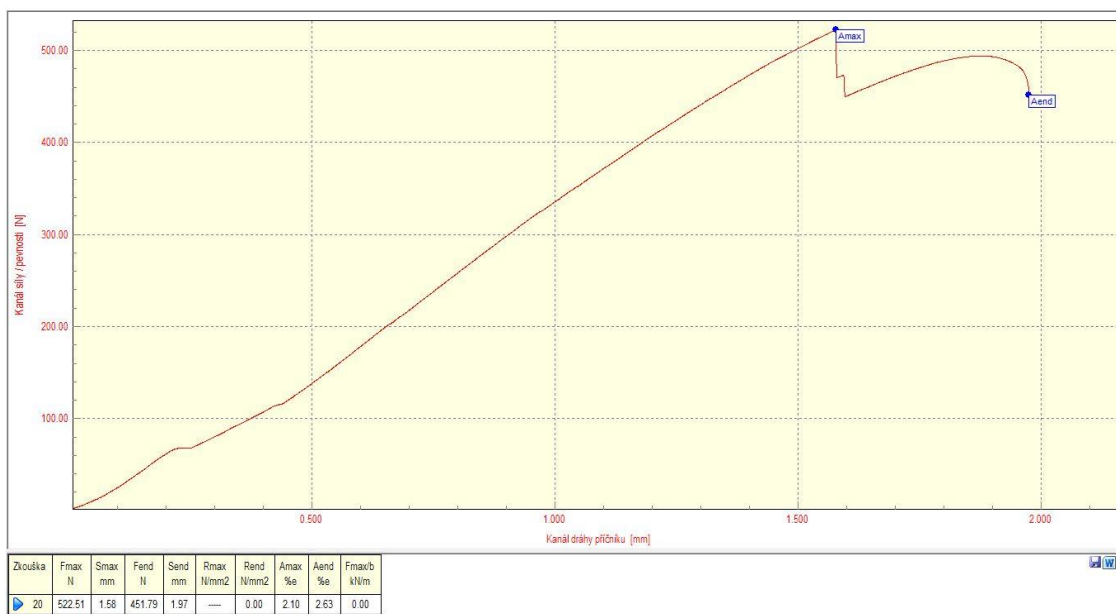
Obrázek 12.16 Deformační křivka vzorku č. 16 degradovaného PLA [vlastní zdroj]



Obrázek 12.17 Deformační křivka vzorku č. 17 degradovaného PLA [vlastní zdroj]

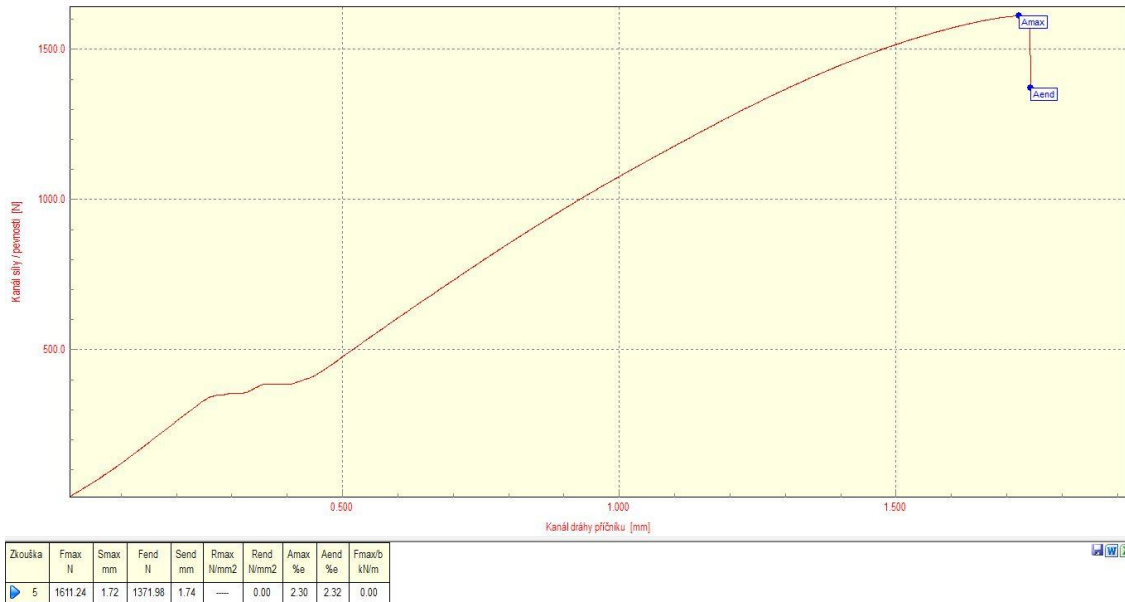


Obrázek 12.18 Deformační křivka vzorku č. 18 degradovaného PLA [vlastní zdroj]



Obrázek 12.19 Deformační křivka vzorku č. 19 degradovaného PLA [vlastní zdroj]

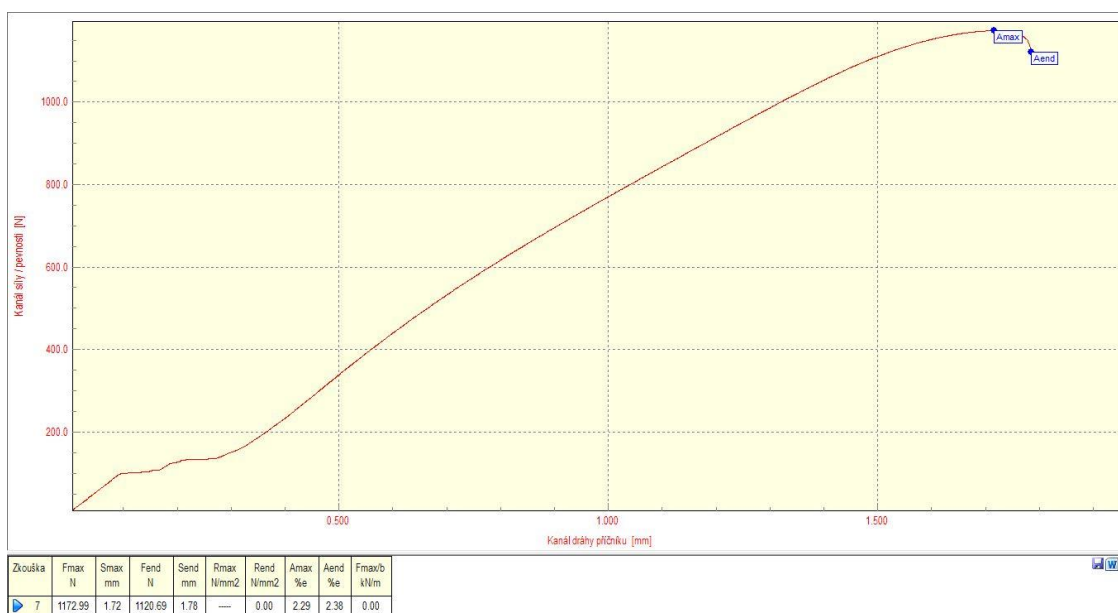
## A.3 Deformační křivky nedegradovaného nylon-karbonu



Obrázek 12.20 Deformační křivka vzorku č. 20 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



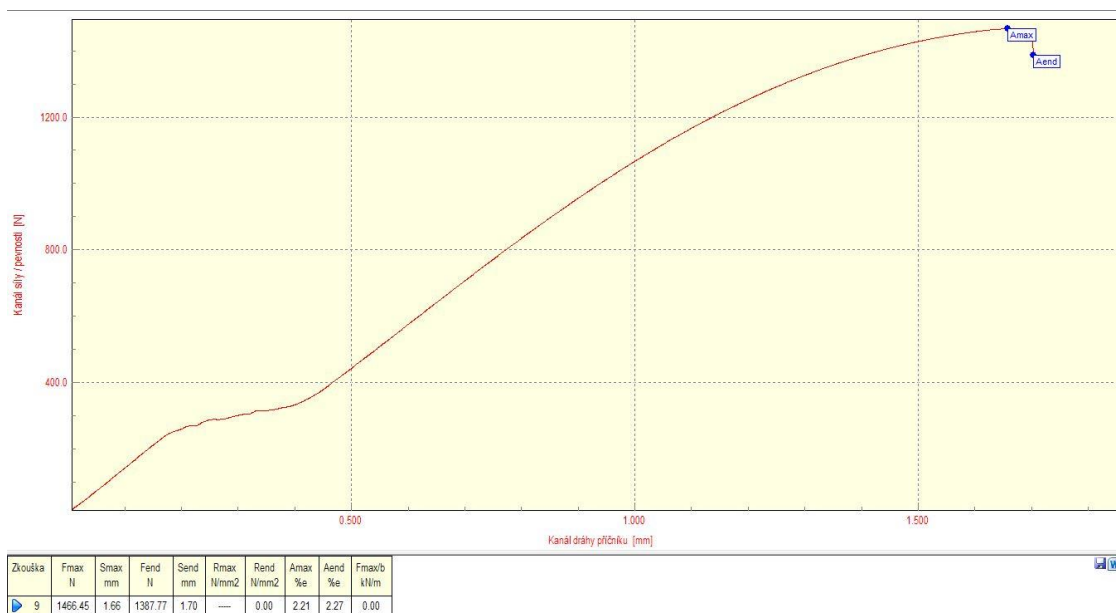
Obrázek 12.21 Deformační křivka vzorku č. 21 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.22 Deformační křivka vzorku č. 22 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.23 Deformační křivka vzorku č. 23 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.24 Deformační křivka vzorku č. 24 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.25 Deformační křivka vzorku č. 25 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.26 Deformační křivka vzorku č. 26 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]

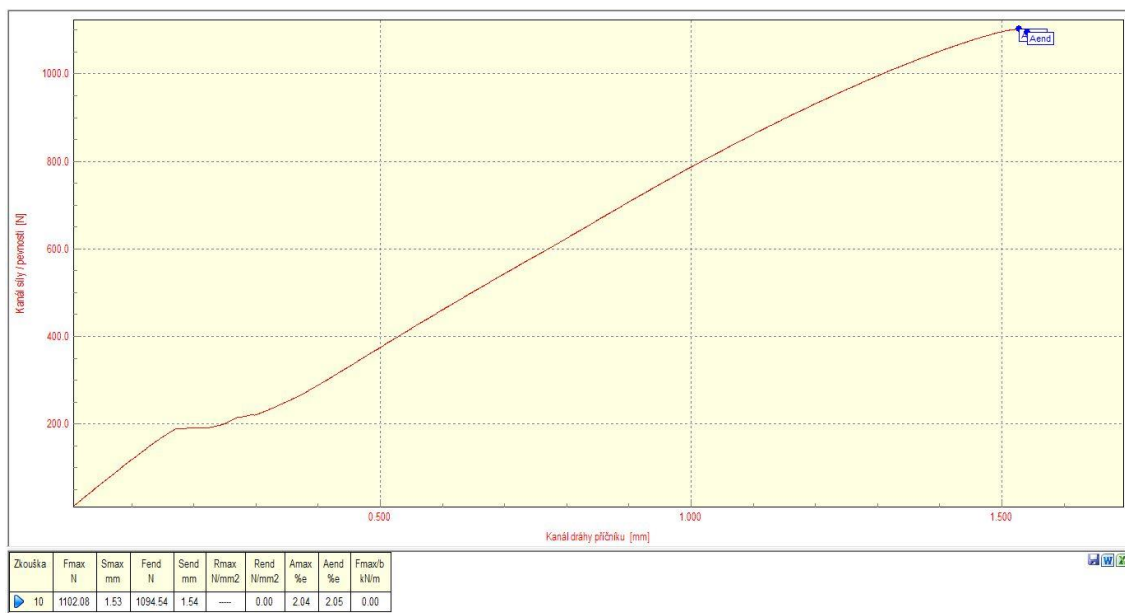


Obrázek 12.27 Deformační křivka vzorku č. 27 nedegradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]

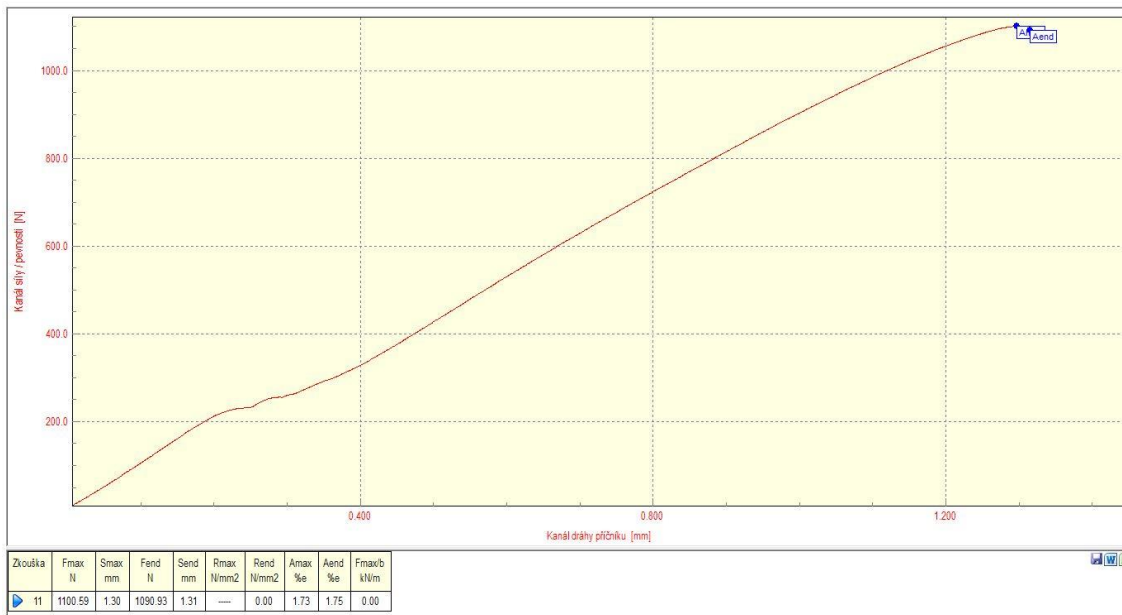
## A.4 Deformační křivky degradovaného nylon-karbonu



Obrázek 12.28 Deformační křivka vzorku č. 28 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



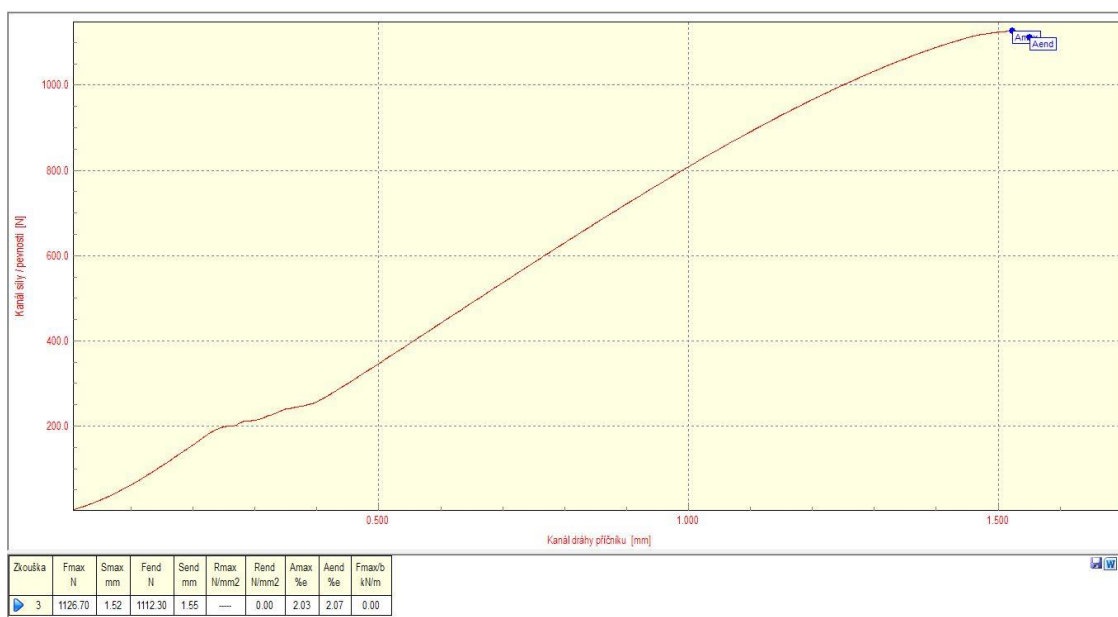
Obrázek 12.29 Deformační křivka vzorku č. 29 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



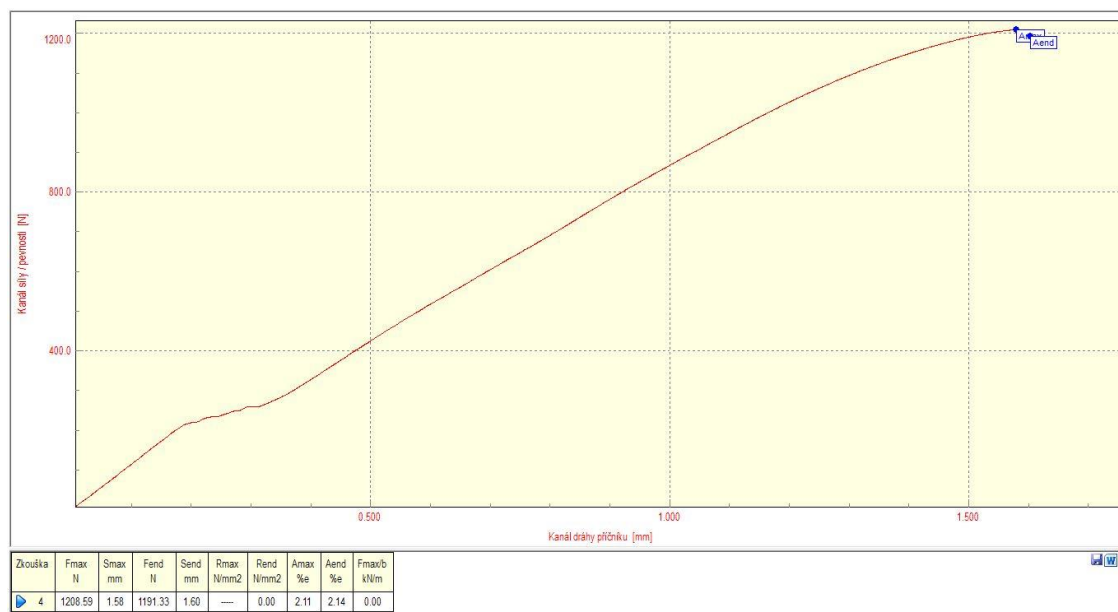
Obrázek 12.30 Deformační křivka vzorku č. 30 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.31 Deformační křivka vzorku č. 31 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.32 Deformační křivka vzorku č. 32 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



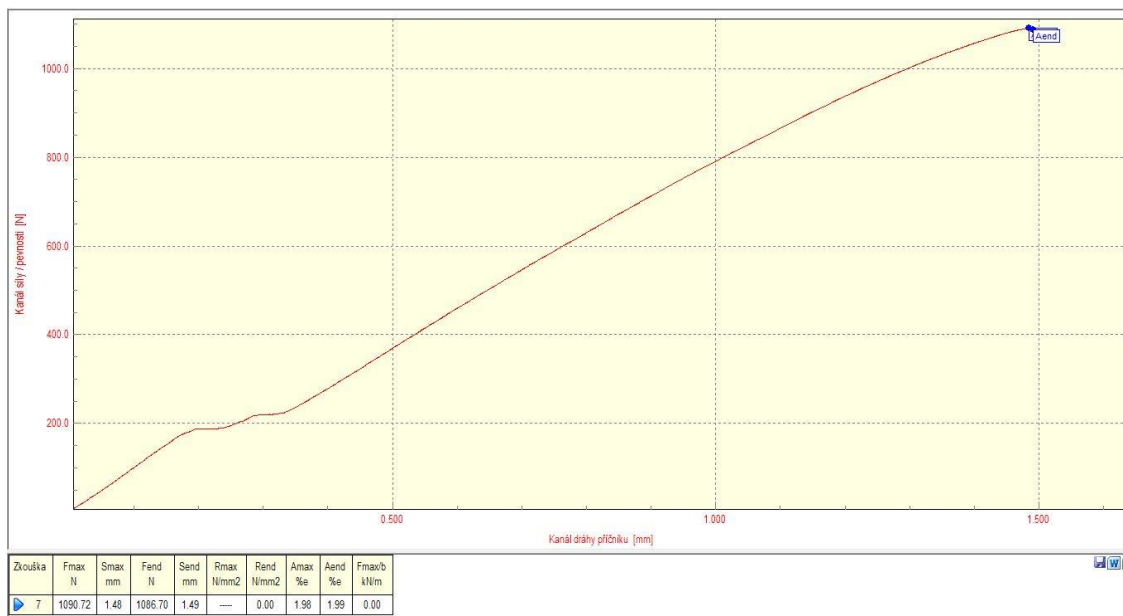
Obrázek 12.33 Deformační křivka vzorku č. 33 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



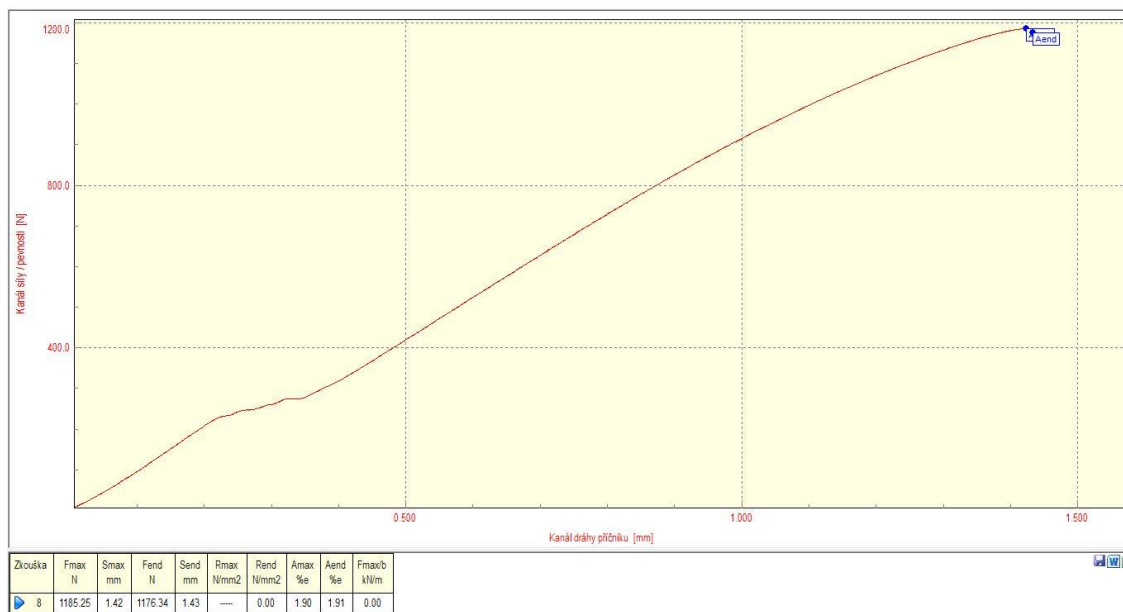
Obrázek 12.34 Deformační křivka vzorku č. 34 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.35 Deformační křivka vzorku č. 35 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.36 Deformační křivka vzorku č. 36 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]



Obrázek 12.37 Deformační křivka vzorku č. 37 degradovaného PA6 CF15 [vlastní zdroj]