

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



## **Diplomová práce**

**Výzkum mechanických vlastností a výrobních aspektů  
vstříkování plastů a 3D tisku polymerních materiálů**

**Daniel Balatý**

© 2022 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Daniel Balatý

Zemědělské inženýrství  
Inženýrství údržby

Název práce

**Výzkum mechanických vlastností a výrobních aspektů vstřikování plastů a 3D tisku polymerních materiálů**

Název anglicky

**Research on mechanical properties and production aspects of plastic injection and 3D printing of polymeric materials**

---

### Cíle práce

Cílem diplomové práce je shromáždění základních informací o polymerních materiálech a o problematice 3D tisku, vstřikování plastů a jejich vzájemné porovnání. Praktická část bude zaměřena na výzkum mechanických vlastností kompozitních materiálů na bázi polymerní matrice. Na základě vzorků vyrobených metodou 3D tisku a vstřikování bude proveden výzkum mechanických vlastností, ze kterého bude možné stanovit užité vlastnosti jednotlivých systémů pro praktickou aplikaci. Nedílnou součástí výzkumných aktivit bude hodnocení přípravy vybraných typů polymerů při zohlednění výrobní metody vstřikování plastů, 3D tisku a jejich environmentálního dopadu.

### Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

**Doporučený rozsah práce**

cca 60 stran

**Klíčová slova**

3D tisk, granulát, polymery, testování, vstřikování.

---

**Doporučené zdroje informací**

- BURAGOHAIN, M. K.: Composite structures: design, mechanics, analysis, manufacturing, and testing. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- Časopis: Composites Part A, B, Polymers, Materials, Journal of Cleaner Production, Manufacturing Technology, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Polymer Degradation and Stability, Wear atd.
- HLOUSEK, P.: 3D printing: a prospective challenge for manufacturing: a manufacturing revolution. Saarbrücken: AV Akademikerverlag, 2015.
- CHUA, CH. K., LEONG, K. F.: 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 4th edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific, 2015.
- KLOSKI, L. W., KLOSKI, N.: Getting started with 3D printing: a hands-on guide to the hardware, software, and services behind the new manufacturing revolution. San Francisco: Maker Media, 2016.
- NOORANI, R.: 3D printing: technology, applications, and selection. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- SKRBEK, B.: Materiály pro konstrukční aplikace. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009.
- TRES, P. A. Designing plastic parts for assembly. 8th edition updated. Munich: Hanser, 2017.
- WIMPENNY, D. I., PANDEY, P. M., KUMAR, L. J.: Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- ZEMAN, L.: Vstřikování plastů: teorie a praxe. Praha: Grada Publishing, 2018.
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2021/2022 LS – TF

**Vedoucí práce**

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 26. 1. 2021

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 07. 03. 2022

### **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Výzkum mechanických vlastností a výrobních aspektů vstřikování plastů a 3D tisku polymerních materiálů " jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2022

---

### **Poděkování:**

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D., vedoucímu diplomové práce za vedení a za cenné rady, které mi poskytl. Dále také panu Ing. Petrovi Jirků za podporu v oblasti 3D tisku a panu Ing. Jakubovi Macháčkovi z TUL za podporu v oblasti výroby filamentu.

# **Výzkum mechanických vlastností a výrobních aspektů vstřikování a 3D tisku polymerních materiálů**

## **Abstrakt:**

Cílem diplomové práce bylo shromáždit a analyzovat současné možnosti a limity technologie vstřikování polymerních materiálů, 3D tisku a jejich vzájemné porovnání. V první, teoretické části jsou popsány základní informace o polyetylénu, vstřikování, 3D tisku a metodách použitých při výzkumu mechanických vlastností (zkouška tahem, zkouška tvrdosti vtláčením kuličky). Druhá, experimentální část je věnována přípravě materiálů, výrobě vzorků pomocí technologie vstřikování a 3D tisku, měření mechanických vlastností a jejich porovnání. Pro experimentální část byly použity dva druhy recyklovaného materiálu z obalových produktů, a to recyklát nízkohustotního polyetylénu (LDPE) a recyklát lineárního nízkohustotního polyetylénu (LLDPE). K analyzování mechanických vlastností byla použita metoda tahové zkoušky a zkouška tvrdosti vtláčením kuličky. V závěru druhé části je diskuse výsledků měření a stanovení užitečných vlastností materiálů podle dané technologie výroby a jejich porovnání.

## **Klíčová slova:**

3D tisk, vstřikování, polyetylén, recyklace, granulát, filament, zkouška tahem, zkouška tvrdosti vtláčením kuličky

# **Research on mechanical properties and production aspects of plastics injection and 3D printing of polymeric materials**

## **Abstract:**

The aim of the master's thesis was to gather and analyze the current possibilities and limits of polymer injection technology, 3D printing and their comparison. The first, theoretical part describes the basic information about polyethylene, injection molding, 3D printing, and methods used in the research of mechanical properties (tensile test, hardness test – ball indentation method). The second, experimental part is devoted to the preparation of materials, production of samples using injection molding and 3D printing technology, measurement of mechanical properties and their comparison. For the experimental part, two types of recycled material from packaging products were used, namely recycled low density polyethylene (LDPE) and recycled linear low-density polyethylene (LLDPE). The tensile test method and the ball indentation hardness test were used to analyze the mechanical properties. At the end of the second part is a discussion of the results of measuring and determining the useful properties of materials according to the production technology and their comparison.

## **Keywords:**

3D printing, injection molding, polyethylene, recycling, granulate, filament, tensile test, hardness test – ball indentation method

# Obsah

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | ÚVOD.....                                  | 1  |
| 2     | TEORETICKÁ ČÁST .....                      | 2  |
| 2.1   | Polyetylén .....                           | 2  |
| 2.1.1 | Základní vlastnosti.....                   | 3  |
| 2.1.2 | Technologie výroby a využití .....         | 4  |
| 2.1.3 | Druhy .....                                | 5  |
| 2.1.4 | Recyklace.....                             | 7  |
| 2.2   | Technologie vstřikování plastů.....        | 8  |
| 2.2.1 | Princip technologie .....                  | 10 |
| 2.2.2 | Vstřikovací stroj.....                     | 13 |
| 2.3   | Technologie 3D Tisku .....                 | 17 |
| 2.3.1 | 3D Tisk pevných materiálů.....             | 18 |
| 2.3.2 | 3D Tisk práškových materiálů.....          | 20 |
| 2.3.3 | 3D Tisk fotopolymerů.....                  | 21 |
| 2.4   | Mechanické zkoušky materiálů .....         | 22 |
| 2.4.1 | Zkouška tahem.....                         | 23 |
| 2.4.2 | Zkouška tvrdosti vtlačáním kuličky .....   | 27 |
| 2.4.3 | Zkouška tvrdosti dle Rockwella .....       | 28 |
| 2.4.4 | Zkouška tvrdosti dle Vickerse .....        | 29 |
| 2.4.5 | Zkouška tvrdosti dle SHORE .....           | 30 |
| 2.5   | Skenovací elektronový mikroskop (SEM)..... | 31 |
| 3     | CÍLE PRÁCE.....                            | 32 |
| 4     | PRAKTICKÁ ČÁST .....                       | 33 |
| 4.1   | Použitý software .....                     | 33 |
| 4.2   | Použitý materiál .....                     | 34 |
| 4.3   | Příprava materiálu.....                    | 35 |
| 4.4   | Výroba zkušebních vzorků .....             | 37 |
| 4.4.1 | Vzorky vyrobené metodou vstřikování .....  | 38 |
| 4.4.2 | Vzorky vyrobené metodou 3D Tisku .....     | 39 |
| 4.5   | Analýza mechanických vlastností.....       | 43 |
| 4.5.1 | Zkouška tahem.....                         | 43 |
| 4.5.2 | Zkouška tvrdosti .....                     | 45 |
| 4.6   | Mikroskopie lomové plochy pomocí SEM.....  | 46 |
| 5     | VÝSLEDKY A DISKUSE .....                   | 48 |
| 5.1   | Vyhodnocení zkoušky tahem.....             | 48 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.1.1 | Vyhodnocení meze pevnosti.....                                 | 50 |
| 5.1.2 | Vyhodnocení tažnosti .....                                     | 51 |
| 5.2   | Vyhodnocení SEM.....   | 53 |
| 5.3   | Vyhodnocení tvrdosti vtlačení kuličky.....                     | 54 |
| 5.3.1 | Vzorky z LDPE vyrobené metodou vstřikování.....                | 55 |
| 5.3.2 | Vzorky z LLDPE vyrobené metodou vstřikování .....              | 56 |
| 5.3.3 | Vzorky z LLDPE vyrobené metodou 3D Tisku s orientací 90° ..... | 57 |
| 5.3.4 | Vzorky z LLDPE vyrobené metodou 3D Tisku s orientací 45° ..... | 58 |
| 5.3.5 | Porovnání naměřených hodnot .....                              | 59 |
| 6     | ZÁVĚR .....  | 60 |
|       | Seznam použité literatury .....                                | 62 |
|       | Seznam použitých zkratk a symbolů .....                        | 66 |
|       | Seznam obrázků.....  | 69 |
|       | Seznam tabulek.....  | 71 |

# 1 ÚVOD

V dnešní době jsou pro náš život plastové produkty rutinní záležitost. Používáme je každý den, a to ve všech různých odvětvích průmyslu či domácnostech. Plasty se staly majoritním materiálem spotřebního průmyslu a v mnoha ohledech překonaly a nahradily konvenční materiály. Rostoucí produkce plastových výrobků vede neustálému zlepšování a modernizaci již používaných technologií, materiálů či postupů, ale také k vývoji nových, např. stále se rozvíjející aditivní technologie. Cílem je vyrobit kvalitní produkt s nízkými náklady. Avšak už při návrhu plastového produktu, musíme počítat s tím, že jeho užitné vlastnosti či funkčnost není neomezená. Jednoho dne bude muset výrobek být vyřazen a podstoupit proces likvidace nebo recyklace.

V roce 2020 bylo podle ministerstva životního prostředí v České republice vyprodukováno téměř 39 milionů tun veškerého odpadu. Je to téměř o 20 % více než v roce 2010. Naše planeta má omezené zdroje a jedním z řešení problematiky odpadového hospodářství je využívání druhotných surovin – Recyklace.

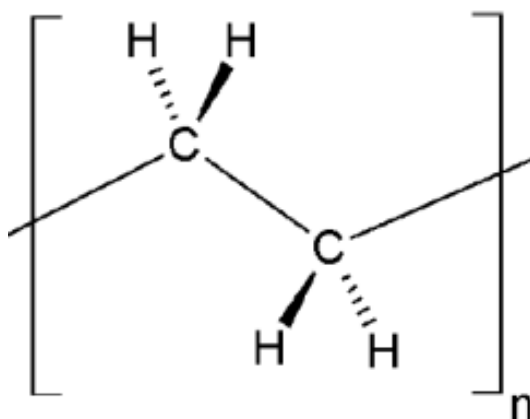
Diplomová práce byla zaměřena na výzkum mechanických vlastností recyklovaného polyetylénu. Polyetylén (PE) je jedním z hlavních polymerů zpracovávaných konzumní společností. Používá se zejména jako obalový materiál, sáčky, přepravky a mnoho dalšího. Cílem bylo analyzování problematiky zpracování PE metodou vstřikování a 3D tisku včetně jejich porovnání, zjištění mechanických vlastností materiálu a následné stanovení užitných vlastností pro praktickou aplikaci. Obsah je v teoretické části zaměřen na seznámení s použitými technologiemi a postupy. Experimentální část se zaměřuje na přípravu použitého materiálu pro vstřikování a 3D tisk, výrobu vzorků a výzkum mechanických vlastností recyklovaného granulátu LDPE a LLDPE.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na seznámení s termoplasty, zejména s polyetylenem, a metodami 3D tisku a vstřikování pro jeho zpracování. V závěru této části jsou popsány zkoušky mechanických vlastností a mikroskop SEM.

### 2.1 Polyetylén

Polyetylén (PE) je jedním z polymerů spadající do skupiny termoplastů. Ty lze tepelným účinkem uvést z tuhého do plastického stavu, přičemž tato změna je vratná a je možno ji opakovat. Jedná se polyolefin, který vzniká polymerací uhlovodíků tvořený dvojnou vazbou (Obrázek 1) v molekulovém řetězci, tzv. olefinů (alkenů). Označení Polyetylén se používá pro homopolymery (jeden druh monomeru) ethylenu a jeho kopolymery (dva a více monomeru) s nižším obsahem komonomeru než 10 %. [1], [2]

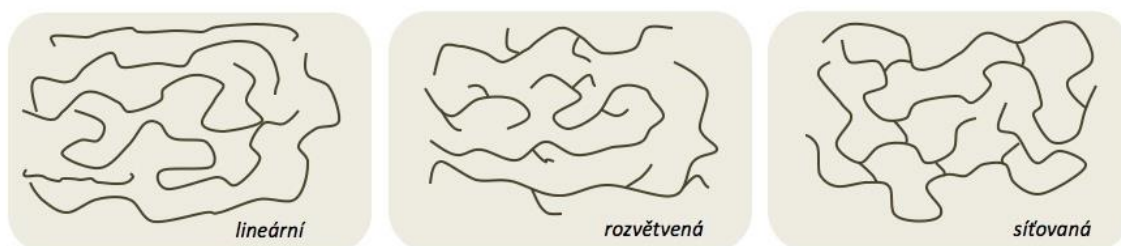


Obrázek 1 – vzorec molekuly PE [1]

První zmínky o PE se datují roku 1898, kdy německý chemik Hans von Peckmann zahříváním diazometanu připravil první Polyetylén. Avšak až v roce 1935 dokázal Michael Pernov připravit polymerací etylénu v plynné fázi s tlakem 100–200 MPa a teplotou 150–400 °C dostatečně vysokomolekulární formu homopolymeru etylénu, která by měla vlastnosti plastu. Trvalo ještě další čtyři roky, než Pernov dokázal optimalizovat proces polymerace použitím iniciátorů a kyslíku. Průmyslová výroba se datuje tedy až k roku 1939. Dnes se jedná o „nejrozšířenější“ syntetický polymer na planetě s velmi širokou škálou vyráběných produktů [1], [2]

## 2.1.1 Základní vlastnosti

Vlastnosti těchto polymerů jsou závislé zejména na molekulové hmotnosti, na míře krystalinity v tuhém stavu a na uspořádání jednotlivých merů v řetězci makromolekuly. Jednotlivé řetězce makromolekul vytvářejí segmenty a tím krystalické celky. Proto PE označujeme jako semikrystalický termoplast. Základem je lineární struktura s rozvětvenými řetězci viz Obrázek 2, přičemž míra rozvětvení řetězce je závislá na technologii výroby. [1], [3]



Obrázek 2 – Molekulární struktura polymerů [4]

Polyetylén je za běžných podmínek elastický, bílý materiál. V tenčích vrstvách může být i průhledný, avšak jeho transparentnost závisí na rozvětvenosti makromolekul. Při tepelném ovlivňování PE přechází do plastického stavu a při překonání teploty tání (105-136 °C) do taveniny. Při ochlazování se vrací zpět do pevného stavu bez chemického ovlivnění materiálu a dochází pouze k změně fyzikálního směru. [1], [3]

Specifické vlastnosti: [1], [2], [3]

- Vysoká odolnost vůči nízkým teplotám
- Vysoká tažnost a houževnatost
- Hořlavost
- Nízká odolnost proti UV záření
- Odolný vůči vodě, polárním rozpouštědlům, kyselinám i zásadám
- Výborné dielektrické a elektroizolační vlastnosti
- Snadná oxidace
- Transparentnost
- Zdravotní nezávadnost

## 2.1.2 Technologie výroby a využití

Polyetylén získáváme tzv. polymerací etylenu. Výchozí surovinou tohoto procesu je etylén, který získáváme zpracováním ropy, zemního plynu nebo odpadů při zpracování uhlí. Etylén je bezbarvý hořlavý plyn s lehce nasládlou vůní. Stabilita molekuly etylénu je dost vysoká a k vyvození reakce jsou potřeba mimořádné podmínky. To je důvodem proč se při polymeraci používají katalyzátory. [1], [2], [5]

Nejpoužívanější technologií výroby PE je koordinační polymerace za nízkého tlaku (0,1 – 2 MPa) a teplot 300–400 °C, která pracuje na bázi Zeigler-Nattových katalyzátorů skládající se z trialkylaluminiové sloučeniny a titaničitého chloridu. Tento proces je známý již od roku 1963. Výstupem je polyetylén s lineární strukturou molekuly a je vhodný zejména pro vyfukování nebo výrobu obalových materiálů. Při aplikaci metalocenových katalyzátorů, se při syntéze vytvářejí molekuly s nižší molekulovou hmotností, které jsou vhodné pro vstřikování. Další metodou je použití Phillipsových katalyzátorů na bázi chromu, které se využívají pro syntézy PE s větší molekulovou hmotností. Jedná se o polymeraci za středně vysokého tlaku (větší než 2 MPa) a teplotách okolo 350 °C. Velkou výhodou je snadná výroba a rychlá regenerace. Polyetylén je možné vyrábět také vysokotlakou radikálovou metodou při tlaku 100–300 MPa a teplotě 400–500 °C. [1], [2], [5]

Zvolená technologie výroby velmi ovlivňuje strukturu a tím vlastnosti PE. Podle prostorového uspořádání merů, délky řetězce, fáze rozvětvení a míry krystalinity se liší využití jednotlivých typů PE. Využití má jak v technickém průmyslu (ozubená kola, trubky, přepravky, boxy), tak v běžných domácnostech (hračky, sáčky, textil), avšak nejběžnějším využitím napříč všemi odvětvími je jako obalový materiál (Obrázek 3). [1], [3]



Obrázek 3 – Produkty z Polyetylénu [6]

### 2.1.3 Druhy

V dnešní době existuje velké množství typů PE, které se liší strukturou, hustou či stupněm krystalinity. Níže v Tabulka 1 je uvedeno alespoň základní spektrum, které je nejvíce používáno v průmyslové výrobě. Prioritními typy dle řetězců makromolekul jsou rozvětvený s nízkou hustotou LDPE, lineární s nízkou hustotou LLDPE, lineární s vysokou hustotou HDPE a neméně důležitý PE se střední hustotou. Prvními třemi se budeme zabývat níže. [2], [3], [5]

*Tabulka 1 – Typy PE podle stupně krystalinity a hustoty [2], [3], [5]*

| Zkratka  | Typ PE                                  | Stupeň Krystalinity [%] | Hustota [g/cm <sup>3</sup> ] |
|----------|---|-------------------------|------------------------------|
| ULDPE    | PE s velmi nízkou hustotou              | ± 40                    | 0,888-0,915                  |
| LDPE     | PE s nízkou hustotou                    | 35-45                   | 0,910-0,955                  |
| LLDPE    | lineární PE s nízkou hustotou           | 35-50                   | 0,918-0,955                  |
| MDPE     | PE se střední hustotou                  | 45-55                   | 0,926-0,940                  |
| HDPE     | PE s vysokou hustotou                   | 50-63                   | 0,941-0,945                  |
| HMW-HDPE | PE s vysokou molekulovou hustotou       | 60-65                   | 0,945-0,955                  |
| UHMWPE   | PE s ultra-vysokou molekulovou hustotou | ± 75                    | 0,955-0,957                  |

#### **LDPE (Low Density Polyethylen)**

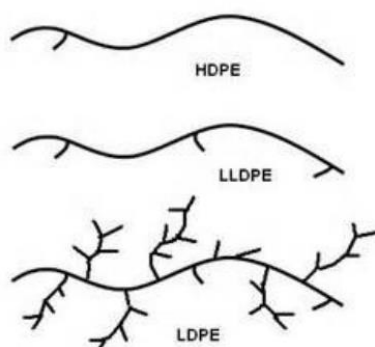
LDPE je jedním z nejstarších typů PE a vyznačuje se nízkou hustotou (0,910–0,955 g/cm<sup>3</sup>). Při výrobě radikálovou metodou polymerace dochází v důsledku vyššího tlaku ke snížení schopnosti krystalizace a tím k většímu rozvětvení řetězce. Výsledkem je zvýšená ohebnost na úkor snížené pevnosti v tahu. Podmínky potřebné pro radikálovou metodu je dosažení teploty 200–300 °C a tlaku 200–350 MPa v reaktorech trubkového profilu, nebo 100–200 MPa v autoklávech. Stupeň krystalinity se uvádí 35–45 %. V nižších hodnotách je LDPE lehce zakalený a s rostoucím stupněm krystalinity se průhlednost snižuje. Hlavní použití je jako balicí fólie, pytle na odpadky a potraviny, izolace drátů a kabelů, hračky a domácích potřeby. [2], [5], [7]

## LLDPE (Linear Low Density Polyethylen)

LLDPE neboli lineární PE s nízkou hustotou je naopak jedním z nejmladších typů. K jeho vývoji vedla náročnost výroby LDPE, která byla ekonomicky nepříznivá. Proces výroby je obdobný, ale při polymeraci jsou do molekuly s lineární strukturou přidávány tzv.  $\alpha$ -olefiny. Výsledkem je Polyetylén s nízkou hustotou a strukturou tvořenou krátkými řetězci v molekulové struktuře, obdobně jako u HDPE, avšak včetně krátkých vedlejších řetězců, které vznikají při nízkých teplotách a tlaku. Stupeň krystalinity je vyšší až 50 %. Charakteristickými vlastnostmi oproti LDPE je lepší rázová odolnost, pružnost, elasticita, větší pevnost v tahu a netečnost proti chemikáliím. Výsledkem je ideální materiál pro výrobu obalových produktů. [2], [5], [7]

## HDPE (Hight Density Polyethylen)

HDPE je zkratka pro Polyetylén s vysokou hustotou patřící mezi tvrdé plasty. Z Obrázek 4, je patrné že struktura je lineární a obsahuje nejméně rozvětvených řetězců z uvedených LDPE, LLDPE. Nízký obsah rozvětvených řetězců má za následek velké mezimolekulární síly. Výsledkem je PE s vysokou pevností v tahu, rázovou houževnatostí, zpracovatelnost, odolností proti otěru a chemickou stálostí. Stupeň krystalinity dosahuje až 63 % (některé literatury uvádějí až 90 %), což vede k horší tvárnosti. Omezujícími vlastnostmi jsou hořlavost, degradace UV zářením, velké hodnoty smrštění. [2], [5], [7]



Obrázek 4 – Struktura řetězců LDPE, LLDPE, HDPE [5]

Vysoko-hustotní PE má velmi široké spektrum využití. Nejrozšířenějším odvětvím jsou opět obalové materiály (mikrotenové sáčky, vysoko-hustotní fólie), ale své uplatnění má i jako běžně používané prostředky v domácnostech (kolíčky, přepravky, víčka PET lahví, chráničky kabelů, kanystry a další). [2], [5], [7]

## 2.1.4 Recyklace

V roce 2020 bylo vyprodukováno v ČR téměř 39 miliónu tun veškerého odpadu, přičemž až 42 % je tvořeno pouze spotřebními obalovými materiály (lahve, sáčky a další). Z toho přibližně 70 %, tedy cca 12 milionů tun je vyrobeno pouze ze tří druhů polymerů, a to z polyvinylchloridu, polyolefinu a styrenových hmot. V důsledku velkých objemů odpadu je nutné řešit problematiku odpadového hospodářství, a kromě skládkování a spalování, je recyklace neboli znovu používání materiálů jako druhotnou surovinu jedním z primárních řešení. [8]



*Obrázek 5 – Regranulační linka PE obalových materiálů*

*1 - dopravník, 2 - nožový mlýn, 3 - sedimentační vana, 4 – čistička – filtrace vody s chemickou úpravou, 5 – podávací šnek s odjímáním vody, 6 – ždímací šnek, 7a – aglomerátor + zásobník, 7b - regranulátor [8]*

Recyklace plastů je proces, při kterém přeměňujeme zbytkový nebo odpadní materiál na novou druhotnou surovinu např. recyklovaný granulát či recyklát pomocí recyklační, nebo regranulační linky viz Obrázek 5. Pro velké množství polymerních materiálů a jejich případném znečištění (odpadní materiál), existuje dnes široké spektrum recyklačních a mycích linek. [8]

Při recyklaci z odpadových materiálů je velkým problémem nedefinované spektrum barev a fyzikálně-chemická či tepelná degradace, způsoben používáním a stářím materiálu. Z důvodu horších vlastností můžeme rozdrčený (recyklát), nebo rozemletý (regranulát) materiál upravit přidáním aditiv a zlepšit tak jeho požadované vlastnosti. Po přidání stabilizátorů, barviv, plniva či jiných aditiv je směs znovu nadrcena či namleta. Výhodou regranulátu je stejná velikost částic (granulí), což zabezpečuje dobrou dávkovatelnost. [8]



## 2.2 Technologie vstřikování plastů

Počátky vstřikování plastů se datují k roku 1870, kdy si Američan J. W. Hyatt se svým bratrem nechal patentovat hmotu včetně zařízení, ze které byl později vyroben celuloid. Velký rozvoj nastal po 1.světové válce, kdy v roce 1921 byl vynalezen první ručně ovládaný vstřikovací stroj. Postupem času se optimalizovali a vyvíjeli jednotlivé části vstřikolisu. Např. 1943 – plastikační šnek s vratným pohybem, 1950 – vyhřívaný horký rozvod, 1956 – vstřikovací jednotka se šnekovým mechanismem. Dnes hovoříme o plně automatizovaném procesu výroby, který se všemi modifikacemi, které dnes nabízí, je nejrozšířenější metodou zpracování polymerních materiálů, jejich směsí, kompozitu, kaučuku či pryže. [9], [10]

Produktem vstřikování je výlisek (Obrázek 6), který může mít podobu finálního výrobku (víčko, truhlík, hračky), polotovaru určeného pro další zpracování, nebo dílu pro následnou kompletaci celku (části automobilu, držáky a další.). [9], [10]



Obrázek 6 – Příklad výlisku [11]

Hlavní výhodou je rozměrová i tvarová přesnost u velkých objemů výlisků. Výsledný tvar výlisku je totiž dán dutinou formy a za dodržení podmínek vstřikovacího procesu získáváme opakovatelný proces, při kterém můžeme vyrábět i tvarově složité výlisky ve velmi krátkých výrobních intervalech. Nevýhodou jsou však vyšší náklady na pořízení strojních zařízení, forem a vybavení potřebného k provozu a údržbě. Metoda vstřikování je vhodná zejména pro sériovou výrobu s velkými výrobními objemy. [9], [10]

Od počátků vzniku technologie vstřikování plastů, již uplynuly desítky let. Zejména rozvoj v druhé polovině minulého století, měl za následek objevení základních kamenů vstřikování a globální rozmach této technologie. Díky širokému spektru využití v mnoha odvětvích průmyslu byly vyvinuty nejen nové materiály, ale také modifikace vstřikovacích strojů a procesu samotného. [10]

Mezi používané speciální metody vstřikování můžeme zařadit tyto:[9], [10]

- Vstřikování vícekomponentní včetně všech jeho modifikací
- Vstřikování vícebarevný dílů (viz Obrázek 7)
- Vstřikování dutých dílů s podporou vody (WIT)
- Vstřikování dutých dílů s podporou plynu (GIT)
- Vstřikování tenkostěnných i tlustostěnných dílů
- Vstřikování silikonu, pryže a kaučuku
- Vstřikování kaskádové
- Vstřikování za nízkého tlaku
- Vstřikování malých dílů (až do 1 g)
- Vstřikování dekorativní
- A další



Obrázek 7 – Ukázka vícebarevného vstřikování [12]

Veškeré modifikace neboli speciální metody vstřikování jsou založeny na principu standardního vstřikování a odlišují se především v parametrech a konstrukci vstřikovacího zařízení a formy. Díky modifikovaným technologiím můžeme vyrábět díly miniaturních rozměrů s váhou až jednoho gramu, díly tlustostěnné či tenkostěnné s dutými kapsami a mnoho dalšího. Jsme schopni vyrábět produkty, které bychom normální konvenční metodou byli schopni vyrobit buď s horší kvalitou nebo například horším ekonomickým efektem, nebo nebyli schopni vyrobit vůbec. [9]

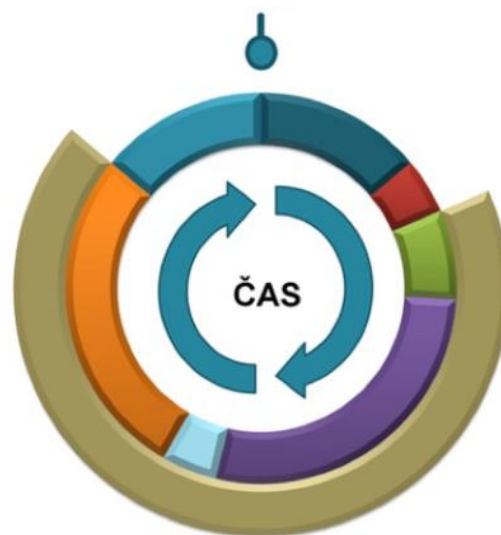
## 2.2.1 Princip technologie

Vstřikování plastů patří do skupiny tzv. tvářecích technologií, kam můžeme zařadit i technologie lisování, válcování, vytlačování a další. Během nich se vstupní materiál ve formě kaše, granulátu, pasty či kapaliny mění výrobek definovaného tvaru. Proces tváření probíhá obvykle za určitých podmínek, které využívají působení tepla či tlaku, nebo obojího dohromady. [9], [10], [13]

Technologie je založena na zákonitostech tlakového lití. Zpracovávaný plast či kompozit je z násypky dodáván do vstřikovací jednotky, kde je přeměňován působením tepla a tlaku z granulátu na taveninu. Forma taveniny, tak umožní materiálu docílit lepší homogenity. Ta je pomocí pístu nebo otáčivého šneku vtlačena za velké rychlosti tryskou do dutiny formy, která má požadovaný tvar vylisku. Po vyplnění tvarové dutiny nastává tzv. dotlaková fáze, jejímž cílem je eliminovat vliv smrštění a deformace během fáze chladnutí. V dutině formy dochází k odvodu vzduchu dělicí rovinou, popř. odvzdušňovacími kanálky jsou-li třeba a současně ke zchlazení taveniny. V konečné fázi dojde k rozevření formy a vyhození hotového vylisku. Samostatný popis fází vstřikovacího cyklu zobrazeny na Obrázek 8 a Obrázek 9 budou popsány níže. Po znovu ustanovení počátečních podmínek vstřikovací cyklu se může proces opakovat. [9], [10], [13]

Fáze vstřikovacího cyklu: [14]

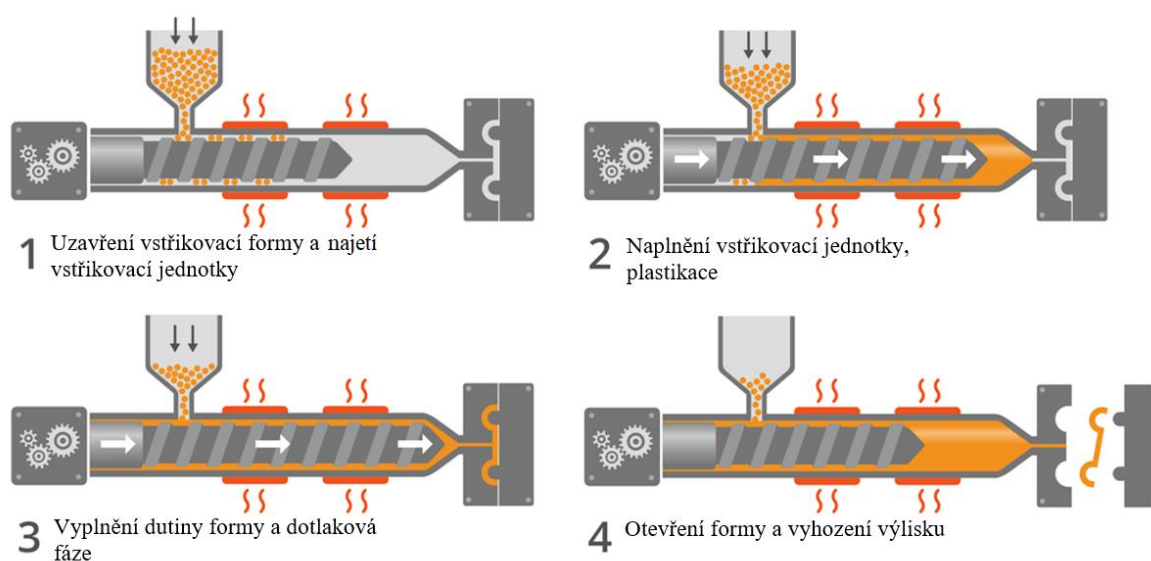
- Uzavření formy
- Najetí vstřikovací jednotky
- Naplnění vstřikovací jednotky a plastikace
- Plnění dutiny formy
- Přepnutí
- Dotlaková fáze
- Otevření formy a vyhození vylisku
- Ochlazování



Obrázek 8 – Jeden cyklus [41]

## Plastikace

Vstupní materiál, obvykle ve formě granulátu je doplňován buď ručně nebo mechanicky do násypky, která slouží jako zásobník pro vstřikovací zařízení. Odtud je materiál dodáván do vstřikovací jednotky, kde probíhá pomocí otáčejícího šneku nebo pístu homogenizace. Jednou ze základních podmínek správného plnění je, aby byly správně nastaveny teploty v jednotlivých pásmech plastikačního válce a před čelem šneku byla nejlépe stoprocentně homogenní směs. Při špatně homogenitě, nízké teplotě taveniny, popř. dalších podmínkách vstřikovacího procesu je následkem obvykle snižena jakost povrchu výlisku. [10], [13]



Obrázek 9 – Fáze vstřikovacího cyklu [14]

## Vstřikovací fáze

Dutina formy je plněna homogenní směsí až do jejího úplného zaplnění. Cílem je, aby v každém místě na čele taveniny byla konstantní rychlost proudění a dutina byla naplněna rovnoměrně v celém svém průřezu. Při výrobě výlisků, které nejsou tvarově složité, jsme zpravidla schopni tyto podmínky dodržet. U tvarově složitějších výlisků, které obsahují rozdílné tloušťky stěny, ale může docházet např. ke vzniku studeného spoje, propadů či nezatečení. Řešením poslední doby, které přináší eliminaci až 98% výroby vadných forem, je používání simulačních programů analýzy vstřikovacího procesu. V programu můžeme prověřit již hotovou vstřikovací formu včetně vtokového systému a zkontrolovat vstřikovací cyklus pro zadaný materiál a vstřikovací parametry. Software, ale nabízí také provádět optimalizace vtokové soustavy, chlazení, plnicího tlaku a další. [10], [13]

## **Přepnutí**

Přechod mezi vstřikovací fází a dotlakovou fází musí být plynulý bez porušení odezvy tlaku v dutině formy tzn. nesmí dojít k výraznému propadu či náhlému zvýšení tlaku mezi jednotlivými fázemi. Plnicí tlak by měl kontinuálně stoupat až po dosažení maximálního plnicího tlaku a poté by měl plynule přejít na fázi dotlaku. Při zahájení dotlaku a nedokončení vstřikovací fáze, dojde ke vzniku tzv. předčasného přepnutí a dutina formy je plněna dotlakem. To má za následek narušení konstantní rychlosti na čele taveniny. Naopak při opožděném přepnutí roste maximální plnicí tlak a dochází ke vzniku vyšších vnitřních pnutí, popř. přetoků v oblasti dělicí roviny. [10], [13]

## **Dotlaková fáze**

Dotlak je fáze působení tlaku po ukončení vstřikovací fáze. Od chvíle, kdy tavenina opustí plastikační válec, dochází k průběžnému ochlazování taveniny a tím i smrštění. To vede ke vzniku propadů, deformací, trhlin a dalších vad vylisku. Cílem dotlakové fáze je zabezpečit dosažení požadovaného tvaru a rozměrů vylisku, kvalitu povrchu a hmotnosti prodloužením působení tlaku. Nastavení doby dotlaku a tlakových úrovní se liší podle použitého materiálu, tvaru dutiny a umístění vtoku. [10], [13]

## **Chladnutí**

Snižování teploty neboli chladnutí vylisku začíná už od počátku vstřikovací fáze, kdy je plněna dutina formy. Samotné chladnutí vylisku tak probíhá po celou dobu cyklu, kdy tavenina předává své teplo tělu formy, až po jeho vyhození z formy. Nesmíme si to však plést s termínem chlazení, což je snižování nebo udržování teploty vstřikovací formy, probíhající od fáze dotlaku až po vyhození. Chlazení je konstrukčně řešeno chladicími kanály, ve kterých proudí médium s nastavenou teplotou. Optimální nastavení ochlazovací fáze má značný vliv na ekonomický aspekt celého procesu [10], [13]

## **Otevření formy a vyhození vylisku**

Konečnou fází je odjetí pohyblivé části formy (tvárníku) a vyhození vylisku. Poté se forma zavře a cyklus se nachází opět v počáteční pozici s ideálně stejnými podmínkami, aby nový cyklus byl identický jako ten předchozí. [10], [13]

## 2.2.2 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj (Obrázek 10) je označováno zařízením, které je určeno pro zpracování plastů zejména ve formě granulátu, pasty, drtě či kapaliny. V důsledku širokého spektra modifikací konvenčního vstřikování, existuje i široké spektrum vstřikolisů. Jednotlivé zařízení se liší např. konstrukčním provedením, uzavírací silou, nebo jinými specifikacemi. [15]

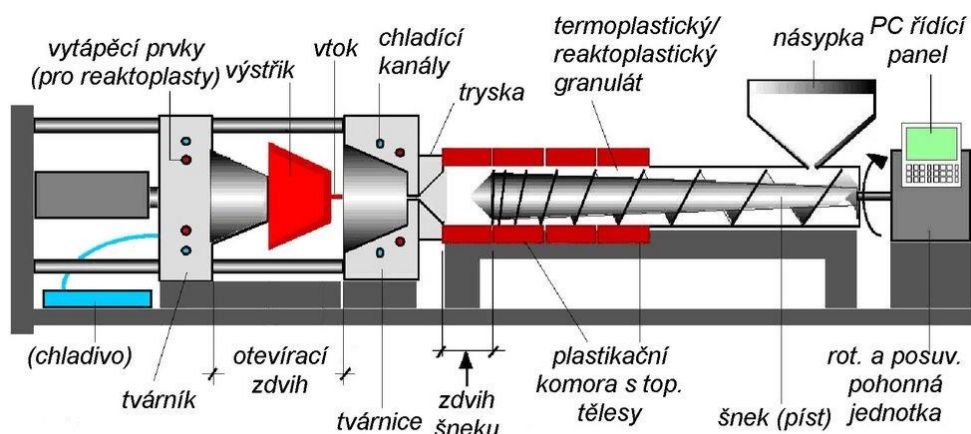


Obrázek 10 – Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 570 C [8]

Vstřikovací stroje můžeme rozdělit do několika skupin podle kritérií: [15]

- Podle pohonu – hydraulické, elektrické a jejich kombinace
- Podle konstrukční části tavicí komory – šnekové, pístové
- Podle orientace osy – horizontální, vertikální
- Podle vstupního materiálu – na termoplasty, reaktoplasty, kaučuky a pryže
- Podle uzavírací jednotky – dvoudeskové, tříděskové
- Podle otáček šneku – nízkootáčkové, vysokootáčkové, pomaloběžné a rychloběžné
- Podle předplastikační fáze – bez předplastikační fáze, s předplastikační fází
- Podle vedení uzavírací jednotky – bez vodícího sloupku, se dvěma nebo se čtyřmi sloupky
- Podle velikosti uzavírací síly – malé do 50 tun, střední 50–500 tun, velké nad 500 tun

Veškeré vstřikolisy i přes jejich různé modifikace, jsou zpravidla tvořeny základními konstrukčními celky (Obrázek 11): vstřikovací jednotka, šnek nebo píst, uzavírací jednotka, pohon stroje a jednotka pro kontrolu a řízení stroje. [15], [16]



Obrázek 11 – Popis vstřikovacího stroje [16]

## Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka je hlavním ústrojím celého vstřikolisu. Skládá se z násypky, konzole, plastikační komory, šneku nebo pístu a trysky. Její funkce je zpracovávání vstupního materiálu (granulátu) na homogenní taveninu s vysokou viskozitou. Granulát je dodáván z násypky (samovolné, střešovací, rotační) do plastikační komory s topnými tělesy. V plastikační komoře dochází pomocí pístu nebo otáčivého šneku k mísení taveniny. Šnek nebo píst, který je poháněn pohonem stroje, tlačí taveninu z plastikační komory směrem vpřed k vstřikovací trysce. Celá vstřikovací jednotka je uložena na pohyblivé konzoli, po které je jednotka, respektive tryska přisouvána nebo odsouvána od vtokové vložky formy. [15], [16]

Konstrukce vstřikovací jednotky a plastikační komory je dána zejména druhem vstupního materiálu, pro jehož zpracování je stroj navržen. Hlavní charakteristické parametry, které se udávají jsou vstřikovací kapacita a kapacita plastikace. Oba parametry spolu vzájemně korelují a určují nám maximální výrobní kapacitu jednotky. [15], [16]

## **Šnek / Píst**

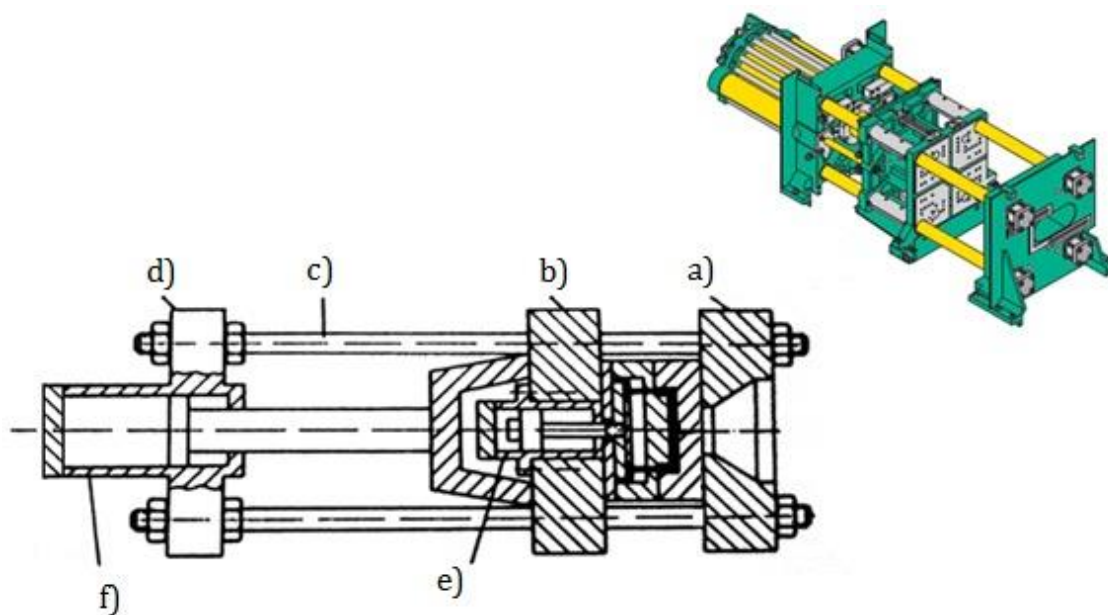
Šnek nebo píst v plastikační komoře je hlavní pracovní součástí, která vykonává řadu funkcí. Pístový mechanismus je předchůdce využití šneku a dále bude rozebrána pouze problematika funkce šneku, jelikož v dnešní době jsou téměř všechny vstřikolisy vybaveny touto technologií. Na Obrázek 11 je viditelné, že šnek není stejný po celé jeho délce. Klasický šnek používaný pro vstřikování polymerních materiálů dělíme na tři oblasti. [15], [16]

První oblast tzv. vstupní začíná od upínací části do pohonu a končí v cca šedesáti procentech délky šneku. Pod otvorem násypky má šnek největší hloubku. Hlavní funkcí této oblasti je dopravování granulátu směrem do plastikační části s topnými tělesy, kde dochází působení tepla a přeměně granulátu na taveninu. Druhá oblast je tvořena následující dvaceti procenty délky šneku a vykonává kompresní funkci. Směs je v této oblasti stlačována díky rozšiřování šroubovice, což vede k odvodu vzduchu z taveniny. V poslední oblasti tzv. homogenizační dochází k ještě intenzivnějšímu stlačování, a tak ke zvýšenému mísení taveniny pod velkým tlakem, aby bylo docíleno maximální homogenity viskózní směsi před vstupem na špičku šneku. Konstrukční rozdělení jednotlivých šneků závisí na použitém materiálu, pro který je šnek navržen. [15], [16]

## **Uzavírací jednotka**

Uzavírací jednotka je tvořena několika pohyblivými částmi, které umožňují otevírání a zavírání vstřikovací formy. Mezi hlavní prvky této části patří (Obrázek 12): vstřikovací forma, tvořena pohyblivou a pevnou částí, upínacími deskami, vodicími sloupky, vyhazovacím systémem a systémem, který dokáže vyvodit síly potřebné k uzavření formy i během působení velkých tlaků. Uzavření formy je zabezpečeno buď konstrukčně, pomocí mechanických zámků, hydraulicky pístem, nebo jejich kombinací. Systém umožňující posuv pohyblivé části, na které je upnuta pohyblivá část formy může být taktéž poháněna hydraulickým pístem nebo elektricky. Podle konstrukčního řešení se pak jedná čistě o hydraulický systém anebo hydraulicko-či elektricko-mechanický. V poslední době se přechází u většiny vstřikovacích zařízení na elektrický zdroj energie, namísto hydraulických pístů. [15], [16]





Obrázek 12 – Uzavírací jednotka

(a) pevná část (tvárnice), (b) pohyblivá část (tvárník), (c) vodící sloupky, (d) rám, (e) vyhazovač, (f) hydraulický píst [15]

Vyjma základních prvků, které již byly popsány může uzavírací jednotka obsahovat tzv. doplňkové systémy, které mají zpravidla funkci kontroly a ochrany. Jedná se o senzory a čidla, které vymezují krajní meze pohybu formy, vyhazovačů a ostatních pohyblivých částí. Bezpečnostní senzory, které kontrolují zavření pracovního prostoru během vstřikovacího procesu, aby nedošlo k ohrožení lidského zdraví, mají dnes všechna zařízení, které splňují bezpečnost práce. [15], [16]

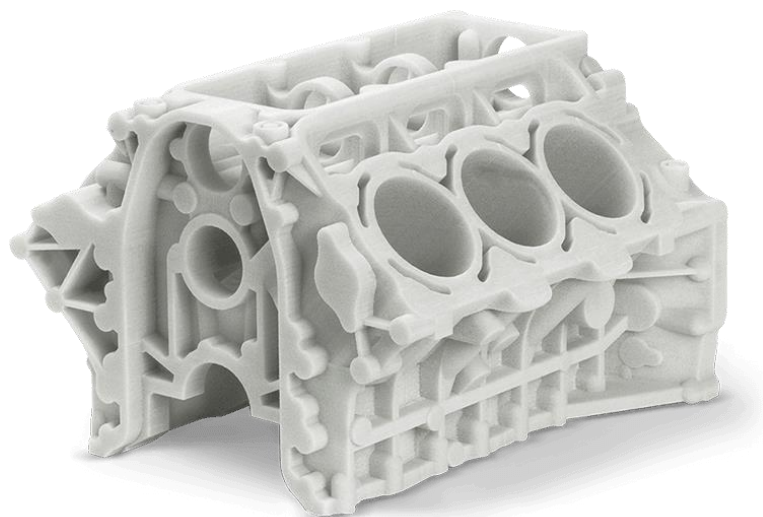
## Řízení a kontrola

Řízení a kontrola vstřikovacího zařízení je v posledních desítkách let prováděno pomocí mikroprocesoru a dotykového rozhraní. Hlavním úkolem kontrolní a řídicí jednotky je zpracovávat hodnoty měřených veličin, během vstřikování a porovnávat je, aby dodrženy zadané parametry vstřikovacího procesu. Pomocí uživatelského rozhraní je také možno jednotlivé parametry optimalizovat, či měnit podle nasazené formy na daném vstřikolisu a podle použitého materiálu. Kontrolní jednotka plní také funkci bezpečnostní. Pomocí senzorů a čidel detekuje dodržování krajních pozic pohyblivých částí a mezních hodnot měřených parametrů. Při porušení bezpečnosti či překonání limitů některého z parametrů vstřikování, může jednotka vyvolat chybové hlášení. [15], [16]

## 2.3 Technologie 3D Tisku

Aditivní technologie nebo také 3D tisk, byla dříve označována jako metoda rychlých prototypových výrobků (Rapid prototyping). Své uplatnění měla technologie v mnoha odvětvích průmyslu, kde se používala pro rychlou výrobu základních modelů (Obrázek 13), které mohli být prezentovány a testovány v rámci před vývojové fáze pro finální produkt. V dnešní době se však metoda 3D tisku používá pro mnoho dalších účelů. [17], [18]

Historie 3D tisku sahá k 80. létům minulého století, kdy se Japonec Hideo Kodama pokoušel nalézt způsob pro výrobu rychlých prototypových výrobků. Přišel s metodou nanášení tenkých vrstev pryskyřice, kterou polymeroval UV zářením. Jelikož si ale nenechal svůj objev patentovat, tak oficiálně uznaným objevitelem je až roku 1984 Charles Hull, který si nechal patentovat aditivní metodu SLA (Stereolithography apparatus). V roce 1988 na Univerzitě v Texasu objevili Dr. Carl Deckard a Dr. Joe Beaman metodu slinování jednotlivých vrstev prášku na místo kapaliny pomocí laseru tzv. SLS (Selective Laser Sintering). Kolem téhož roku vynalezl Scott Crump dnes nejvíce používanou metodu FDM (Fused Deposition Modeling). [19]



*Obrázek 13 – Ukázka 3D tisku [20]*

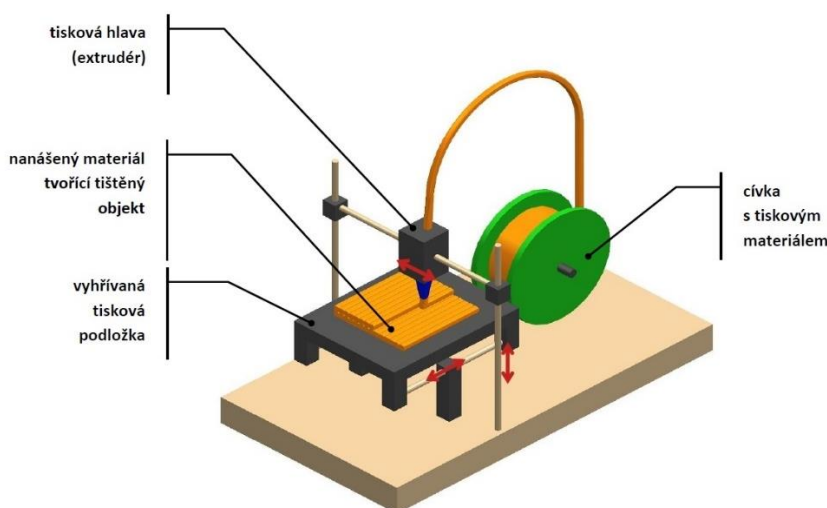
Dnes už hovoříme o velmi rozšířené technologii, které urazila velký kus cesty. Její zastoupení už není jen v odvětví průmyslu nebo lékařství. Své místo nachází u lidí, kteří mají 3D tisk jako své hobby, a to díky dostupnosti, jednoduchosti a ceně, která je výrazně ovlivněna velkou konkurencí.

### 2.3.1 3D Tisk pevných materiálů

Mezi metody, při kterých používáme jako vstupní surovinu pevný materiál, patří zejména FDM a FFF, které jsou nejrozšířenější a budou dále popsány. Na trhu bychom našli i další metody či modifikace různých společností. [18], [19], [21]

#### Fused Deposition Modeling (FDM)

Technologie FDM (Obrázek 14) je založena na principu tavení vstupního materiálu a jeho nanášení na podložku v tenkých vrstvách. Obdobnou metodou jen pod jiným označením je metoda FFF (Fused Filament Fabrication), protože FDM je opatřena ochranou známkou společnosti Stratasys. Hlavní využití má v oblasti tisku kompozitů včetně jejich modifikací s aditivními materiály. [18], [19], [21]



Obrázek 14 – Princip technologie FDM [21]

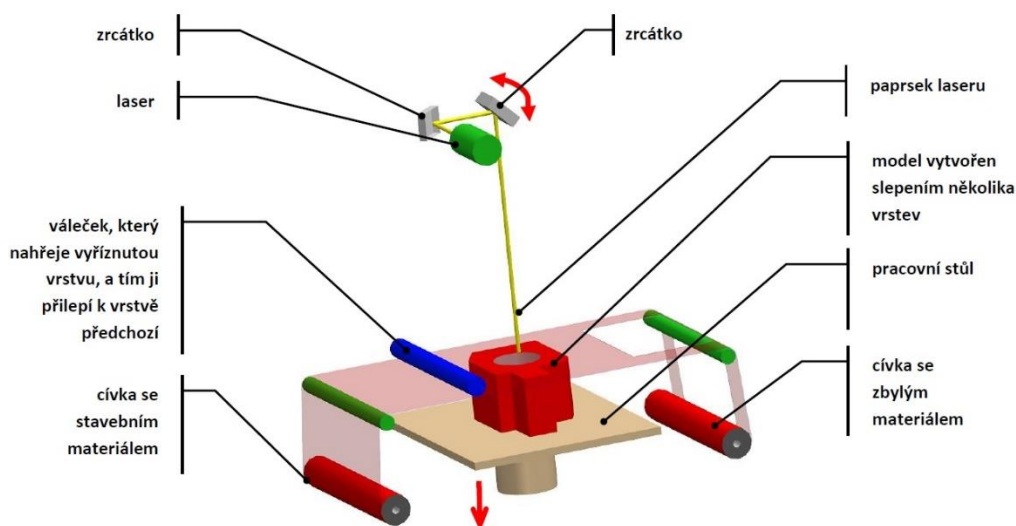
Filament neboli struna navinutá na cívce a vyrobená ze vstupního materiálu (např. PLA, ABS, PC, PC-ABS, PET, XT, ASA, a další) je protlačován vodícími koly do přehřáté trysky. Průměru filamentu je standardně 1,75 nebo 3 mm a ústí trysky 0,4 nebo 0,6 mm. V trysce je materiál natavován do formy taveniny a poté nanášen na podložku v tenkých vrstvách. Tímto způsobem dochází k vrstvení materiálu až do požadovaného tvaru. Při tisknutí tvarově složitějších dílů, může být potřeba tzv. podpor, které slouží jako podpěrné body při tisku můstků či dutin. V tom případě je tisková hlava vybavena dvěma tryskami, z něhož jednou je vytlačován materiál hlavní a druhou materiál pomocný. Po dokončení tisku je pomocný materiál buď mechanicky nebo chemicky odstraněn. [18], [19], [21]

Hlavní výhodou metody FDM/FFF je rychlá výroba dílu s vlastnostmi finálního výrobku a produkcí minimálního odpadu. Konečné vlastnosti mohou být nepříznivě ovlivněny rychlostí tisku, tloušťkou vrstvy, orientací tisku a teplot taveniny, popř. podložky. Veškeré procesní parametry musí být správně optimalizovány pro daný tisk. Nevýhodou je hrubá struktura dílu a nutné odstranění pomocného materiálu, pokud je použit. [18], [19], [21]

## Laminated Object Manufacturing (LOM)

Jednou z prvních forem aditivní technologií je metoda LOM neboli systém výroby laminovaných dílů, která je zobrazena na Obrázek 15. Principem je vyřezávání profilu pomocí laseru do vstupního materiálu. Jako vstupní materiál je použita nekonečná role navinuta na cívce, která může být z papíru, nylonu či kompozitu. Fólie je odtáčena z jedné cívky k nahřívacímu válci, který zajistí správné přilnutí nové vrstvy a dále přes pracovní stůl na druhou cívku, kde je namotáván zbytkový materiál. Laser vyřezává z folie jednotlivé vrstvy, které ve výsledku tvoří tvar součásti. [18], [19], [21]

Nevýhodou této technologie je malá produktivita s velkým podílem odpadu a pevnost daná zvoleným pojivem jednotlivých vrstev. Oproti tomu získáváme vysoce kvalitní výrobky s nízkou cenou stavebního materiálu. [18], [19], [21]



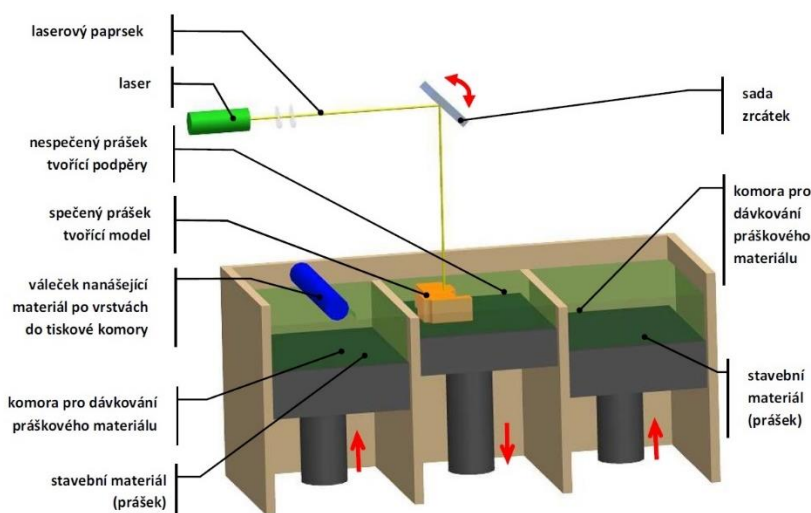
Obrázek 15 – Princip technologie LOM [21]

## 2.3.2 3D Tisk práškových materiálů

Práškový materiál je používán u metod SLS, DMLS, SHS, BJ a dalších. Dále budou popsány první dvě. Principem všech metod je nanášení prášku na pracovní plochu a její vytvrzování buď působením laseru, tepla nebo chemicky. Hlavní výhodou je výroba tvarově složitějších dílů bez podpory pomocného materiálu a nižšího procenta materiálu odpadního. [21], [22]

### Selective Laser Sintering (SLS)

Selektivní laserové sinterování (SLS) nebo jen laserové sinterování (LS) je proces, ve kterém polymerní materiál ve formě prášku zahříván těsně pod teplotou tání. Válec nanáší materiál ze zásobníku v rovnoměrné vrstvě (standartně 0,1 mm) na pracovní plochu. Poté je nanesená vrstva spékána laserovým paprskem ( $\text{CO}_2$ ) pouze v oblasti, která tvoří průřez součásti. Pokud je vrstva hotová, celá platforma se posune o jednu tloušťku níže a celý cyklus se opakuje, dokud nejsou hotové všechny vrstvy. [19], [22]



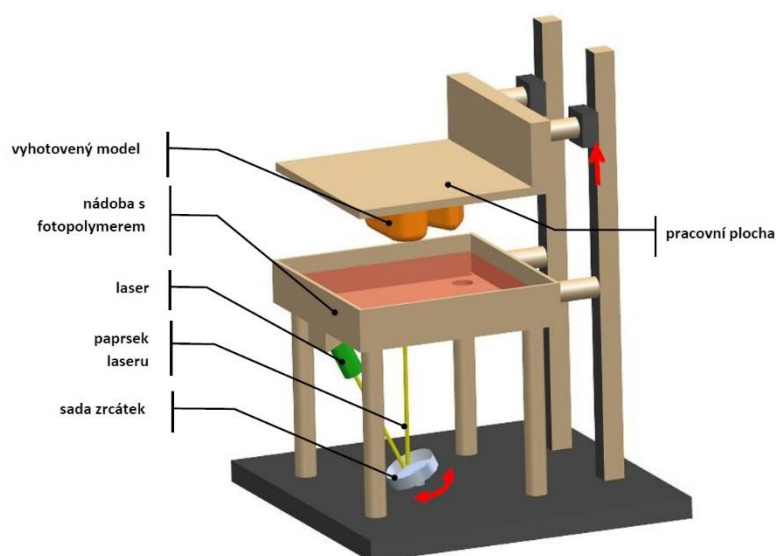
Obrázek 16 – Princip technologie SLS a DMLS [21]

### Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Technologie DMLS slouží k výrobě dílů z kovového prášku (ocel, bronz, titan a další). Princip je totožný jako u SLS metody (Obrázek 16), avšak za použití vyšších teplot. Díky tomu je zapotřebí výkonnějších zdrojů energie (laser, elektronový paprsek). Celý proces probíhá v ochranné atmosféře, obvykle Argonu namísto dusíku jako u SLS. [19], [22]

### 2.3.3 3D Tisk fotopolymerů

Do technologie na bázi fotopolymerů patří metody SLA a DLP. Vstupním materiálem pro technologii tisku fotopolymerů je pryskyřice ve formě kapaliny, která je polymerována UV světlem. Kapalina je vytvrzována uvnitř nádoby, která plní jak funkci zásobníku, tak pracovního prostředí. Výhodou je možné znovu použití kapaliny a tím snížení procenta odpadu. Nevýhodou je nutné dotvrzení výrobku pro zlepšení mechanických vlastností. [18], [19], [21]



Obrázek 17 – Princip technologie SLA [21]

### Stereolithography (SLA)

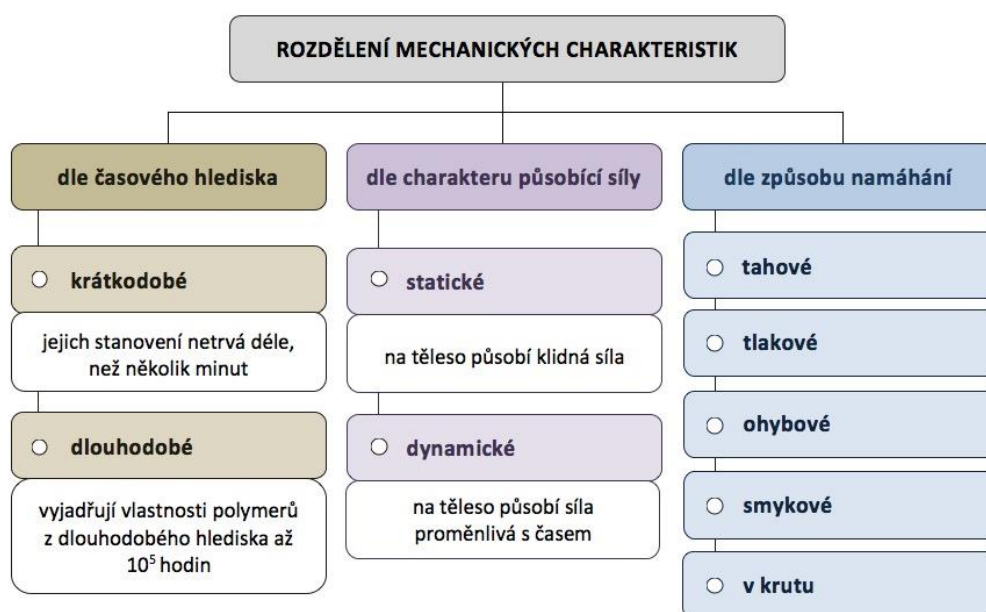
Jak již bylo napsáno, jedná se o nejstarší typ technologie 3D tisku. Kapalina (pryskyřice) je vytvrzována pomocí UV světla vrstvu po vrstvě až do vytvoření celého modelu. Existují dva principy. První spočívá, že pracovní plocha je zcela ponořena v kapalině. Jednotlivé vrstvy jsou vytvrzovány laserem, který je umístěn pod nádobou, a zároveň je vytahována pracovní plocha směrem nahoru viz Obrázek 17. Model je tzv. vytahován z nádoby s fotopolymerem. Druhý princip je opačný. Laser je umístěn shora nádoby a pracovní plocha je postupně ponořována vždy o tloušťku jedné vrstvy. [19], [21], [22]

Metoda DLP je rozdílná oproti SLA tím, že používá projektor namísto bodového laseru. Díky tomu je DLP rychlejší při srovnání tisku identického dílu. [22]

## 2.4 Mechanické zkoušky materiálů

Mechanické vlastnosti řadíme mezi základní parametry, které u materiálů zjišťujeme. Určí např. pevnost, houževnatost, pružnost a další. Můžeme je rozdělit z hlediska typu a působení do tří hlavních skupin: podle času, charakteru síly a způsobu namáhání viz Obrázek 18. Charakteristiky mechanických vlastností jsou proměnné veličiny, které jsou ve velké míře závislé na tvaru a rozměrech tělesa, struktuře, zkušebních podmínkách a další. [4], [23], [24]

Zjišťování mechanických charakteristik se provádí experimentálními metodami na zkušebních tělesech. Zkušební těleso, které je podrobováno mechanickému testování, musí být vyrobeno v rozměrech stanovených příslušnou normou. Stejně tak i samotné měření má daný postup a metodiku, která musí být dodržena. [4], [23], [24]



Obrázek 18 – Rozdělení mechanických charakteristik [4]

Principem je zatěžování zkušebního tělesa vnější silou. Těleso je působením vnější síly deformováno, čímž dochází ke změně jeho tvaru. Měří se jak velikost síly, tak příslušná deformace, která může být dvojího typu. V prvním případě se po ukončení působení deformační síly těleso vrátí zpět do původní podoby, jedná se o tzv. pružnou deformaci. Pokud deformace zůstává na tělese i po ukončení zatěžování, jedná se o deformaci trvalou tzv. plastickou. V praxi se často setkáváme s kombinací obou zároveň. [4], [23], [24]

Mechanické charakteristiky měřené statickým způsobem jsou založeny na principu postupného zatěžování tělesa po dobu několika sekund až hodin. V tom případě se jedná o krátkodobé statické zkoušky. Můžeme však zkoušky provádět i v rozsahu dní či roků, pak se jedná o zkoušky dlouhodobé (např. kríp). [4], [23], [24]

Mechanické vlastnosti měřené statickou metodou: [4]

- Mechanické vlastnosti v tahu
- Mechanické vlastnosti v tlaku
- Mechanické vlastnosti v ohybu
- Mechanické zkoušky dlouhodobé
- Tvrdost

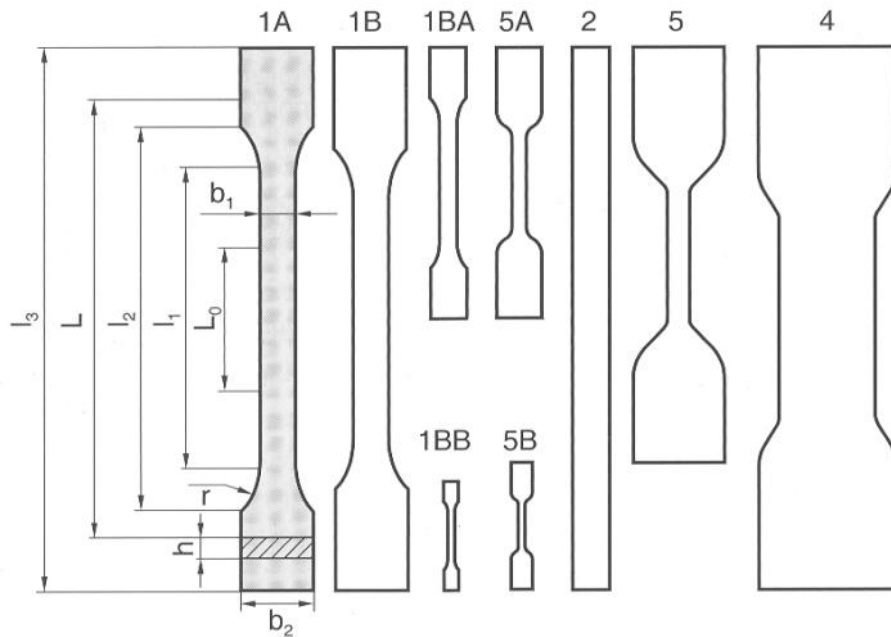
V praxi je však velké množství polymerních materiálů namáhána a deformována opakovaně. Např. opakované a zároveň rozdílné zatěžování pneumatik při jízdě rovně a při zatáčení, nebo prošlapávání podrážky obuvi a další. Je-li součást namáhána tlakovým, tahovým či ohybovým namáháním, které se v průběhu času mění až do jejího porušení, mluvíme o tzv. dynamickém poškození (únavě) materiálu. Z tohoto důvodu jsou materiály podrobovány i cyklickým zkouškám, který mohou mít střídavý, pulsující nebo mívivý průběh zatížení. [4], [23], [24]

## 2.4.1 Zkouška tahem

Tahová zkouška je základní statickou zkouškou, kterou určujeme pevnost a plasticitu materiálu. Její princip spočívá v zatěžování zkušebního tělesa ve směru své osy, které je upnuto do čelistí trhačího stroje pomalu vzrůstající vnější silou. Síla vzrůstá kontinuálně až do předem stanovené hodnoty deformace či napětí, nebo do přetržení vzorku. [4], [23], [24], [25]

Zkouška se standartně neprovádí na polotovaru či hotovém výrobku, ale na zkušebním tělese, které má předem definované rozměry normou ČSN EN ISO 527-2. Obvykle probíhá měření na tělesech tvaru oboustranné lopatky viz Obrázek 19. Díky oboustrannému rozšíření zkušebního tělesa je zabezpečeno dostatečně silné přidržení v čelistech a napětí vyvolávané tahovou silou je soustředěováno v zúženém průřezu. [4], [23], [24], [25]





Obrázek 19 – Typy zkušebních těles [26]

Výsledkem je tahový diagram závislosti zatížení vůči prodloužení, ze kterého jsme schopni určit základní charakteristiky jako mez úměrnosti, elasticity, kluzu, mez pevnosti a další viz Obrázek 20. Ne všechny materiály však vykazují všechny charakteristiky jako např. houževnaté polymery (kaučuk). [24], [25]

### Mez úměrnosti ( $\sigma_E$ )

Zpočátku tahové zkoušky se zkušební těleso prodlužuje úměrně velikosti tahové síly. Nastává pružná (elastická) deformace až do překonání meze kluzu. V celé této oblasti platí Hookův zákon a těleso se po uvolnění vrátí do počátečního stavu. [23], [24], [25]

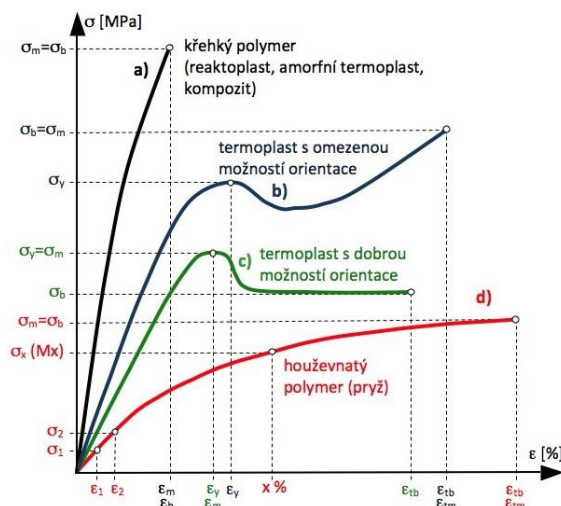
Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [MPa] \quad [1]$$

$\sigma$  – mechanické (tahové) napětí [MPa]

$E$  – modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa]

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-]



Obrázek 20 – Tahový diagram pro různé typy polymerů [4]

## Mez kluzu ( $\sigma_y$ )

Po mezi úměrnosti stále roste napětí a deformace, ale už nelineárně. Tato oblast končí stanovením meze kluzu, po jejímž překonání nastávají trvalé (plastické) deformace. V praxi se jedná o velmi zásadní charakteristiku. Díky ní stanovujeme odolnost materiálů proti vzniku plastických deformací. [23], [24], [25]

Vzorec pro výpočet meze kluzu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [MPa] \quad [2]$$

$R_e$  – napětí na mezi kluzu [MPa]

$F_e$  – síla na mezi kluzu [N]

$S_0$  – počáteční plocha průřezu zkoušeného tělesa [mm<sup>2</sup>]

## Mez pevnosti ( $\sigma_m$ )

Překonáním meze kluzu nastává v materiálu plastická deformace a k deformaci dochází v celé délce zkušebního tělesa. Tato oblast platí až do ustanovení Meze pevnosti, tedy maximálního napětí do porušení. V tento okamžik nemusí dojít k přetržení tělesa, nýbrž k tvorbě krčku, což vede k následnému poklesu napětí. [23], [24], [25]

Vzorec pro výpočet meze pevnosti:

$$R_m = \frac{F_m}{S_o} \quad [MPa] \quad [3]$$

$R_m$  – napětí na mezi pevnosti [MPa]

$F_m$  – největší síla [N]

$S_o$  – počáteční plocha průřezu zkoušeného tělesa [mm<sup>2</sup>]

## **Tažnost**

Tažnost je hodnota poměrného prodloužení vzorku vyjádřená v procentech. [23], [24]

Vzorec pro výpočet tažnosti:

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100 \quad [\%] \quad [4]$$

$A$  – tažnost [%]

$L_u$  – konečná délka zkoušeného tělesa [mm]

$L_o$  – počáteční délka zkoušeného tělesa [mm]

## **Kontrakce**

Neboli zúžení je definováno jako poměr počáteční a konečné plochy průřezu ku počáteční ploše průřezu, který je vyjádřen v procentech [23], [24]

Vzorec pro výpočet kontrakce:

$$Z = 100 \cdot \frac{S_o - S_u}{S_o} \quad [\%] \quad [5]$$

$Z$  – kontrakce [%]

$S_u$  – konečná plocha průřezu zkoušeného tělesa [mm<sup>2</sup>]

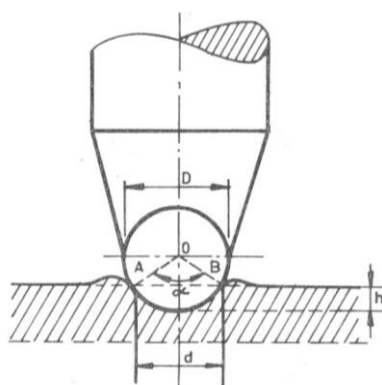
$S_o$  – počáteční plocha průřezu zkoušeného tělesa [mm<sup>2</sup>]

## **Lom**

Konečnou fází je přetržení zkušebního tělesa a tím ukončení tahové zkoušky. [23], [24], [25]

## 2.4.2 Zkouška tvrdosti vtlačáním kuličky

Historie metody vtlačáním kuličky sahá až do roku 1900, kdy ji představil švédský inženýr Johana A. Brinella a od té doby expandovala do průmyslu po celém světě. Zkouška je normována dle ČSN EN ISO 2039-1. Principem je postupné vtlačování kalené ocelové kuličky do zkušební tělesa (Obrázek 21). Nejprve je vyvoláno prvotní zatížení  $9,8 \pm 0,1\text{N}$  a až poté definované zatížení, které vtlačí kuličku do materiálu do hloubky 0,15 – 0,35 mm po dobu 2-3 s. [4], [23], [24], [27]



Obrázek 21 – Princip metody vtlačováním kuličky [26]

Parametry měření: [27]

- Průměr kuličky:  $5,0 \pm 0,05$  mm
- Rozsah tvrdoměru:  $0,4 \pm 0,005$  mm
- Max deformace rámu: 0,05 mm (podél hlavní osy síly)
- Zatěžující síla: 49, 132, 358, 961 N ( $\pm 1$  %)

Výsledkem je tvrdost (HB) určena z poměru redukovaného zatížení ku ploše vtlačení a hloubce vtisku [27]

Vzorec pro výpočet tvrdosti:

$$HB = \frac{F_r}{\pi d h_r} \quad [-] \quad [6]$$

HB – tvrdost metodou vtlačáním kuličky [-]

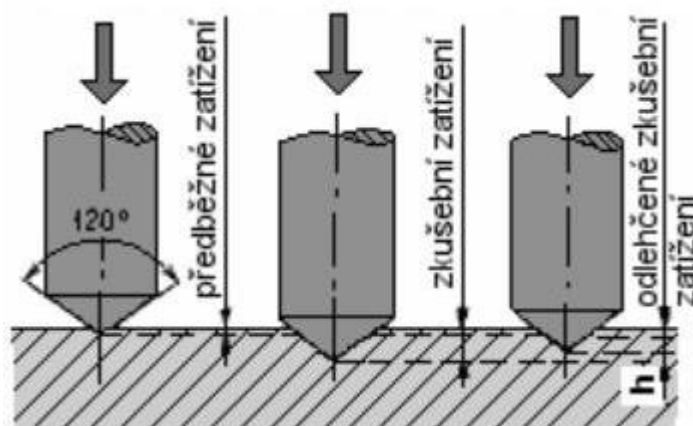
$F_r$  – redukované zkušební zatížení [N]

$h_r$  – redukovaná hloubka vtisku [mm]

d – průměr kuličky [mm]

### 2.4.3 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Zkouška tvrdosti dle Rockwella má počátky roku 1914, Hugh M. Rockwell a Stanley P. Rockwell vynalezli první tvrdoměr na měření rozdílu hloubky. Principem metody je vtlačování kuželu s vrcholovým úhlem 120 ° (Obrázek 22), nebo kuličky. Na indentor ze slinutého karbidu nebo diamantu je vyvoláno nejprve počáteční zatížení (10 s) a poté zkušební, kdy indentor vniká do zkušebního tělesa. [23], [24], [28]



Obrázek 22 – Princip metody podle Rockwella [29]

Parametry měření: [30]

- Počáteční zatížení: 98,07 N ( $\pm 2 \%$ )
- Zkušební zatížení: 588,4 nebo 980,7 N ( $\pm 2 \%$ )
- Doba zkušebního zatížení: 1 až 3 s; 1 až 5 s nebo 10 až 15 s podle materiálu
- Maximální zatlačení indentoru: 0,2 mm
- Průměr kuličky: 1,5875; 3,175; 6,35 nebo 12,7 mm

Výsledkem je tvrdost (HRX, kde X je stupnice tvrdosti např. R ,L ,M ,E) určena z maximální hloubkou vtisku [27]

Vzorec pro výpočet tvrdosti:

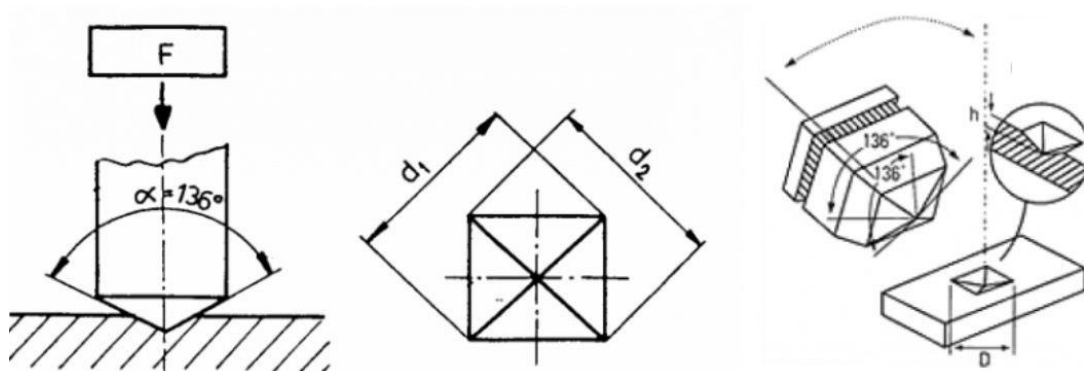
$$HR = 130 - e \quad [-] \quad [7]$$

HR – tvrdost metodou Rockwell [-]

e – hloubka vtisku po odstranění zkušebního zatížení [0,002 mm]

## 2.4.4 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Zkouška tvrdosti dle Vickerse se datuje k roku 1921, kdy ji poprvé popsali Robert L. Smith a George E. Sandland. Principem zkoušky je vtlačování čtyřbokého diamantového jehlanu (identoru) do zkušební tělesa zatěžující silou (Obrázek 23). Vrcholový úhel, který svírají protilehlé stěny jehlanu je  $136^\circ$ , a to z důvodu vzniku co nejmenšího odporového tření během zatěžování. [23], [24], [28]



Obrázek 23 – Princip metody podle Vickerse [29]

Parametry měření: [23], [24], [28]

- Zkušební zatížení:  $0,09807 \leq F \leq 1,96$ ;  $1,961 \leq F \leq 49,03$ ;  $F \geq 49,03$
- Čas působení zatížení: 10 až 15 s
- Vzdálenost středu vtisku od okraje musí být 2,5 až 3násobek délky uhlopříčky (podle materiálu) a vzdálenost středů dvou vtisků 3 až 6násobek.

Výsledkem je určení tvrdosti podle Vickerse (HV) výpočtem poměru zátěžné síly a průměrné hodnoty uhlopříček vtisku. [28]

Vzorec pro výpočet tvrdosti:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d_{1,2}} \quad [-] \quad [8]$$

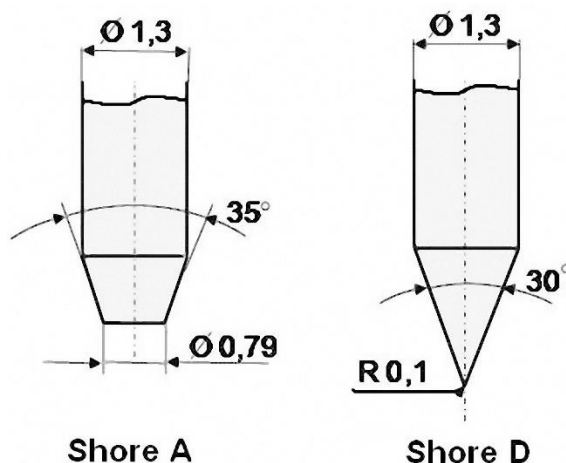
Hv – tvrdost metodou Vickers [-]

F – zkušební zatížení [N]

$d_{1,2}$  – průměr délek uhlopříček  $d_1$  a  $d_2$  [mm]

## 2.4.5 Zkouška tvrdosti dle SHORE

Metoda Shore pro měření tvrdosti je založena na principu vtlačování hrotu A nebo hrotu D (Obrázek 24) podle tvrdosti materiálů. Hrot A je převážně pro měkké zkušební tělesa, zatímco hrot D pro tvrdší. Těleso se položí a přitlačí ho opěrná patka. Poté je hrot vtlačován do zkušebního vzorku za definovaných podmínek dle normy ČSN EN ISO 868. Tvrdost se odečítá přímo ze stupnice tvrdoměru po ukončení zatěžování. [23], [24], [31]



Obrázek 24 – Hrot tvrdoměru typu A a D [32]

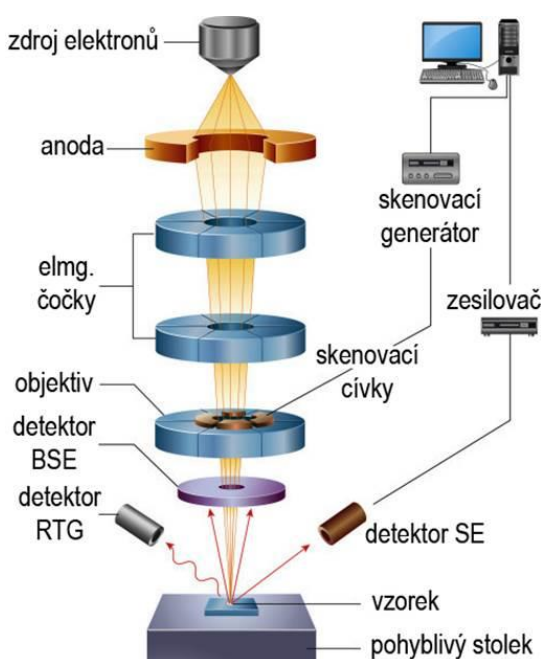
Parametry měření: [31]

- Zkušební zatížení: 8,05 nebo 44,45 N
- Čas měření: 15 s
- Vzdálenost středů dvou vtisků musí být minimálně 6 mm

Výsledkem je určení tvrdosti metodou Shore s označením HshX, přičemž X je typ tvrdoměru. Např. tvrdost HShD / 15:45 – kde D je použitý typ tvrdoměru, 15 je čas v sekundách od chvíle najetí opěrné desky na kontakt se zkušebním tělesem a provedení měření tvrdosti, hodnota 45 je výsledná hodnota tvrdosti.

## 2.5 Skenovací elektronový mikroskop (SEM)

Elektronový mikroskop (Obrázek 25) využívající technologii skenování (řádování) je optické zařízení, které umožňuje zkoumání struktur organických i neorganických materiálů do rozlišení nanometrového měřítka. Oproti klasickým světelným mikroskopům nevyužívá jako zdroj záření fotony, ale elektrony. Elektrony jsou emitovány z vlákna a kolimovány do paprsku ve zdroji elektronů. Poté je paprsek zaostřen na povrch zkoumaného vzorku sadou čoček v elektronovém sloupci. Aby bylo zabráněno interakci elektronů s vnějším prostředím je celý prostor mikroskopu ve vakuu, popř. je komora naplněna inertním plynem. [33] , [34]



Obrázek 25 – Schéma skenovacího elektronového mikroskopu [33]

Principem metody je detekování sekundárních a zpětně odražených elektronů. Zatímco sekundární elektrony, které se generují v místě dopadu svazku elektronů, určují tvar povrchu, tak zpětně odražené elektrony určují topografii a materiálovou strukturu vzorku. Důležitým aspektem pro zkoumání povrchů metodou SEM je, aby vzorek byl elektricky vodivý. Pokud se jedná o kovové materiály, stačí obvykle povrch jen očistit. U nevodivých, nekovových materiálů se musí na povrch vzorku nanést tenký povlak vodivého materiálu (zlata). Tloušťka nanášené vodivé vrstvy bývá 10–20 nm. [33], [34]



### 3 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo zpracovat literární rešerši z oblasti 3D tisku a vstřikování plastů pro polymerní materiály včetně jejich následného porovnání. Dále analyzování daných metod při výrobě vzorků, které byly použity pro výzkum mechanických vlastností. Problematika vstřikování, 3D tisku a použitých metod pro zjišťování mechanických vlastností byla detailněji popsána v teoretické části. V praktické (experimentální) části bylo cílem provést výzkum přípravy materiálu, výrobu a testování mechanických vlastností vzorků s cílem stanovení užitných vlastností jednotlivých systémů.

V praktické části byly stanoveny tyto cíle:

- Příprava materiálu
- Výroba vzorků metodou 3D tisku a vstřikování
- Analýza mechanických vlastností
- Diskuse výsledků a stanovení užitných vlastností

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

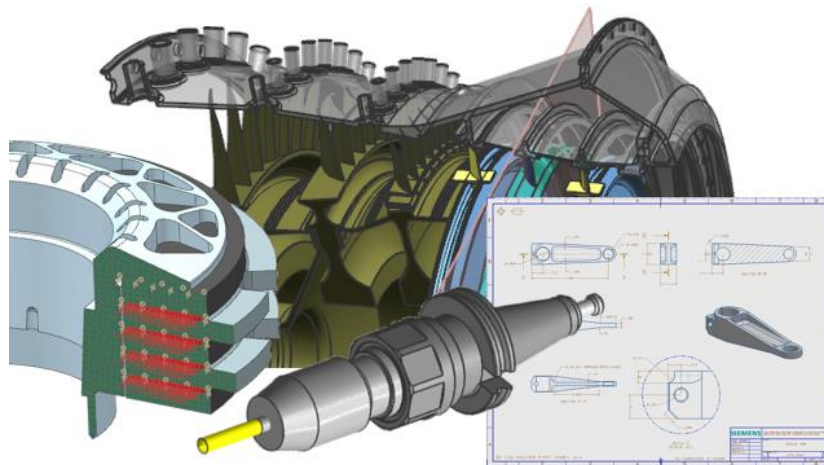
Praktická část se zabývá výzkumem mechanických vlastností nízkohustotního a lineárního nízkohustotního polyetylénu zpracovaného metodou vstřikováním a 3D tisku. V závěru části je vyhodnocení a porovnání jednotlivých metod a metod zpracování.

### 4.1 Použitý software

#### NX 12.0

Software Siemens NX 12.0 je flexibilní a výkonný program v oblasti CAD/CAM/CAE podpory. NX nabízí generování návrhových, simulačních a výrobních řešení, které umožňují zrychlit a zefektivnit vývoj a výrobu produktů. Poskytuje řadu integrovaných nástrojů v rámci několika systémových rolí (Obrázek 26), které jsou např.: [35]

- Modeling
- Sheet Metal
- Drafting
- A další



Obrázek 26 – Ukázka tvorby v NX 12.0 [35]

#### PrusaSlicer 2.4.0

Software pro podporu 3D tisku PrusaSlicer nebo dříve označovaný také Slic3r Prusa Edition je interně vyvinutý software české firmy Prusa Research, která je na trhu od roku 2012. Jedná se o open-sourcový nástroj pro slicování, který obsahuje velkou řadu nástrojů a funkcí. Díky němu lze nastavovat, měnit i vytvářet data pro export do 3D tiskárny. [36]

## 4.2 Použitý materiál

Jako materiál pro zpracování experimentální části byl použit recyklovaný polyetylén od firmy ETW s.r.o., která se zabývá recyklací plastových odpadů. Na českém trhu působí firma od roku 2017 a zaměřuje se zejména na zpracování LDPE a LLDPE regranulátů. Firma kromě regranulačních extruzních linek disponuje také mycí technologií, což jí umožňuje zpracovávat odpadní fólie z různých odvětví a dosahovat vysoké kvality regranulátu v objemu cca 6 000 tun ročně. [37]

LDPE i LLDPE dodaný od firmy ETW, obsahoval také materiálový list v tištěné podobě (viz Tabulka 2 a Tabulka 3), ve kterém byly uvedeny základní vlastnosti regranulátu a doporučené způsoby jeho zpracování. Oba materiály jsou vhodné zejména pro vytlačování a vyfukování.

Tabulka 2 – Materiálový list LDPE (ETW) [37]

| Parametry                                | Měřená jednotka     | Testovací metoda  | Typické rozmezí |
|--|---------------------|-------------------|-----------------|
| Index toku taveniny MFI (190 °C; 2,16kg) | g / 10 min          | ISO 1133          | 0,5 - 0,7       |
| Měrná hmotnost                           | g / cm <sup>3</sup> | ISO 1183          | 0,940 - 0,942   |
| Balení materiálu                         | ks / kg             | Big Bag / Oktabín | 1 / 1200        |
| Pevnost tahu (230 °C; 50 mm/min)         | MPa                 | ISO 527           | >21             |
| Tažnost                                  | %                   | ISO 527           | 550             |
| Přetržení (230 °C; 50 mm/min)            | MPa                 | ISO 527           | >21             |

Tabulka 3 – Materiálový list LLDPE (ETW) [37]

| Parametry                                | Měřená jednotka     | Testovací metoda  | Typické rozmezí |
|--|---------------------|-------------------|-----------------|
| Index toku taveniny MFI (190 °C; 2,16kg) | g / 10 min          | ISO 1133          | 1,1 - 1,5       |
| Měrná hmotnost                           | g / cm <sup>3</sup> | ISO 1183          | 0,920 - 0,940   |
| Balení materiálu                         | ks / kg             | Big Bag / Oktabín | 1 / 1200        |
| Pevnost tahu (230 °C; 50 mm/min)         | MPa                 | ISO 527           | >24             |
| Tažnost                                  | %                   | ISO 527           | 930             |
| Přetržení (230 °C; 50 mm/min)            | MPa                 | ISO 527           | 24              |

### 4.3 Příprava materiálu

Materiál pro zpracování experimentální části byl zakoupen ve dvaceti kilogramových pytlích bez silikagelu. I přesto, že se jedná o materiál s minimální nasákavostí, jeho vzdušná vlhkost mezi ččkami granulátu byla cca 15 %. Pro snížení vlhkosti granulátu bylo použito procesu sušení v horkovzdušné sušárně UN30m+ bez ventilátoru (s přirozenou cirkulací), značky Memmert (E. č. SMV09612284) na Obrázek 27. Granulát byl sušen v hliníkových miskách s parametry sušení, které byly stanoveny na 40° C pod dobu 24 hodin se stoprocentní cirkulací vzduchu. Poté byl granulát vyjmut a byla naměřena hodnota vzdušné vlhkosti 8 %.



Obrázek 27 – Sušárna Memmert UN30m+

Po vysušení byla jedna polovina granulátu použita při výrobě vzorků metodou vstříkovaní a druhá polovina byla nasypána do vakuových sáčků a zavakuována z důvodu přepravy a zamezení opětovnému nárůstu vzdušné vlhkosti.

Filament pro 3D tisk byl vyroben v Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace TUL na extruderu firmy 3devo a pod vedením pana Ing. Jakuba Macháčka. V prvním kroku byly nastaveny parametry extruze.

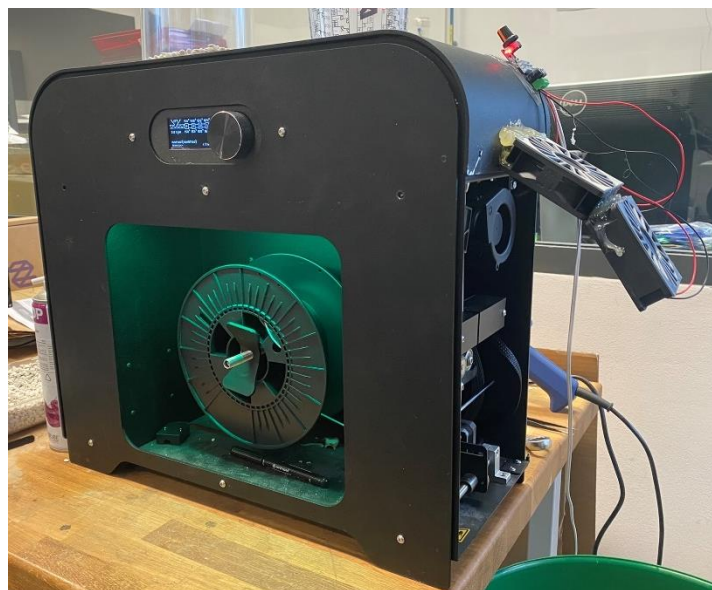
Parametry nastavené na extruderu: (Obrázek 28)

- Teploty na šneku:  $t_1= 140\text{ °C}$ ;  $t_2= 149\text{ °C}$ ;  $t_3= 156\text{ °C}$ ;  $t_4= 165\text{ °C}$
- Průměr filament: 1,75 mm
- Otáčky: 3 ot/min



Obrázek 28 – Nastavené parametry na extruderu

Poté byl do násypky umístěné ve vrchní části extruderu nasypán granulát, který odtud propadal přes síto do vyhřívaného šneku, ve kterém došlo k plastikaci na viskózní homogenní taveninu. Otáčením šneku byla tavenina tlačena do horké trysky, která usměřovala tok taveniny a stanovovala průměr filamentu. Filament odváděný za horkou tryskou protilehlými otáčejícími koly a chlazený celkem čtyřmi ventilátory byl pomocí polohovadla namotán na špulku. Extruder na TUL byl vybaven přídatnými ventilátory a byly z něj odejmuty čelní i boční dvířka viz (Obrázek 29). Díky tomu v prostoru za horkou tryskou bylo zajištěno lepší chlazení filamentu.

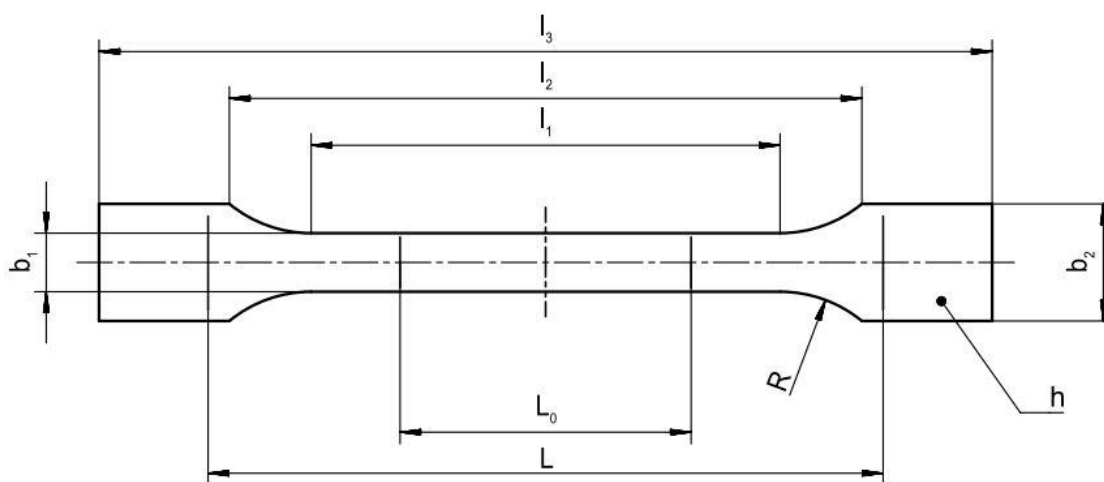


Obrázek 29 – Extruder 3devo

Hotový navinutý filament z LDPE i LLDPE byl uzavřen do plastového boxu, ve kterém byl umístěn silikagel, kvůli absorpci vlhkosti. Takto byl materiál přepraven a uskladněn až do doby tisku.

## 4.4 Výroba zkušebních vzorků

Tvar a rozměr zkušebních vzorků byl dán dutinou vstřikovací formy, která odpovídá rozměrovému předpisu normy ČSN EN ISO 527–2 Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Norma udává podmínky, za kterých se stanovují tahové vlastnosti plastů. Přestože norma stanovuje podmínky zejména pro tvářená zkušební tělesa, byly její podmínky použity i pro stanovení mechanických vlastností vyrobené aditivní technologií. [38]



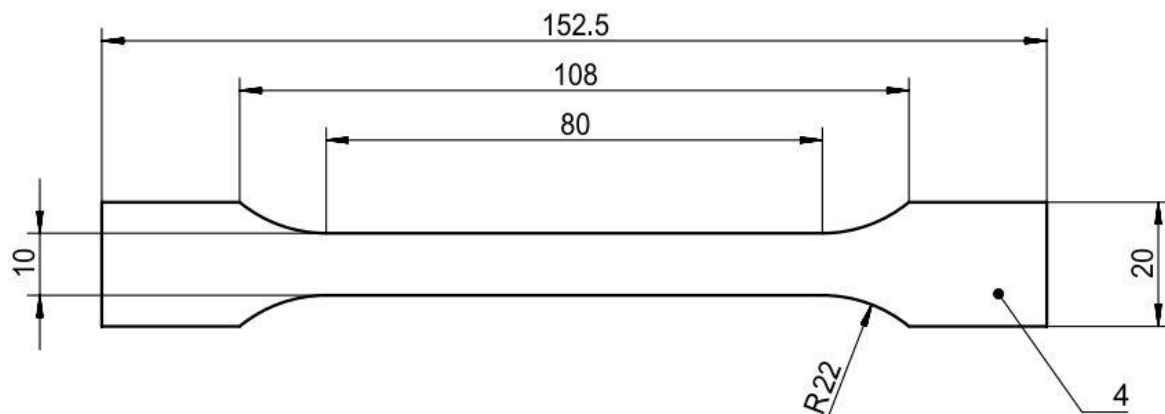
Obrázek 30 – Zkušební těleso typu 1A [38]

Tvar dutiny byl stanoven dle typu 1A zkušebního tělesa, které je preferováno pro přímo tvářená tělesa jako je právě vstřikování, ale také lisování a další. Rozměry jsou znázorněny na Obrázek 30 a v Tabulka 4.

Tabulka 4 – Rozměry zkušebního tělesa typu 1A [38]

| Ozn.  | Název                                     | Rozměr [mm]    |
|-------|---|----------------|
| $l_3$ | Celková délka                             | $\geq 150$     |
| $l_2$ | Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi | 104 až 113     |
| $l_1$ | Délka zúžené rovnoběžné části             | $80 \pm 2$     |
| $r$   | Poloměr                                   | 20 až 25       |
| $b_2$ | Šířka konců                               | $20,0 \pm 0,2$ |
| $b_1$ | Šířka zúžené rovnoběžné části             | $10,0 \pm 0,2$ |
| $h$   | Doporučená tloušťka                       | $4,0 \pm 0,2$  |
| $L_0$ | Počáteční měřená délka                    | $50,0 \pm 0,5$ |
| $L$   | Počáteční vzdálenost čelisti              | $115 \pm 1$    |

Reálný model zkušebního tělesa byl změřen ze vystříknutého dílu a poté zkonstruován pomocí softwaru NX 12.0. Z modelu byl dále vytvořen výkres se zakótovanými rozměry (Obrázek 31) a export STL formátu pro 3D tisk.



Obrázek 31 – Reálné rozměry zkušebního tělesa

#### 4.4.1 Vzorky vyrobené metodou vstřikování

K výrobě vzorků metodou vstřikování byl použit horizontální vstřikolis BOY 35 E (č. 65012) s dvoudeskovým uzavíracím systémem a maximální uzavírací silou 350kN. Vstřikolis na Obrázek 32 je vhodný pro zpracovávání termoplastů, elastomerů, silikonů, PVC a termosetů. Světlý rozměr mezi sloupky je 280 x 254 mm a dokáže vyrábět vylisky o objemu až 76 cm<sup>3</sup>.

[39]



Obrázek 32 – Vstřikolis BOY 35 E a vstřikovací forma

Na vstřikolis byla nasazena dvojnásobná vstřikovací forma se studeným vtokem od firmy PLASTCOMPANY s.r.o. s objemem dutiny 26,6 cm<sup>3</sup> a hmotností 86 kg (Obrázek 32). Dále proběhlo ohřátí hydraulického oleje, čímž byl stroj připraven a provedlo se prvních pět zkušebních vylisků. Po jejich posouzení a určení dobré jakosti vylisku bylo vyrobeno další deset vzorků s těmito vstřikovacími parametry:

- Teploty na šneku:  $t_1= 200\text{ °C}$ ;  $t_2= 220\text{ °C}$ ;  $t_3= 224\text{ °C}$ ;  $t_4= 220\text{ °C}$ ;  $t_5= 230\text{ °C}$
- Uzavírací síla: 303 kN
- Max. plnicí tlak: 90 bar

Po ukončení vstřikování byla forma otevřena a nastříkána separátorem a antikoročním přípravkem. Posledním krokem bylo odříznutí studeného vtoku od vylisků odlamovacím nožem. Zkušební těleso metodou vstřikování je zobrazeno na Obrázek 33 vpravo.



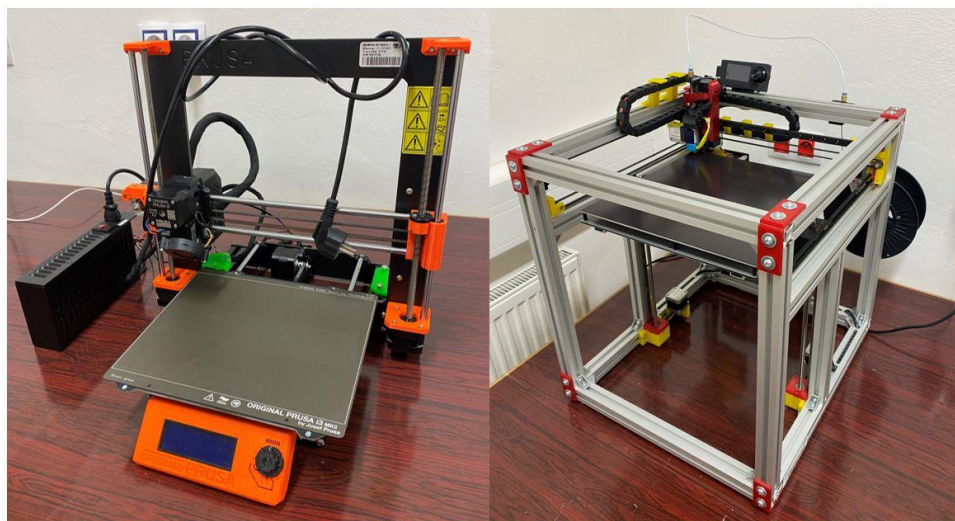
*Obrázek 33 – Vzorky vyrobené metodou vstřikování*

#### **4.4.2 Vzorky vyrobené metodou 3D Tisku**

Model ve formátu STL byl nahrán do softwaru PrusaSlicer 2.4.0, pomocí kterého byly nastaveny parametry tisku. Následně byl vygenerován program ve formátu .gcode , který byl dále nahrán pomocí paměťové karty do 3D tiskáren. Byly použity tiskárny Prusa i3 MK3S+ a Rebelix (Obrázek 34). V obou případech se jednalo o tiskárny české výroby patřící do střední (hobby) kategorie, které nedosahují takových přesností a jakostních parametrů jako tiskárny profesionální, ale vynikají přívětivou cenou a dostupností . Jsou vhodné pro tisknutí materiálů

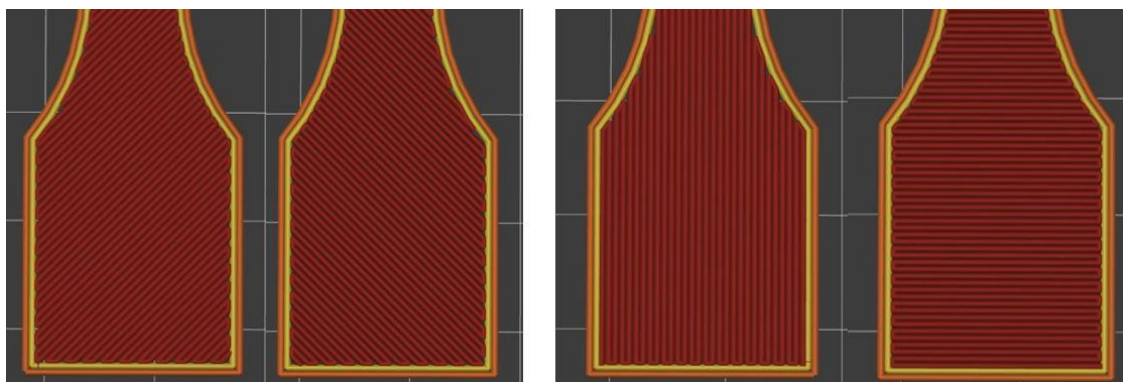


jako PLA, ABS, PETG a další s průměrem filamentu 1,75 mm a výškou vrstvy od 0,05 až 0,35 mm.



Obrázek 34 – tiskárna Prusa i3 MK3S+ (vlevo) a tiskárna Rebelix (vpravo)

Pro vzorky byly zvoleny dvě varianty orientace tisku. První přímočará výplň střídavě pod 45 ° a 100% výplní (vlevo) a druhá varianta přímočará výplň střídavě pod 90 ° a 100% výplní (vpravo) na Obrázek 35. Pro představu to znamená, že u varianty vlevo byla první vrstva tištěna pod úhlem 45 °, další vrstva pod -45 ° a takto stále dokola až do vytištění celého vzorku.

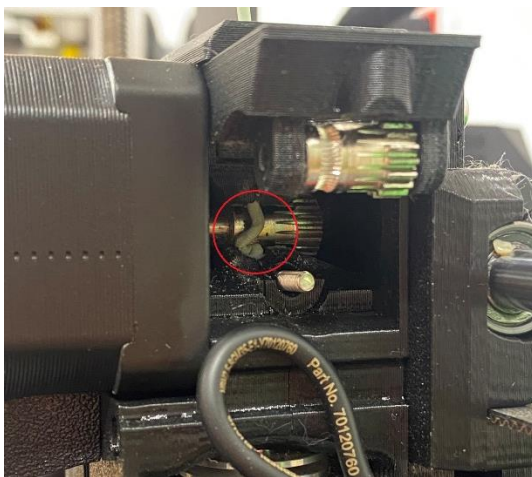


Obrázek 35 – Orientace tisku 45 ° (vlevo) a 90 ° (vpravo)

První vzorky byly tištěny na tiskárně Prusa i3 MK3S+ s tryskou 0,4 mm a parametry:

- Teploty trysky: 220 až 275 °C
- Teploty podložky: 90 °C + lepicí páska
- Výška vrstvy: 0,2 mm
- Výplň: 100% (45 ° a 90 °)

I přes zkoušení různých nastavení teploty trysky od 220 až do 275 °C, teploty podložky, rychlosti tisku i průtoku se nepodařilo materiál LDPE ani LLDPE vytisknout pomocí tiskárny Prusa i3 MK3S+ a trysky 0,4 mm. Během tisku docházelo při navádění filamentu do trysky k jeho kumulaci na podávacích kolečkách (Obrázek 36) a tisk byl vždy po nějaké době přerušen.



*Obrázek 36 – Kumulace filamentu na podávacích kolečkách*

Jako druhá volba byla zvolena tiskárna Rebelix s tryskou 0,6 mm na které byly postupně optimalizovány tiskové parametry. Jako nejlepší vyšly tyto parametry:

- Teploty trysky: 265 °C
- Teploty podložky: 90 °C + lepicí páska
- Výška vrstvy: 0,25 mm
- Výplň: 100% (45 ° a 90 °)
- Povrch podložky: hladká



*Obrázek 37 – Vzorok z LLDPE vyrobené metódou 3D tisku*

Za dodržení těchto podmínek byl vytištěn první vzorek bez chyby tisku. Po kontrole byl ale vzorek na celkové délce kratší o 2 %, a z tohoto důvodu byl model upraven o velikost smrštění na  $l_3 = 155$  mm. Softwarově prodloužených vzorků bylo vytištěno celkem sedm kusů z LLDPE pod úhlem  $45^\circ$  a sedm pod úhlem  $90^\circ$  (Obrázek 37).

Při tisku materiálu LDPE neboli nízkohustotního Polyetylénu nastával během tisku problém se spojením jednotlivých vláken a při postupném chladnutí docházelo k odtrhávání výplně od obrysu zkušebního tělesa viz Obrázek 38. To bylo způsobeno špatnou přilnavostí a velkým smrštěním, kterým LDPE disponuje. [40]



Obrázek 38 – Vzorek z LDPE vyrobené metodou 3D tisku

Použité parametry tisku:

- Teploty trysky: 220 až 280 °C
- Teploty podložky: 50 až 90 °C + lepicí páska
- Výška vrstvy: 0,2 a 0,25 mm
- Výplň: 100% ( $45^\circ$  a  $90^\circ$ )
- Povrch podložky: hladká, zrnitá

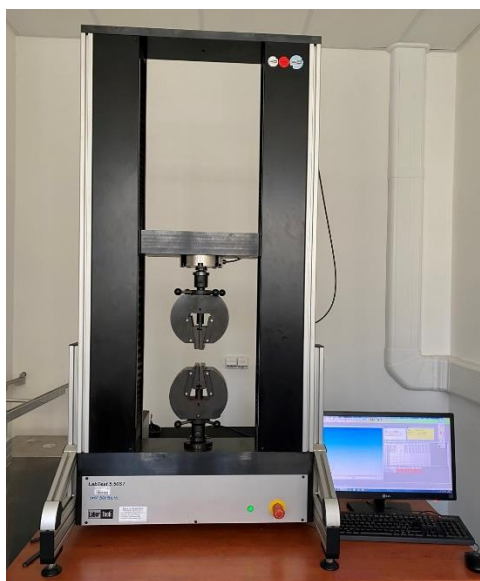
I přes všechny provedené optimalizace parametrů tisku se nepodařilo pro čistý materiál tento problém vyřešit, a proto byly z LDPE pro výzkum použity jen na vzorky vyrobené metodou vstřikováním.

## 4.5 Analýza mechanických vlastností

Pro zjištění mechanických vlastností byla použita zkouška tahem a zkouška tvrdosti vtláčením kuličky. Obě zkoušky byly provedeny v laboratoři ČZU – laboratoř mechanických zkoušek Katedry materiálu a strojírenské technologie.

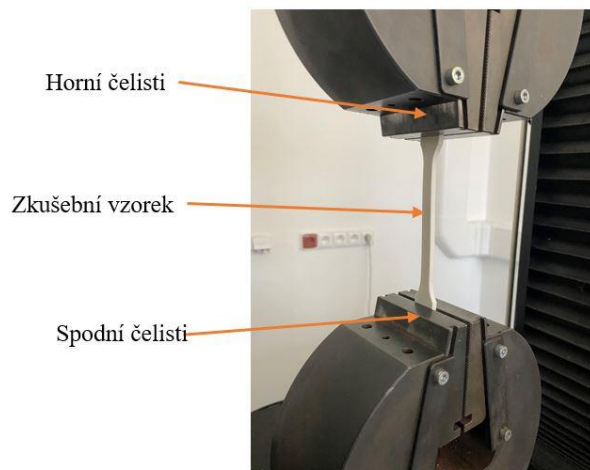
### 4.5.1 Zkouška tahem

Tahová zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 527-2 na zařízení LabTest 5.50ST (E. č. 9609413) viz Obrázek 39. Jedná se o univerzální stroj pro tahové a tlakové zkoušky, který je připojen k počítači. Pomocí počítače a softwaru Test & Motion jsme nastavili výchozí parametry pro průběh zkoušky (rychlost zatěžování, vzdálenost čelistí, rozměry vzorku) Dále nám počítač sloužil jako sběrnice dat k vyhodnocení průběhu zkoušky.



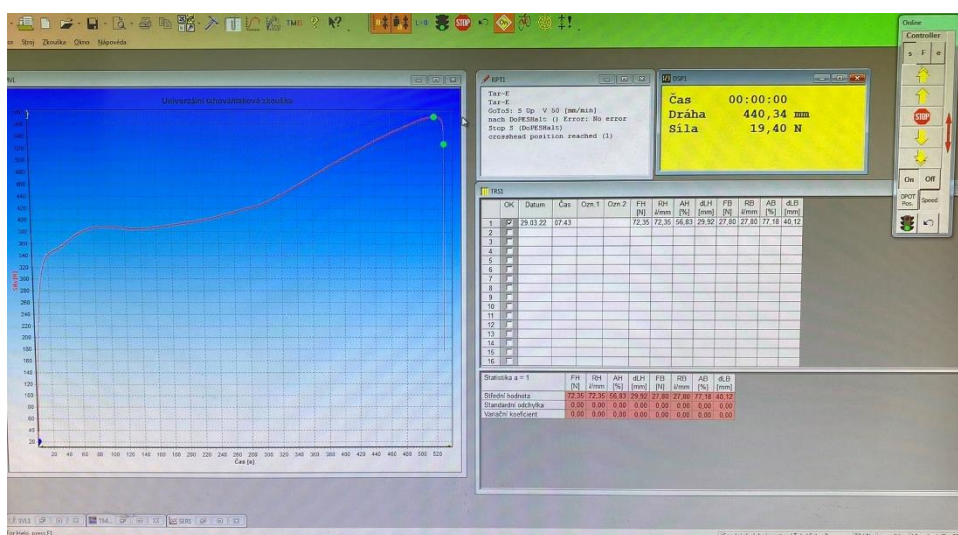
*Obrázek 39 – Univerzální stroj pro tahové a tlakové zkoušky LabTest 5.50ST*

Nejprve byla nastavena vzdálenost čelistí na 115 mm. Zkušební vzorek byl upnut do horních čelistí a následně do spodních, tak aby se ve spodních čelistech vzorek nekřížil a zároveň byl upnut rovnoběžně (Obrázek 40). Čelisti byly dále patřičně dotaženy. Přidržovací čelisti mají na vnitřních přidržovacích plochách drážkování, aby došlo k zakousnutí čelistí do zkušební vzorku a zamezilo se vyklouznutí během zatěžování.



Obrázek 40 – Upínací část stroje LabTest 5.50ST

V dalším kroku byla spuštěna tahová zkouška a materiál se začal natahovat rychlostí 10 mm za minutu. Průběh zkoušky byl graficky vyhodnocován v levé části obrazovky viz Obrázek 41. V pravé části byly zobrazeny hodnoty zatěžující síly, prodloužení a další. V ideálním případě končí zkouška přetržením vzorku, avšak pro vysokou tažnost nízkohustotního polyetylénu se při této rychlosti materiál prodlužoval konstantně a zkouška byla po 6 minutách ukončena. Naměřená data byla exportována do Excelu k následnému statistickému vyhodnocení. Celý proces se takto opakoval vždy pro pět vzorků od každého typu.



Obrázek 41 – Rozhraní softwaru Test & Motion

Po nepřetržení vzorků byla upravena rychlost na 50 mm za minutu a bylo provedeno zkušební měření na vstřikovaném vzorku LLDPE, který byl navíc. Jelikož při této rychlosti došlo

k přetržení byla vyrobena další sada vzorků, která byla testována s tahovou rychlostí 50 mm za minutu.

## 4.5.2 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti byla provedena metodou vtlačení kuličky dle normy ČSN EN ISO 527-1 na tvrdoměru DuraJet G5 (E. č. 09610344) zobrazeného na Obrázek 42. Jedná se o univerzální tvrdoměr, kterým lze měřit metodami podle Rockwella, Brinella i Vickerse se zatížením od 9,8 N do 2450 N.



Obrázek 42 – Univerzální tvrdoměr DuraJet G5

Na tvrdoměru byla nejprve zvolena metoda zkoušky vtlačení kuličky a zkušební zatížení 49 N. Zkušební vzorek byl umístěn na podložku a aplikovalo se počáteční zatížení 9,8 N. Dále bylo plynule bez rázu vyvoláno zkušební zatížení 49 N po dobu 2-3 s a poté byla zkouška ukončena. Hodnota tvrdosti materiálu se objevila na displeji tvrdoměru a zkouška se opakovala celkem pro deset měření.

## 4.6 Mikroskopie lomové plochy pomocí SEM

U přetrženého vzorku z LLDPE metodou vstřikování byla zkoumána lomová plocha pomocí skenovacího elektronového mikroskopu. Jelikož se jedná o nevodivý materiál bylo třeba před měřením nanést vrstvu vodivého materiálu. Roztržené konce vzorku byly uříznuty, očištěny a odmaštěny. Poté byly vzorky nalepeny na hliníkový terčik a připraveny pro nanesení vodivé vrstvy. K oblepování vzorků byla použita uhlíková páska, z důvodu její vodivosti.



Obrázek 43 – Naprašovačka kovů Quorum Q150R ES (vlevo) a vzorek č.1 (vpravo)

Nanesení vrstvy zlata bylo provedeno pomocí naprašovačky kovů Quorum Q150R ES (Obrázek 43) s použitím argonu, jakožto inertního média a parametrů:

- Materiál: Zlato
- Rozprašovací čas: 60 s
- Rozprašovací proud: 20 mA
- Nástrojový faktor: 1,00
- Rotace podstavce: Ano (rychlost 60)
- Čas ventilace: 70 s

Pozlacené vzorky na hliníkových terčících byly umístěny na rotační podstavec a byly zasunuty do komory skenovacího elektronového mikroskopu TESCAN MIRA3, který je zobrazen na Obrázek 44.



*Obrázek 44 – SEM TESCANA MIRA3*

Po uzavření komory byl odveden vzduch a vytvořeno vakuum. Poté bylo odladěno základní nastavení a rozlišení kvality snímaného obrazu (roztření, světlost atd.). Při pořizování snímků byly použity dva druhy přiblížení:

- Přiblížení 1: zvětšení 1000x, napětí 10 kV
- Přiblížení 2: zvětšení 500x, napětí 10 kV

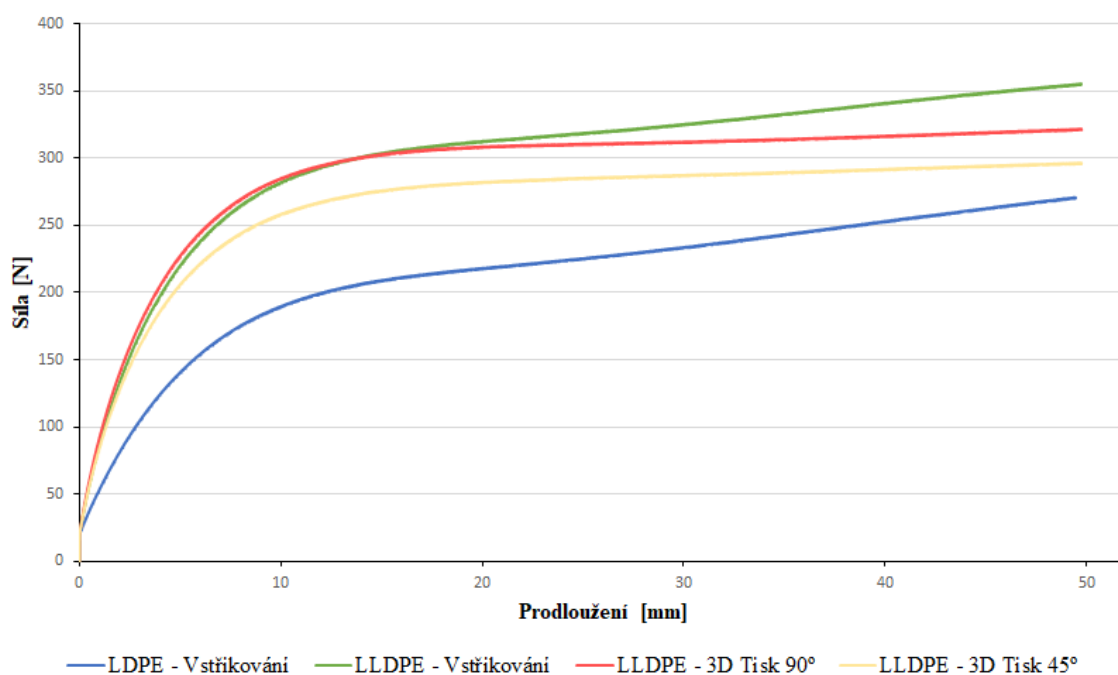


## 5 VÝSLEDKY A DISKUSE

Tato kapitola se zabývá zpracováním a vyhodnocením naměřených dat získanými z provedených zkoušek. Data byla zpracována v softwaru Microsoft Excel a vyhodnocena samostatně podle zkoušky a druhu materiálu. Následně bylo provedeno jejich vyhodnocení.

### 5.1 Vyhodnocení zkoušky tahem

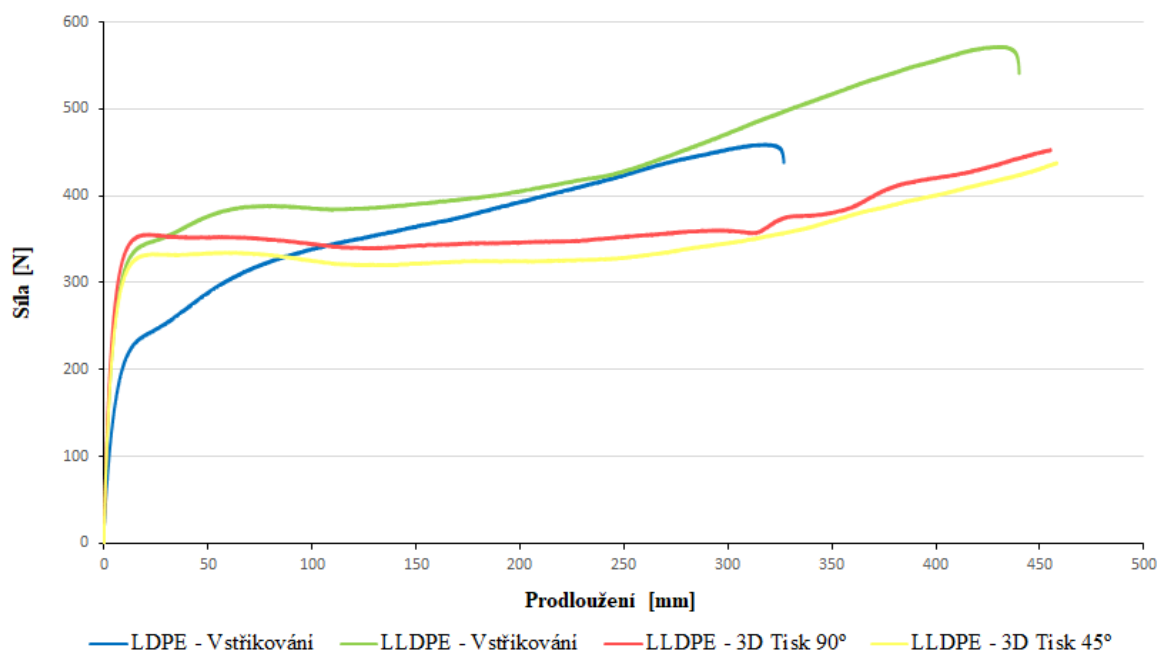
Naměřená data, která byla získána provedením tahové zkoušky při použití tahové rychlosti 10 mm/min nebyla v souladu s normou ČSN EN ISO 527-2, jelikož nedošlo k přetržení vzorků. Při této rychlosti materiál dodržoval po překonání meze kluzu lineární nárůst síly vůči prodloužení a zkouška byla po 6 minutách ukončena z důvodu zvolení nevhodné tahové rychlosti. Přestože výsledky tohoto měření nebyly zcela relevantní z Obrázek 45 je patrné, že pro stejné prodloužení je u LDPE potřebné vyvinout o třetinu menší zatěžující sílu než u LLDPE.



Obrázek 45 – Tahový diagram (10 mm/min)

U vzorků vyrobených metodou 3D tisku vychází lepší tahová pevnost vzorku s orientací vláken pod 90°, a to díky rovnoběžnému směru vláken ke směru zatěžující síly.

Druhá sada vyrobených vzorků byla zatěžována rychlostí 50 mm/min. Při zatěžování vzorků vyrobených vstřikováním bylo dosaženo přetržení materiálů. Naopak u tištěných vzorků byla zkouška ukončena dosažením výšky dorazů, aniž by byla zkušební tělesa přetržena.



Obrázek 46 – Tahový diagram (50 mm/min)

Z Obrázek 46 je zřejmé, že největší tahovou pevností disponují vzorky vyrobené metodou vstřikování plastů z materiálu LLDPE. U tištěných vzorků nelze plnohodnotně posoudit, zda by jejich mez pevnosti dosáhla vyšší hodnoty než u materiálu LDPE, jelikož nedošlo k přetržení. Můžeme však říci, že jejich tažnost je větší než u vstřikovaných vzorků, což je dáno orientací vláken, které jsou rovnoběžné nebo pod úhlem 45° se zatěžující silou. Nejmenší tažnost byla naměřena u vzorků z LDPE.

Materiály LDPE i LLDPE zpracované metodou vstřikování se do překonání meze kluzu chovají téměř identicky, pouze s rozdílem hodnoty meze kluzu, která je u LLDPE cca o 30% vyšší. Po jejím překonání dochází u LDPE postupně k lineárnímu nárůstu síly vůči prodloužení až do přetržení vzorku. U LLDPE je však po překonání meze kluzu nárůst síly i prodloužení přibližně do 75 mm, kdy dochází k prodlužování i přes klesající zatěžující sílu vlivem vzniku krčku. Poté při prodloužení okolo 120 mm začíná síla parabolicky narůstat až do přetržení.

U tištěných vzorků je průběh tahové zkoušky téměř stejný. Mez kluzu je u orientace 45° asi o 5 % nižší než u orientace 90°. Po jejím překonání nastává dlouhá fáze nárůstu prodloužení, zatímco zatěžující síla je konstantní a její nárůst začíná až na hodnotě prodloužení okolo 250 mm. Zatímco křivka je u orientace 45° téměř hladká, u orientace 90° se objevují mírné propady zatěžující síly. To může být způsobeno postupným narušováním vrstev, které jsou tištěny kolmo ke směru zatěžující síly. Jelikož nedošlo u těchto dvou vzorků k přetržení nelze stanovit hodnoty meze pevnosti a tažnosti.

### 5.1.1 Vyhodnocení meze pevnosti

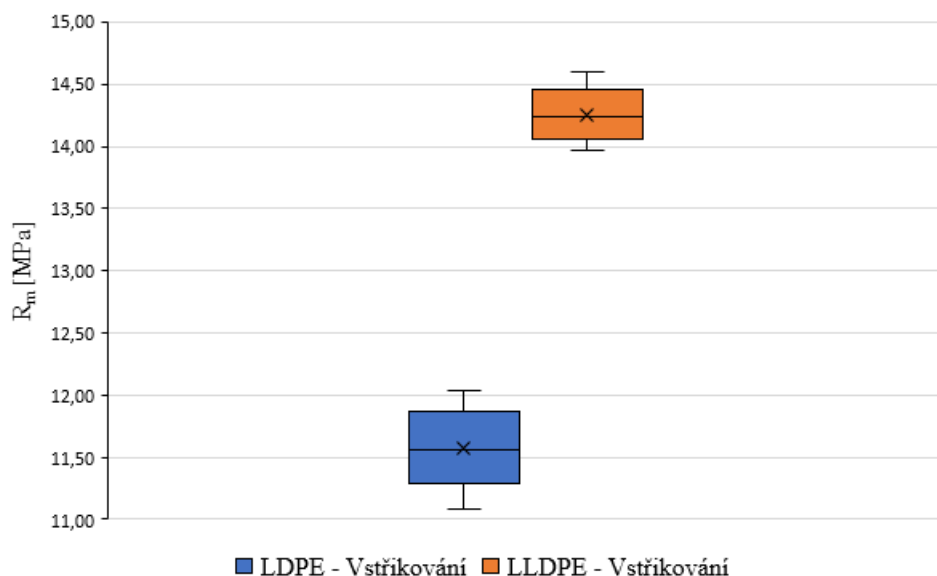
Mez pevnosti určena aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou byla vypočítána u jednotlivých vzorků polyetylénu takto:

- LDPE – Vstřikování:  $R_m = 11,58 \pm 0,31$  MPa
- LLDPE – Vstřikování:  $R_m = 14,25 \pm 0,21$  MPa
- LLDPE – 3D Tisk 90°:  $R_m > 11,33$  MPa
- LLDPE – 3D Tisk 45°:  $R_m > 10,97$  MPa

*Tabulka 5 – Statistické vyhodnocení meze pevnosti*

| Parametry           | LDPE<br>Vstřikování<br>[MPa] | LLDPE<br>Vstřikování<br>[MPa] | LLDPE<br>3D Tisk 90°<br>[MPa] | LLDPE<br>3D Tisk 45°<br>[MPa] |
|---------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Průměr              | 11,58                        | 14,25                         | 11,34                         | 10,97                         |
| Minimum             | 11,09                        | 13,98                         | -                             | -                             |
| Maximum             | 12,04                        | 14,60                         | -                             | -                             |
| Směrodatná odchylka | 0,31                         | 0,21                          | -                             | -                             |
| Rozptyl             | 0,09                         | 0,04                          | -                             | -                             |
| Medián              | 11,56                        | 14,24                         | -                             | -                             |
| Horní kvartil       | 11,29                        | 14,06                         | -                             | -                             |
| Dolní kvartil       | 11,87                        | 14,45                         | -                             | -                             |

Statistické vyhodnocení meze pevnosti, ve kterém jsou data zaokrouhlena na více desetinných míst se nalézá v Tabulka 5. Pro vzorky vyrobené metodu 3D tisku bylo použito pouze statistického vyhodnocení aritmetickým průměrem, jelikož nedošlo k přetržení a nebyla stanovena hodnota maximální zatěžující síly. Grafické porovnání meze pevnosti je na Obrázek 47.



Obrázek 47 – Mez pevnosti vzorků z LDPE a LLDPE

## 5.1.2 Vyhodnocení tažnosti

Tažnost jednotlivých vzorků byla vyhodnocena přímo v programu Test & Motion během zkoušky jako procentuální prodloužení AB.

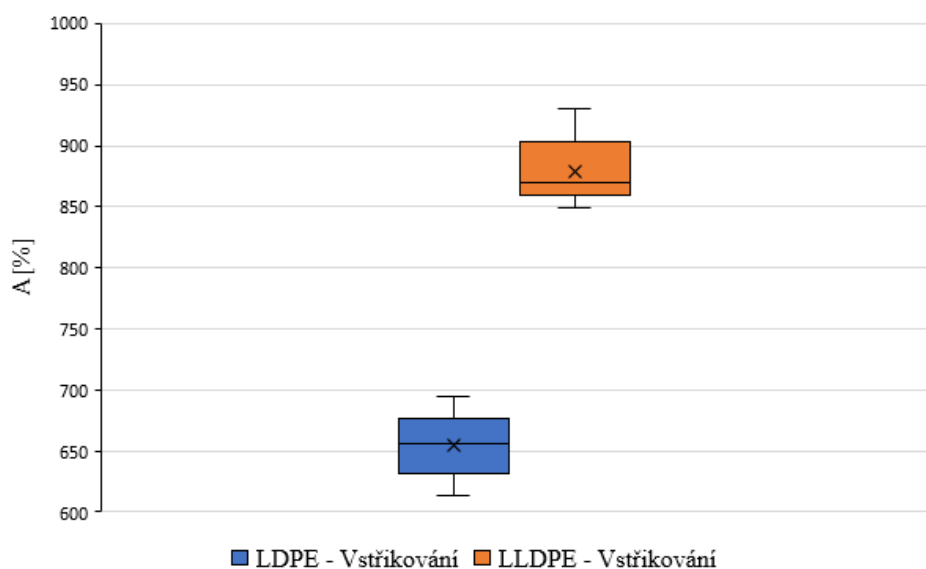
Tažnost určena aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou byla naměřena u jednotlivých vzorků polyetylenu takto:

- LDPE – Vstřikování:  $A = 654 \pm 26 \%$
- LLDPE – Vstřikování:  $A = 880 \pm 27 \%$
- LLDPE – 3D Tisk 90°:  $A > 906 \%$
- LLDPE – 3D Tisk 45°:  $A > 909 \%$

Tabulka 6 – Statistické vyhodnocení tažnosti

| Parametry           | LDPE<br>Vstřikování<br>[%] | LLDPE<br>Vstřikování<br>[%] | LLDPE<br>3D Tisk 90°<br>[%] | LLDPE<br>3D Tisk 45°<br>[%] |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Průměr              | 654,11                     | 880,1                       | 905,55                      | 908,66                      |
| Minimum             | 613,57                     | 849,62                      | -                           | -                           |
| Maximum             | 694,52                     | 930,12                      | -                           | -                           |
| Směrodatná odchylka | 25,79                      | 27,09                       | -                           | -                           |
| Rozptyl             | 665,34                     | 734,00                      | -                           | -                           |
| Medián              | 655,55                     | 870,16                      | -                           | -                           |
| Horní kvartil       | 631,09                     | 859,02                      | -                           | -                           |
| Dolní kvartil       | 676,43                     | 903,65                      | -                           | -                           |

Statistické vyhodnocení tažnosti je Tabulka 6. Jako u meze pevnosti bylo použito pro vzorky vyrobené metodu 3D tisku pouze statistického vyhodnocení aritmetickým průměrem, jelikož nedošlo k přetržení a nebylo stanoveno maximální prodloužení. Grafické porovnání tažnosti je zobrazeno na Obrázek 48.



Obrázek 48 – Tažnost vzorků z LDPE a LLDPE

## 5.2 Vyhodnocení SEM

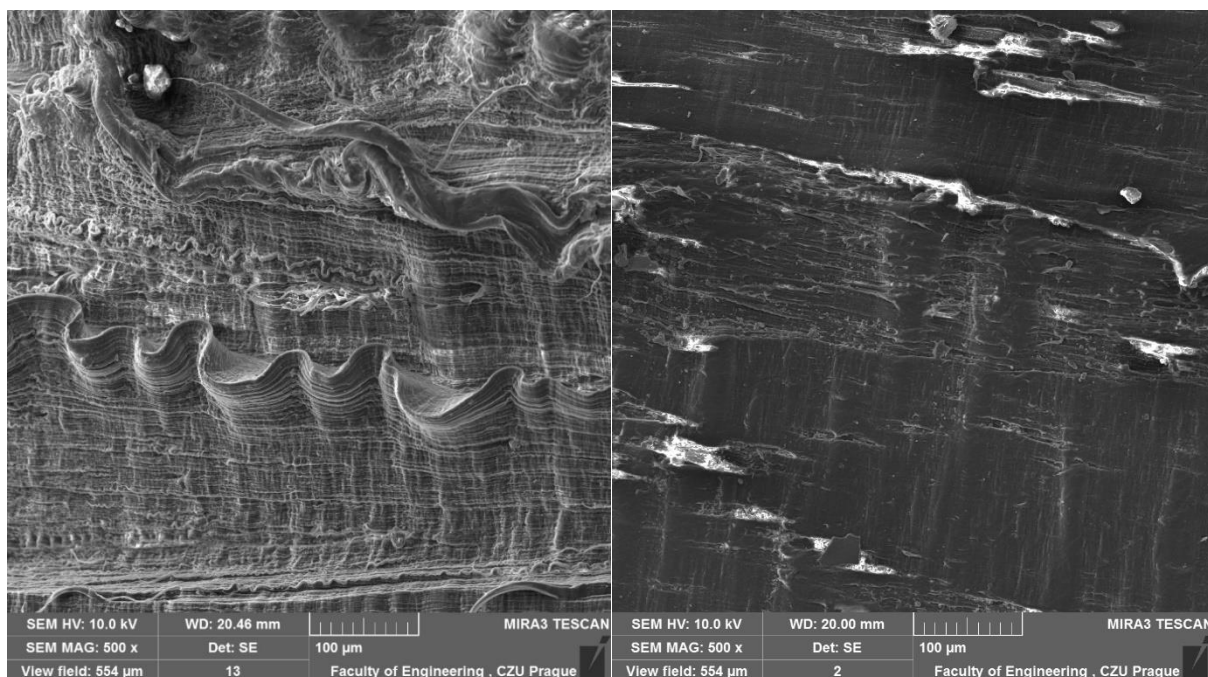
K mikroskopii lomové plochy byl použit jen vzorek z LLDPE vyrobený metodou vstřikování, jelikož ostatní vzorky byly přetrženy až z druhé sady vzorků pro tahovou zkoušku.

Snímky pořízené elektronovým mikroskopem zobrazují lomovou plochu s použitým zvětšením 150x, 500x a 1000x. Semikrystalické termoplastické polymery vykazují zvláštní chování při jednoosých tahových zkouškách. Po dosažení počáteční meze kluzu dochází k lokálnímu zúžení následovanému tažením za studena. Šíření krčku je způsobeno krystalickými bloky i řetězci, které se orientují ve směru zatěžující síly. Materiál s velkou tažností (LLDPE až 1000 %) se natahuje až do vytvoření krčku v celém průřezu. V momentě přetržení se vlákna opět smrští opačným směrem, což je zobrazeno na Obrázek 49.



Obrázek 49 – Přetržené vlákno

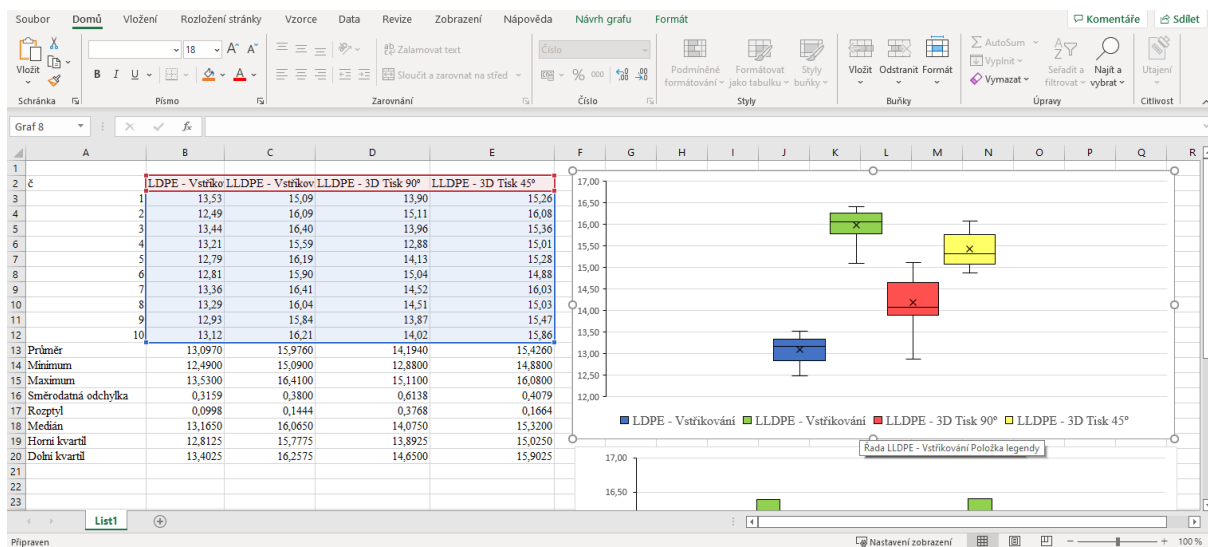
Při detailnějším zobrazení na Obrázek 50 je vidět homogenní struktura bez velkých pórů, díky vysokému tlaku a teplotě během plastikační fáze taveniny. Zatímco u vzorků vyrobených 3D tiskem, jsou trhliny a nedokonalé spojení jednotlivých vláken viditelné pouhým okem. Na levém snímku je viditelná rovnoběžnost vláken ve směru orientace zatěžující síly. Světlé částice, které se objevují na obou snímcích jsou nečistoty, které se usadily na lomové ploše.



Obrázek 50 – Lomová plocha vzorku LLDPE vyrobeného metodou vstřikování

### 5.3 Vyhodnocení tvrdosti vtláčením kuličky

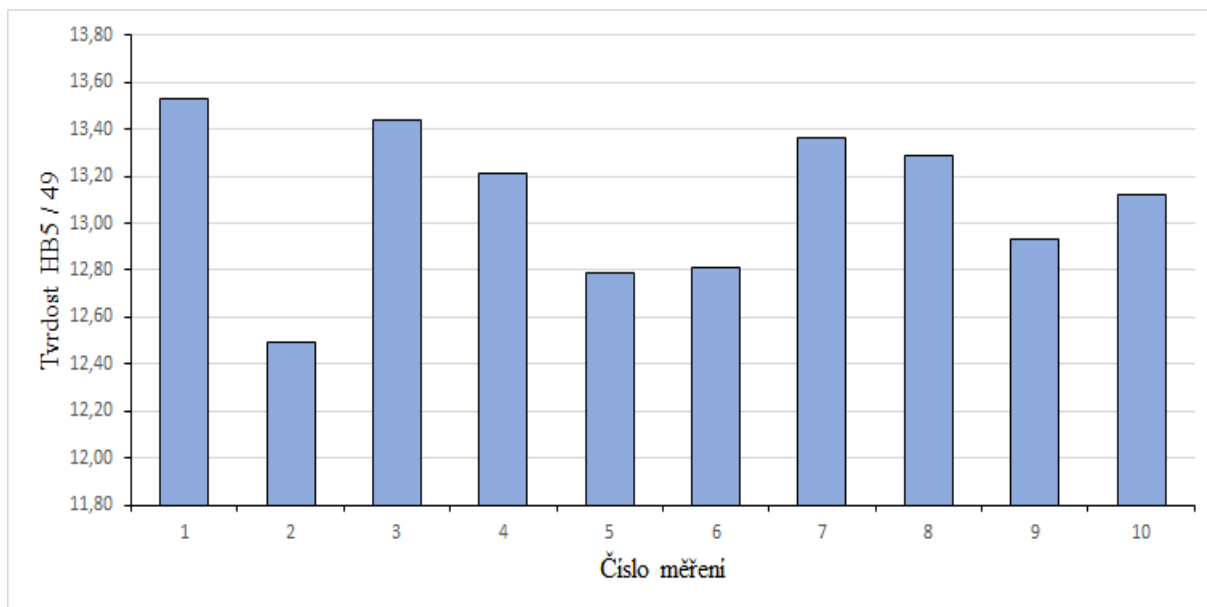
Měření tvrdosti vtláčením kuličky bylo provedeno na dvou zkušebních vzorcích od každého typu vzorků. Na každém vzorku bylo provedeno celkem pět vtisků s dodržáním minimálních vzdáleností jednotlivých vtisků podle normy ČSN EN ISO 2039-1, celkem tedy deset naměřených hodnot tvrdosti pro každý typ vzorku. Naměřené hodnoty byly zpracovány v softwaru Microsoft Excel (Obrázek 51) jak graficky, tak početně.



Obrázek 51 – Rozhraní softwaru Microsoft Excel

### 5.3.1 Vzorky z LDPE vyrobené metodou vstřikování

Prvním testovaným vzorek byl z nízkohustotního polyetylénu (LDPE), který byl vyroben metodou vstřikování. Data naměřena tvrdoměrem byla zpracována pomocí softwaru Microsoft Excel a jeho statistických funkcí v souladu s normou ČSN EN ISO 2039-1.



Obrázek 52 – Tvrdość vzorků z LDPE (vstřikování)

Z celkem deseti měření na Obrázek 52 vyplývá, že tvrdość určena aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou je u nízkohustotního polyetylénu zpracovaného metodou vstřikování  $13,1 \pm 0,32$  HB5 / 49. Statistické vyhodnocení zkoušky se nalézá v Tabulka 7.

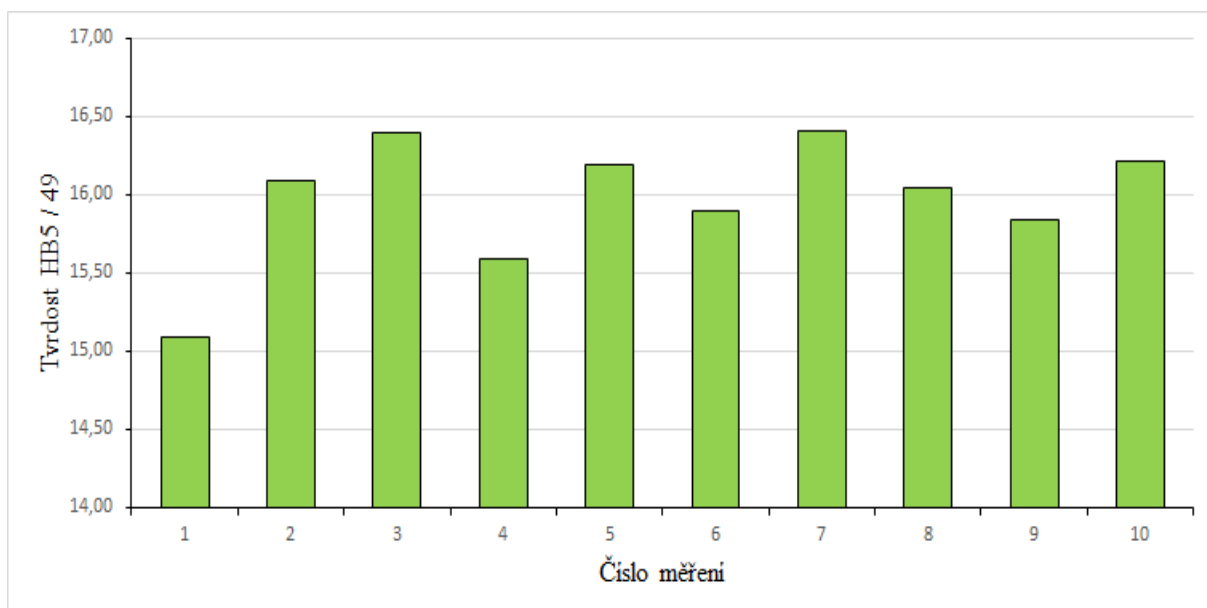
Tabulka 7 – Statistické vyhodnocení tvrdości vzorků LDPE (vstřikování)

| Parametry           | Hodnota [-] |
|---------------------|-------------|
| Průměr              | 13,10       |
| Minimum             | 12,49       |
| Maximum             | 13,53       |
| Směrodatná odchylka | 0,32        |
| Rozptyl             | 0,10        |
| Medián              | 13,17       |
| Horní kvartil       | 12,81       |
| Dolní kvartil       | 13,40       |



### 5.3.2 Vzorky z LLDPE vyrobené metodou vstřikování

Druhým měřeným typem byl lineární nízkohustotní polyetylen (LLDPE). Výsledky jednotlivých měření jsou zobrazeny na Obrázek 53. Rozdílné hodnoty jednotlivých tvrdostí byly způsobené houževnatostí materiálu, jelikož během některých měření docházelo k hlubším vtiskům než 0,35 mm i přes použití minimální síly 49 N.



Obrázek 53 – Tvrdość vzorků z LLDPE (vstřikování)

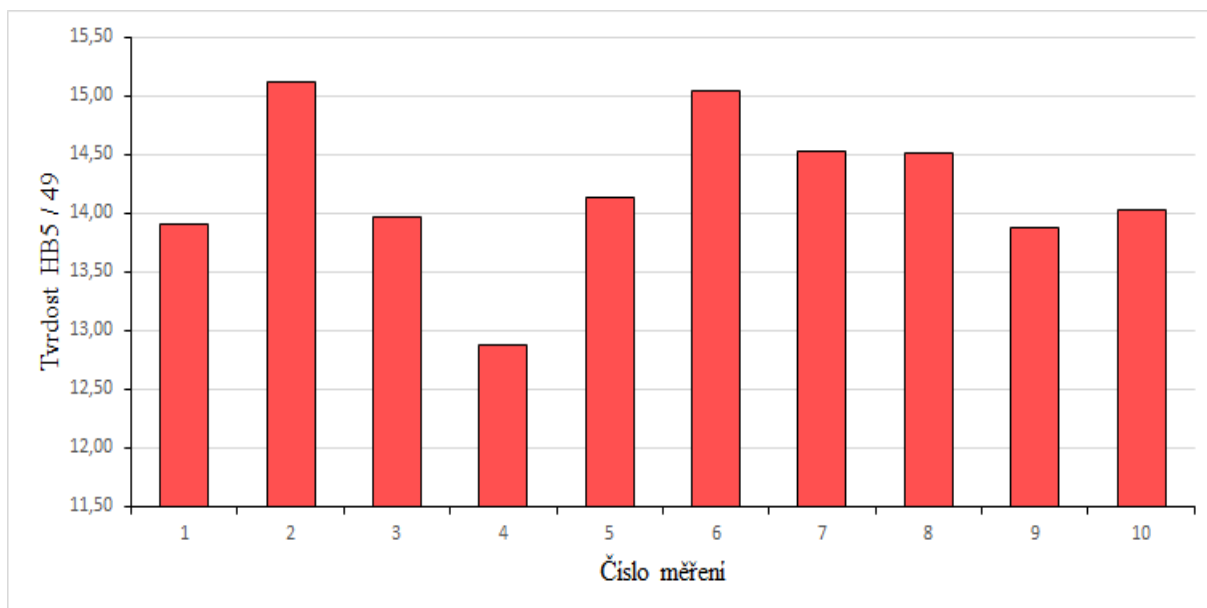
Tvrdość lineárního nízkohustotního polyetylenu zpracovaného metodou vstřikování byla naměřena  $15,98 \pm 0,38$  HB5 / 49. Statistické vyhodnocení zkoušky, ve kterém jsou data zaokrouhlena se nalézá v Tabulka 8.

Tabulka 8 – Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků LLDPE (vstřikování)

| Parametry           | Hodnota [-] |
|---------------------|-------------|
| Průměr              | 15,98       |
| Minimum             | 15,09       |
| Maximum             | 16,41       |
| Směrodatná odchylka | 0,38        |
| Rozptyl             | 0,14        |
| Medián              | 16,07       |
| Horní kvartil       | 15,78       |
| Dolní kvartil       | 16,26       |

### 5.3.3 Vzorky z LLDPE vyrobené metodou 3D Tisku s orientací 90°

Dalším typem vzorku byl lineární nízkohustotní polyetylén (LLDPE) zpracovaný metodou 3D tisku s orientací 90°. U tištěných vzorků byla tvrdost měřena na hladké straně, kde nebyly povrchové vady vzniklé nedokonalým tiskem. I přesto mohli být jednotlivé měření ovlivněny nedokonalou strukturou, v důsledku špatné přilnavosti vláken. Na Obrázek 54 jsou zobrazeny výsledky měření s minimální hodnotou 12,88 a maximální 15,11.



Obrázek 54 – Tvrdost vzorků z LLDPE (3D Tisk 90°)

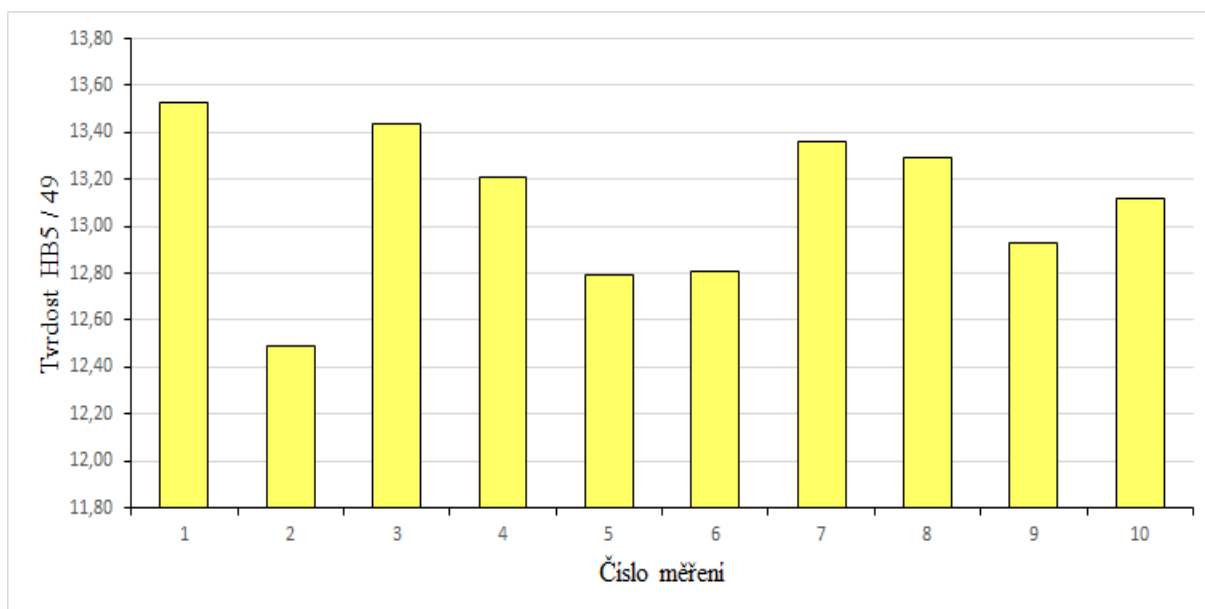
Tvrdost určena aritmetickým průměrem a směrodatnou odchylkou je u lineárního nízkohustotního polyetylénu zpracovaného metodou 3D tisku s orientací 90°  $14,19 \pm 0,61$  HB5 / 49. Hodnoty vyhodnocené statistickými funkcemi Microsoft Excel jsou v Tabulka 9.

Tabulka 9 – Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků LLDPE (3D Tisk 90°)

| Parametry           | Hodnota [-] |
|---------------------|-------------|
| Průměr              | 14,19       |
| Minimum             | 12,88       |
| Maximum             | 15,11       |
| Směrodatná odchylka | 0,61        |
| Rozptyl             | 0,38        |
| Medián              | 14,08       |
| Horní kvartil       | 13,89       |
| Dolní kvartil       | 14,65       |

### 5.3.4 Vzorky z LLDPE vyrobené metodou 3D Tisku s orientací 45°

Posledním typem vzorku byl lineární nízkohustotní polyetylén (LLDPE) zpracovaný metodou 3D tisku s orientací 45°.



Obrázek 55 – Tvrdość vzorků z LLDPE (3D Tisk 45°)

Z deseti měření, které jsou zaznamenány na Obrázek 55, byla vypočtena tvrdość pomocí aritmetického průměru a směrodatné odchyľky. Ta vyšla u lineárního nízkohustotního polyetylénu zpracovaného metodou 3D tisku s orientací 45°  $14,43 \pm 0,41$  HB5 / 49. Statistické vyhodnocení zkoušky se nalézá v Tabulka 10.

Tabulka 10 – Statistické vyhodnocení tvrdości vzorků LLDPE (3D Tisk 45°)

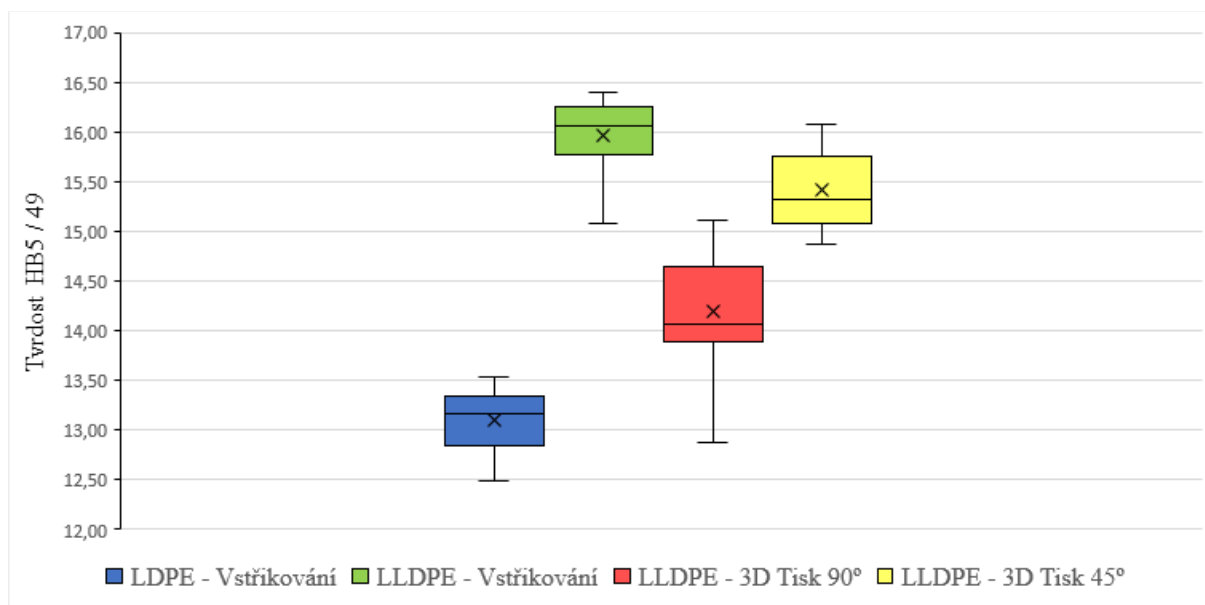
| Parametry           | Hodnota [-] |
|---------------------|-------------|
| Průměr              | 15,43       |
| Minimum             | 14,88       |
| Maximum             | 16,08       |
| Směrodatná odchyľka | 0,44        |
| Rozptyl             | 0,17        |
| Medián              | 15,32       |
| Horní kvartil       | 15,03       |
| Dolní kvartil       | 15,90       |

### 5.3.5 Porovnání naměřených hodnot

Na Obrázek 56 byly zaznamenány naměřené hodnoty tvrdosti vtláčením kuličky vyhodnocené statistickými funkcemi. Díky tomu byla určena hodnota horního a dolního kvartilu, mediánu, směrodatné odchylky, rozptylu, minima a maxima.

Z grafu je zřejmé, že LDPE má ze všech testovaných vzorků nejmenší tvrdost, což je dáno mírou krystalinity, která je u LLDPE až o 50 % vyšší. Díky tomu má lineární nízkohustotní polyetylén lepší tahovou pevnost, rázovou odolnost, elasticitu a další. V porovnání LLDPE podle způsobu zpracování vyháží nejlépe vstříkování, dále 3D tisk s orientací vláken 90°, a nakonec 3D tisk s orientací vláken 45°. Nižší hodnoty tvrdosti tištěných věcí jsou dány pravděpodobně nedokonalým spojováním jednotlivých vrstev a vláken tisku k sobě v důsledku horší přilnavosti materiálů. Zatímco u vstříkování byla struktura díky působení vysokého tlaku zcela homogenní, tak u 3D tisku byly vidět dutiny a staženiny mezi jednotlivými vrstvami.

Právě u vzorků s orientací vláken 90° je vidět na grafu největší rozptyl naměřených hodnot tvrdosti, což může být způsobeno právě měřením v místě, kde došlo během chlazení k odtržení některých z vláken vrstvy a vzniku trhliny.



Obrázek 56 – Tvrdość vzorků z LDPE a LLDPE

## 6 ZÁVĚR

V první části diplomové práce byla vypracována literární rešerše, jejímž cílem je seznámení se základními informacemi o termoplastech, zejména polyetylenu a přiblížení problematiky technologií 3D tisku a vstřikování plastů. V závěru této části jsou popsány zkoušky mechanických vlastností a metoda skenovací elektronové mikroskopie. Teoretická část se dělí do pěti kapitol. První kapitola pojednává o polyetylenu a jeho typech, výrobou, využitím a konečné recyklaci. Ve druhé a třetí kapitole jsou popsány technologie 3D tisku a vstřikování plastů, jejich princip, typy a strojní zařízení pro zpracování plastů těmito technologiemi. Závěr je věnován tahové zkoušce, zkouškám tvrdosti a mikroskopu SEM. U zkoušek jsou popsány podmínky a postup dle jednotlivých norem.

Druhá, experimentální část se zabývá výzkumem mechanických vlastností a výrobních aspektů vstřikování a 3D tisku polymerních materiálů. Pro výzkum byly použity materiály LDPE a LLDPE. Nejprve byla provedena příprava materiálu, která se skládala ze sušení a výroby filamentu pro 3D tisk. Následně byly vyrobeny vzorky na vstřikolisu BOY 35 E a 3D tiskárně Rebelix s tryskou 0,6mm. Zkušební vzorky byly podrobeny zkouškám mechanických vlastností, zejména tahové zkoušce a zkoušce tvrdosti vtlačení kuličky. Nakonec byla provedena skenovací elektronová mikroskopie vstřikovaného vzorku z LLDPE. Naměřené hodnoty pro jednotlivé typy vzorků byly graficky a statisticky vyhodnoceny. Vyhodnocením přípravy materiálu, výroby vzorků a stanovených mechanických vlastností byly určeny užité vlastnosti pro jednotlivé materiály dle technologie zpracování.

Pro efektivní recyklaci je využití regranulátu LDPE a LLDPE především v technologiích vyfukování, vytlačování a vstřikování. Vstřikování má velké zastoupení ve výrobě potravinových obalů, víček a dalších. Zpracováním zkoumaných typů nízkohustotního polyetylenu pomocí 3D tisku ukázalo řadu problémů, v jejichž důsledku se nepodařilo vytisknout vzorky dostatečné jakosti, aby bylo možné uplatnění této metody pro výrobu konečných produktů.

Byly stanoveny tyto vlastnosti:

- Metodou vstřikování bylo dosaženo u obou materiálu hladké, nepórovité struktury bez zjevných vad, zatímco u tištěných vzorků byly viditelné vady výplně, které byly zapříčiněny špatnou přilnavostí a nízkým indexem toku taveniny

- Určením mechanických vlastností bylo zjištěno, že materiál LDPE má nejnižší hodnoty z porovnávaných vzorků, a to mez pevnosti, tažnost i tvrdost. V porovnání vzorků z LLDPE vyrobených 3D tiskem a vstřikováním, měli vylisované vzorky vyšší tvrdost, ale nižší tažnost. To je způsobeno větší tažností tištěných vláken ve směru zatěžující síly.
- Pomocí SEM mikroskopu byla pozorována lomová plocha vstřikovaného vzorku z LLDPE. Na snímcích byla zachycena homogenní struktura s rovnoběžnými liniemi orientovanými ve směru zatížení a zvlněné oblasti, vzniklé smrštěním přetržených vláken.

Možným řešením pro zlepšení mechanických vlastností nízkohustotního polyetylenu je přidání např. biologického nebo kovového plniva. Tím by bylo sníženo kolísání viskozity a tekutosti. Přidáním plniva s malou velikostí částic by byla zajištěna větší mezifázová interakce v polymerní matrici a dosažení větší tuhosti a pevnosti v tahu, což by mohlo vést k optimalizaci tiskových parametrů.

## Seznam použité literatury

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2. př. Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [2] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.
- [3] KOCANDOVÁ, Jana. *Mechanické vlastnosti a struktura směsí recyklovaného polyetylénu a velmi nízko hustotního polyetylénu*. Brno, 2019. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator s.r.o., 2016 [vid. 2022-03-09]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [5] PŘIKRYLOVÁ, Jana. *Aplikační potenciál LDPE, LLDPE, HDPE a jejich směsí*. Zlín, 2017. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [6] *TANGENT: Recycled plastic lumber and board materials* [online]. [vid. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://tangentmaterials.com/blog/>
- [7] EMBLEM, A. 13 - Plastics properties for packaging materials. In: Anne EMBLEM a Henry EMBLEM, ed. *Packaging Technology* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2012, s. 287–309. ISBN 978-1-84569-665-8. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1533/9780857095701.2.287](https://doi.org/10.1533/9780857095701.2.287)
- [8] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator, s.r.o., 2016 [vid. 2022-03-10]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>
- [9] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator, s.r.o., 2015 [vid. 2020-02-23]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [10] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [11] *INCOT - vstřikování plastů: Plastové výrobky* [online]. [vid. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.incot.cz/vyrobky>
- [12] *Amway* [online]. [vid. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.amway.cz/Kart%C3%A1%C4%8Dek-na-zuby-Glister%E2%84%A2/p/100957>

- [13] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [14] Injection Moulding World: 3 Basic steps of the injection molding process. *British Plastics and Rubber* [online]. 2018 [vid. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://injectionmouldingworld.com/3-basic-steps-of-the-injection-molding-process/>
- [15] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator, s.r.o., 2015 [vid. 2020-02-23]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [16] LENFELD, Petr. Vstřikování plastů. *Technická univerzita Liberec-Fakulta strojní-Katedra strojní technologie- Oddělení tváření kovů a plastů: Skripta technologie II.- Technologie zpracování plastů* [online]. [vid. 2020-02-23]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/04.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm)
- [17] GIBSON, I, D W ROSEN a B STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Second edi. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [18] WIMPENNY, David Ian, Pulak M PANDEY a L Jyothish KUMAR. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies* [online]. Singapore: Springer Science+Business Media Singapore, 2017. ISBN 978-981-10-0811-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-10-0812-2
- [19] NOORANI, Rafiq. *3D printing: technology, applications, and selection*. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-8375-0.
- [20] *3d Printed Object - Sls 3d Printed Parts* [online]. [vid. 2022-03-13]. Dostupné z: [https://www.seekpng.com/ipng/u2w7t4w7a9q8u2u2\\_3d-printed-object-sls-3d-printed-parts/](https://www.seekpng.com/ipng/u2w7t4w7a9q8u2u2_3d-printed-object-sls-3d-printed-parts/)
- [21] DK metal prominent s.r.o. [online]. 2018, 10 [vid. 2022-03-13]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [22] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. ISBN 978-90-827485-0-5.
- [23] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [24] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2. rozš. v. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.*



- [25] *ČSN EN ISO 527-1: Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. ICS 83.080.01.* B.m.: Úřad pro technickou normalizaci. 2012
- [26] *ÚSTAV FYZIKY A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ. Statické zkoušky krátkodobé* [online]. [vid. 2022-03-15]. Dostupné z: [https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_09.pdf](https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf)
- [27] *ČSN EN ISO 2039-1: Plasty - Stanovení tvrdosti - Část 1: Metoda vtlačení kuličky. ICS 83.080.01.* B.m.: Úřad pro technickou normalizaci. 2003
- [28] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1.* 4., rev. v. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [29] *ELUC* [online]. [vid. 2022-03-17]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1569>
- [30] *ČSN EN ISO 2039-2. Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 2 : Tvrdost dle Rockwella. ICS 83.080.01.* Praha. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci. 2000
- [31] *ČSN EN ISO 868. Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore).* Praha: Úřad pro technickou normalizaci. 2003
- [32] *Sauter HB0 100-0 přístroj na měření tvrdosti Shore 0 až 100 HC* [online]. [vid. 2022-03-17]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/sauter-hb0-100-0-pristroj-na-mereni-tvrdosti-shore-0-az-100-hc-102364>
- [33] *Encyklopedie fyziky: Skenovací elektronový mikroskop* [online]. [vid. 2022-03-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1675-skenovaci-elektronovy-mikroskop>
- [34] *Matca: Skenovací elektronový mikroskop (SEM)* [online]. [vid. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/sem/>
- [35] *Siemens Software: NX* [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- [36] *Prusa Research: Prusa Slicer* [online]. [vid. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/>
- [37] *ETW s.r.o.* [online]. [vid. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.ietw.eu/>
- [38] *ČSN EN ISO 527-2: Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. ICS 83.080.01.* B.m.: Úřad pro technickou normalizaci. 2012
- [39] *1.PLASTCOMPANY: Vstříkovací lis BOY 35 E* [online]. [vid. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://1plastcompany.cz/vstrikovaci-lis-boy-35-e>
- [40] *Morgen: LOW DENSITY POLYETHYLENE (LDPE)* [online]. [vid. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://www.morgen-filament.de/category/low-density-polyethylene-ldpe/>

- [41] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: Code Creator, s.r.o., 2015 [vid. 2020-02-23]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

### Zkratky

|                 |   |
|-----------------|---|
| 3D              | Trojdimenzionální   |
| ABS             | Akrylonitril butadien styren  |
| ASA             | Akrylonitril styren akryl   |
| atd.            | A tak dále  |
| BJ              | Binder jet  |
| CAD             | Computer aided design   |
| CAE             | Computer aided manufacturing  |
| CAM             | Computer aided engineering  |
| CO <sub>2</sub> | Oxid uhlíkový   |
| ČSN EN ISO      | Česká verze mezinárodní normy (převzaté evropskou komisí pro normalizaci) |
| DLP             | Digital light processing  |
| DMLS            | Direct metal laser sintering  |
| FDM             | Fused deposition modeling   |
| FFF             | Fused Filament fabrication  |
| GIT             | Gas injection technique   |
| HDPE            | High density polyethylene   |
| HMW             | High molecular weight   |
| LDPE            | Low density polyethylene  |
| LLDPE           | Linear low density polyethylene   |
| LOM             | Laminated object manufacturing  |
| MDPE            | Medium density polyethylene   |
| např.           | Například   |
| Obr.            | Obrázek   |
| PE              | Polyetylén  |
| PET             | Polyethylentereftalát   |
| PETG            | Glykolem modifikovaný polyethylene terephthalate                          |
| PLA             | Polylactic acid   |
| př.             | Příklad   |
| SEM             | Scanning electron microscope  |
| SHS             | Selective heat sintering  |
| SLA             | Stereolithography apparatus   |
| SLS             | Selective laser sintering   |

|        |  |
|--------|--|
| STL    | Standard triangle language               |
| Tab.   | Tabulka                                  |
| tzn.   | To znamená                               |
| tzv.   | Takzvaný                                 |
| UHMWPE | Ultra high molecular weight polyethylene |
| ULDPE  | Ultra low density polyethylene           |
| UV     | Ultrafialové                             |
| WIT    | Water injection technique                |
| XT     | Xing Technologies                        |

## Symboly

|                 |   |
|-----------------|---|
| A               | Tažnost [%]   |
| $e$             | Hloubka vtisku po odstranění zkušebního zatížení [0,002 mm] |
| %               | Procento  |
| °               | Stupeň  |
| °C              | Stupeň Celsia   |
| $b_1$           | Šířka zúžené rovnoběžné části [mm]                          |
| $b_2$           | Šířka konců [mm]  |
| bar             | Jednotka tlaku v SI soustavě                                |
| $\text{cm}^3$   | Centimetr krychlový   |
| CO <sub>2</sub> | Oxid uhlíkový   |
| $d$             | Průměr kuličky [mm]   |
| $d_{1,2}$       | Průměr délek uhlopříček $d_1$ a $d_2$ [mm]                  |
| E               | Modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa]                |
| F               | Zkušební zatížení [N]                                       |
| $F_e$           | Síla na mezi kluzu [N]                                      |
| $F_m$           | Maximální síla [N]  |
| $F_r$           | Redukované zkušební zatížení [N]                            |
| g               | Gram  |
| h               | Doporučená tloušťka [mm]                                    |
| HB              | Tvrдость metodou vtlačení kuličky [-]                       |
| $h_r$           | Redukovaná hloubka vtisku [mm]                              |
| HR              | Tvrдость metodou Rockwell [-]                               |
| HV              | Tvrдость metodou Vickers [-]                                |

|               |   |
|---------------|---|
| kg            | Kilogram  |
| kN            | KiloNewton  |
| kV            | KiloVolt  |
| L             | Počáteční vzdálenost čelisti [mm]                             |
| $L_0$         | Počáteční délka zkoušeného tělesa [mm]                        |
| $l_1$         | Délka zúžené rovnoběžné části [mm]                            |
| $l_2$         | Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi [mm]                |
| $l_3$         | Celková délka [mm]  |
| $L_u$         | Konečná délka zkoušeného tělesa [mm]                          |
| mA            | Miliampér   |
| mm            | Milimetr  |
| $\text{mm}^2$ | Milimetr čtvereční  |
| MPa           | MegaPascal  |
| N             | Newton  |
| nm            | Nanometr  |
| ot/min        | Otáčky za minutu  |
| r             | Poloměr   |
| $R_e$         | Napětí na mezi kluzu [MPa]                                    |
| $R_m$         | Napětí na mezi pevnosti [MPa]                                 |
| s             | Sekunda   |
| $S_0$         | Počáteční plocha průřezu zkoušeného tělesa [mm <sup>2</sup> ] |
| $S_u$         | Konečná plocha průřezu zkoušeného tělesa [mm <sup>2</sup> ]   |
| t             | Teplota   |
| Z             | Kontrakce [%]   |
| $\varepsilon$ | Poměrné prodloužení [-]                                       |
| $\sigma$      | Mechanické (tahové) napětí [MPa]                              |

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 – vzorec molekuly PE [1].....                             | 2  |
| Obrázek 2 – Molekulární struktura polymerů [4].....                 | 3  |
| Obrázek 3 – Produkty z Polyetylénu [6] .....                        | 4  |
| Obrázek 4 – Struktura řetězců LDPE, LLDPE, HDPE [5].....            | 6  |
| Obrázek 5 – Regranulační linka PE obalových materiálů .....         | 7  |
| Obrázek 6 – Příklad výlisku [11].....                               | 8  |
| Obrázek 7 – Ukázka vícebarevného vstřikování [12] .....             | 9  |
| Obrázek 8 – Jeden cyklus [41] .....                                 | 10 |
| Obrázek 9 – Fáze vstřikovacího cyklu [14].....                      | 11 |
| Obrázek 10 – Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 570 C [8] .....    | 13 |
| Obrázek 11 – Popis vstřikovacího stroje [16] .....                  | 14 |
| Obrázek 12 – Uzavírací jednotka .....                               | 16 |
| Obrázek 13 – Ukázka 3D tisku [20] .....                             | 17 |
| Obrázek 14 – Princip technologie FDM [21] .....                     | 18 |
| Obrázek 15 – Princip technologie LOM [21].....                      | 19 |
| Obrázek 16 – Princip technologie SLS a DMLS [21] .....              | 20 |
| Obrázek 17 – Princip technologie SLA [21] .....                     | 21 |
| Obrázek 18 – Rozdělení mechanických charakteristik [4].....         | 22 |
| Obrázek 19 – Typy zkušebních těles [26] .....                       | 24 |
| Obrázek 20 – Tahový diagram pro různé typy polymerů [4].....        | 25 |
| Obrázek 21 – Princip metody vtlačováním kuličky [26].....           | 27 |
| Obrázek 22 – Princip metody podle Rockwella [29] .....              | 28 |
| Obrázek 23 – Princip metody podle Vickerse [29] .....               | 29 |
| Obrázek 24 – Hrot tvrdoměru typu A a D [32] .....                   | 30 |
| Obrázek 25 – Schéma skenovacího elektronového mikroskopu [33] ..... | 31 |
| Obrázek 26 – Ukázka tvorby v NX 12.0 [35].....                      | 33 |
| Obrázek 27 – Sušárna Memmert UN30m+ .....                           | 35 |
| Obrázek 28 – Nastavené parametry na extruderu.....                  | 36 |
| Obrázek 29 – Extruder 3devo .....                                   | 36 |
| Obrázek 30 – Zkušební těleso typu 1A [38].....                      | 37 |
| Obrázek 31 – Reálné rozměry zkušební tělesa .....                   | 38 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 32 – Vstříkolis BOY 35 E a vstříkovací forma.....                         | 38 |
| Obrázek 33 – Vzorčky vyrobené metodou vstříkováním.....                           | 39 |
| Obrázek 34 – tiskárna Prusa i3 MK3S+(vlevo) a tiskárna Rebelix (vpravo).....      | 40 |
| Obrázek 35 – Orientace tisku 45 °(vlevo) a 90 ° (vpravo).....                     | 40 |
| Obrázek 36 – Kumulace filamentu na podávacích kolečkách.....                      | 41 |
| Obrázek 37 – Vzorčky z LLDPE vyrobené metodou 3D tisku.....                       | 41 |
| Obrázek 38 – Vzorek z LDPE vyrobené metodou 3D tisku .....                        | 42 |
| Obrázek 39 – Univerzální stroj pro tahové a tlakové zkoušky LabTest 5.50ST.....   | 43 |
| Obrázek 40 – Upínací část stroje LabTest 5.50ST .....                             | 44 |
| Obrázek 41 – Rozhraní softwaru Test & Motion .....                                | 44 |
| Obrázek 42 – Univerzální tvrdoměr DuraJet G5.....                                 | 45 |
| Obrázek 43 – Naprašovačka kovů Quorum Q150R ES (vlevo) a vzorek č.1 (vpravo)..... | 46 |
| Obrázek 44 – SEM TESCAN MIRA3 .....   | 47 |
| Obrázek 45 – Tahový diagram (10 mm/min) .....                                     | 48 |
| Obrázek 46 – Tahový diagram (50 mm/min) .....                                     | 49 |
| Obrázek 47 – Mez pevnosti vzorků z LDPE a LLDPE.....                              | 51 |
| Obrázek 48 – Tažnost vzorků z LDPE a LLDPE.....                                   | 52 |
| Obrázek 49 – Přetržené vlákno.....  | 53 |
| Obrázek 50 – Lomová plocha vzorku LLDPE vyrobeného metodou vstříkování .....      | 54 |
| Obrázek 51 – Rozhraní softwaru Microsoft Excel .....                              | 54 |
| Obrázek 52 – Tvrdost vzorků z LDPE (vstříkování).....                             | 55 |
| Obrázek 53 – Tvrdost vzorků z LLDPE (vstříkování) .....                           | 56 |
| Obrázek 54 – Tvrdost vzorků z LLDPE (3D Tisk 90°).....                            | 57 |
| Obrázek 55 – Tvrdost vzorků z LLDPE (3D Tisk 45°).....                            | 58 |
| Obrázek 56 – Tvrdost vzorků z LDPE a LLDPE .....                                  | 59 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 – Typy PE podle stupně krystalinity a hustoty [2], [3], [5].....    | 5  |
| Tabulka 2 – Materiálový list LDPE (ETW) [37].....                             | 34 |
| Tabulka 3 – Materiálový list LLDPE (ETW) [37] .....                           | 34 |
| Tabulka 4 – Rozměry zkušebního tělesa typu 1A [38] .....                      | 37 |
| Tabulka 5 – Statistické vyhodnocení meze pevnosti.....                        | 50 |
| Tabulka 6 – Statistické vyhodnocení tažnosti .....                            | 51 |
| Tabulka 7 – Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků LDPE (vstříkování).....   | 55 |
| Tabulka 8 – Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků LLDPE (vstříkování) ..... | 56 |
| Tabulka 9 – Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků LLDPE (3D Tisk 90°) ..... | 57 |
| Tabulka 10 – Statistické vyhodnocení tvrdosti vzorků LLDPE (3D Tisk 45°)..... | 58 |