

# **Fyzikálně-mechanické vlastnosti PA a PC po opakovaném zpracování vstřikováním**

Bc. Jaroslav Sláma

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav Sláma**  
Osobní číslo: **T16269**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Fyzikálně-mechanické vlastnosti PA a PC po opakovaném zpracování vstřikováním**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši se zaměřením na problematiku recyklace u polymerních materiálů:
2. Definice problémů recyklace u polymerů
3. Recyklace, jednotlivé technologie, zhodnocení recyklace ve světě
4. Mechanická recyklace, popis jednotlivých strojů pro danou technologii, nejčastější využití
5. Experimentální část
6. Selekce vhodných technických plastů pro recyklaci
7. Příprava materiálů, směsí a zkušebních těles
8. Provedení vybraných typů mechanických a optických testů
9. Vyhodnocení návrhu, přínos diplomové práce a závěry

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**dle zadání vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Ladislav Fojtl, PhD.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 5. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: .....

Obor: .....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je určit vliv procesu recyklace, opětovného použití recyklátu a jeho zpracování na fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů PC a PA. Teoretická část práce popisuje zpracování polymerního odpadu, typy recyklace a dále je zde uvedena rešerše již prováděných výzkumů. U materiálu PC byla experimentálně zkoumána změna vlastností v závislosti na obsahu recyklátu ve směsi s čistým materiálem. Byly provedeny zkoušky v tahu a rázu, dále byly měřeny tokové vlastnosti a také proběhlo měření lesku. U materiálu PA byla zkoumána změna vlastností v závislosti na počtu přepracování u vstříkování. V této části proběhli mechanické zkoušky a to zkouška tahová a rázová a také SEM mikroskopie. Po vyhodnocení a porovnání všech dat, bylo zjištěno, že obsah recyklátu v čistém materiálu PC nemá větší vliv na žádné testované vlastnosti. Naproti tomu u materiálu PA bylo možné pozorovat značný pokles vlastností s přibývajícím počtem recyklací.

Klíčová slova: recyklace, polyamid, polykarbonát, mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

The aim of this master thesis is to determine the influence of the recycling process, the re-use of the recycled materials and their processing on the physical-mechanical properties of PC and PA materials. The theoretical part describes processing of polymer waste, types of recycling and also contains the overview of already accomplished researches. For PC material, a change in properties was investigated experimentally, depending on the recycled content in a mixture with raw material. Tensile and impact tests were performed and the flow and gloss properties were measured. For PA, a change in properties was investigated, depending on the number of reprocessing in injection molding. In this part, mechanical tests were performed, namely the tensile and impact tests as well as SEM microscopy. After evaluation and comparison of all data, it was found that the recycled content in raw PC material had no effect on any tested properties. On the other hand, in the PA material we it was possible to observe a significant decrease in properties with an increasing number of recycling.

Keywords: recycling, polyamide, polycarbonate, mechanical properties

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Ladislavu Fojtlovi Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích diplomové práce.

Práce byla podpořena v rámci projektu Technologické agentury ČR (TAČR) "Centrum pokročilých polymerních a kompozitních materiálů" (TE 01020216).

Také bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu v průběhu celého mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.



# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 POLYMERNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>13</b>
1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ .....	13
<i>Termoplasty</i> .....	13
<i>Reaktoplasty</i> .....	14
<i>Elastomery</i> .....	14
1.2 POLYKARBONÁT .....	15
1.3 POLYAMIDY.....	17
<b>2 POLYMERNÍ ODPAD</b> .....	<b>19</b>
2.1 ROZDĚLENÍ PLASTOVÉHO ODPADU .....	20
2.2 MECHANICKÁ ÚPRAVA POLYMERNÍHO ODPADU .....	21
<b>3 RECYKLACE POLYMERŮ</b> .....	<b>23</b>
3.1 DRUHY RECYKLACÍ .....	24
3.1.1 Recyklace materiálová .....	24
3.1.2 Recyklace chemická .....	26
3.1.3 Energetické využití.....	27
3.2 EKONOMICKÉ A ENVIRONMENTÁLNÍ ZHODNOCENÍ RECYKLACE.....	28
<b>4 VLIV RECYKLACE NA MECHANICKÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI U PC A PA</b> .....	<b>29</b>
<b>5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI</b> .....	<b>33</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>34</b>
<b>6 CÍL PRÁCE</b> .....	<b>35</b>
<b>7 EXPERIMENRÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>36</b>
7.1 POUŽITÉ MATERIÁLY A PŘÍPRAVA SMĚSÍ.....	36
7.1.1 Polykarbonát.....	36
7.1.2 Polyamid.....	37
7.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	38
7.3 PROVEDENÉ ZKOUŠKY .....	40
7.3.1 Zkouška tahem .....	40
7.3.2 Zkouška vrubové houževnatosti.....	41
7.3.3 Měření tokových vlastností .....	41
7.3.4 Měření lesku.....	42
7.4 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE.....	44
7.5 STATICKÉ VYHODNOCENÍ DAT .....	44
<b>8 VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	<b>46</b>

8.1	VÝSLEDKY A DISKUZE PRO MATERIÁL PC .....	46
8.1.1	Modul pružnosti v tahu pro materiál PC .....	46
8.1.2	Mez pevnosti v tahu pro materiál PC .....	47
8.1.3	Maximální rázová síla pro materiál PC .....	47
8.1.4	Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PC .....	48
8.1.5	Míra lesku pro materiál PC .....	49
8.1.6	Tokové vlastnosti pro materiál PC .....	51
8.1.7	Rozměrová stabilita pro materiál PC .....	53
8.2	VÝSLEDKY A DISKUZE PRO MATERIÁL PA .....	54
8.2.1	Modul pružnosti v tahu PA .....	54
8.2.2	Mez pevnosti v tahu PA .....	56
8.2.3	Maximální rázová síla pro materiál PA .....	58
8.2.4	Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PA .....	60
8.2.5	Skenovací elektronová mikroskopie .....	62
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>65</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>		<b>66</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>68</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>70</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>		<b>72</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>		<b>73</b>

## ÚVOD

V dnešní době patří plasty díky svým speciálním vlastnostem mezi nevyužívanější materiály. S každoročním zvýšením produkce polymerů se obdobným tempem zvyšuje i polymerní odpad. Nejúčinnější možností redukce vzniku odpadu je snížení spotřeby samotného polymerního materiálu. Toto však je velmi obtížné proto, že tyto materiály jsou v praxi hojně využívány stále více jako náhrada jiných materiálů. Jako nezbytné se proto jeví alespoň recyklování polymeru. Samotná recyklace polymerů má z ekonomického hlediska dlouhou historii, ale ochrana životního a problémy nakládání s odpady přišly do popředí relativně nedávno. Snahou jak firem, tak i široké veřejnosti je snížit dopad člověka na životní prostředí. Již při samotném zpracování polymerních materiálů vzniká zpravidla odpad jako např. vtokové zbytky, odřezky a neshodné výrobky. Tento odpad je zpracováván přímo ve výrobní firmě nebo externí firmou zaměřenou na recyklaci.

Tato diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část práce popisuje zpracování polymerního odpadu, typy recyklace a dále je zde uvedena rešerše již prováděných výzkumů. Cílem praktické části je studium vlivu způsobu přípravy recyklovaného materiálu na fyzikálně-mechanické vlastnosti finálního výrobku.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery jsou látky tvořené makromolekulami s převážným obsahem prvků uhlíku C, kyslíku O, dusíku N, vodíku H, chloru Cl a dalších chemických prvků. Ve většině případů je jejich použití z hlediska fyziky ve stavu pevném a tuhém, pastovitém. Zřídka se lze setkat i s případy tekutého stavu jako jsou např. součásti mazacích tekutin. Technologie zpracování polymerů obvykle prochází kapalným, nebo pastovitým stavem, kdy budoucímu výrobku určuje tvar zejména technologické zařízení a to většinou za zpracovatelské teploty a tlaku, někdy i v průběhu časového intervalu. [7]

### 1.1 Rozdělení polymerních materiálů

Polymery lze rozdělit podle několika kritérií. Nejčastější rozdělení je do dvou základních skupin. První je skupina plastů, která se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty. Druhou skupinou jsou elastomery. [7]

#### *Termoplasty*

Termoplasty jsou polymery s lineárními řetězci, které jsou mezi sebou drženy mezimolekulárními silami. Tyto síly jsou několikanásobně menší než vazby uvnitř řetězců a lze je rozrušit působením tepelné energie. Nejdříve se rozpohybují menší úseky a následně i ty větší. Energie tohoto kmitání působí proti soudržnosti makromolekulárních sil. Pokud dojde k částečnému porušení těchto soudržných sil, mohou zkroucené řetězce měnit svůj tvar, polymer změkne a jeho vlastnosti se podobají vlastnostem elastomerů. Po dalším dodání tepelné energie se mezimolekulární síly rozruší tak, že řetězce se od sebe odpoutají a volně se pohybují. Hmota se stává viskózně tekutou a dá se tvářet. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání  $T_m$  v případě semikrystalických polymerů a teplotu viskózního toku  $T_f$  u polymerů amorfních. Díky tomu, že při procesu nedochází ke změně chemické struktury, lze tento proces neustále opakovat. [1]

Podle stupně uspořádanosti (nadmolekulární struktury), kdy nadmolekulární struktura nadřazena makromolekulám, se termoplasty dělí na amorfní a semikrystalické.

U amorfních polymerů se makromolekuly nachází ve zcela nahodilých pozicích. Charakteristickým znakem je tvrdost, vysoká pevnost a křehkost. Také díky nízkému inde-

xu lomu (kolem 1,5) mají velkou propustnost světla (až 92%). Mezi typické amorfní polymery patří PS, PMMA a PC. [2]

Semikrystalické polymery obsahují jak krystalické, tak i amorfní uspořádání. Toto uspořádání se označuje jako stupeň krystalinity, jež se pohybuje od 40 do 90 %, a označuje podíl uspořádaných oblastí, uložených mezi oblastmi amorfními. Tyto materiály jsou houževnaté, kdy jejich pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity. Index lomu je vyšší než u amorfních a jejich barva je mléčně zakalená. Do skupiny semikrystalických polymerů patří např. PE, PA, PP atd. [2]

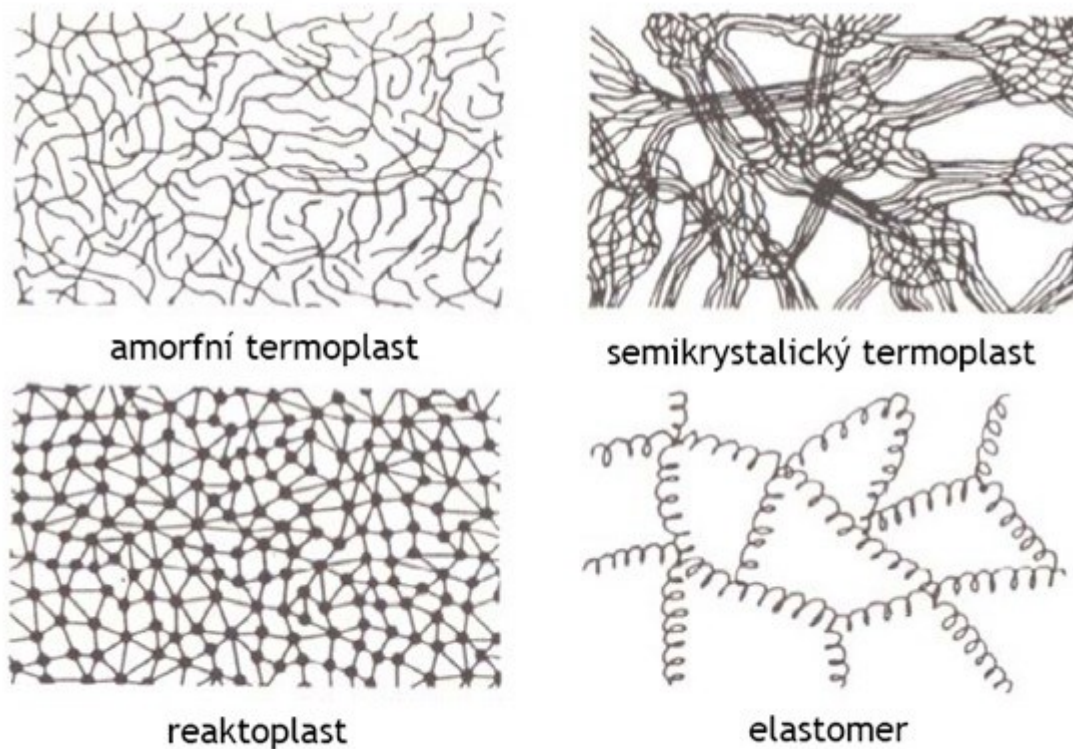
### ***Reaktoplasty***

Reaktoplasty jsou zesíťované polymery s řetězci příčně propojené chemickými vazbami. Díky tomu tak vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť. Působením tepelné energie se zvyšuje pohyblivost této sítě, ale k oddělení jednotlivých řetězců nedojde, protože příčné chemické vazby jsou pevné. Teprve až dalším působením tepla a tlaku nastává prostorové zesíťování - vytvrzování. Po ukončení tohoto zesíťování již další tváření není možné. Opětným působením tepelné energie dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Oproti termoplastům mají reaktoplasty vyšší tuhost a tvrdost. Vyznačují se tepelnou odolností, nerozpustností a tvarovou stálostí při působení tepla. Modul pružnosti není tolik závislý na změně teploty, takže mechanické vlastnosti nejsou příliš ovlivněny touto teplotou. Jako příklad lze uvést epoxidové pryskyřice, fenolové pryskyřice nebo fenolformaldehydové hmoty. [1]

### ***Elastomery***

Elastomery jsou polymery s elastickými vlastnostmi. Jejich elasticita není téměř závislá na teplotě. V právní fázi zahřívání měknou a stanou se dobře tvárné. V další fázi zahřívání dochází k zesíťování struktury tzv. vulkanizaci. U elastomerů na bázi termoplastů nedojde ke změně molekulární struktury a je tedy možné proces měknutí a tuhnutí pořád opakovat. [2]

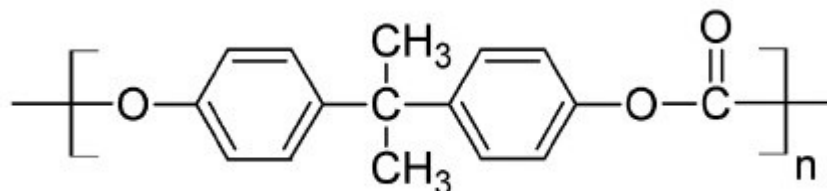
Nevýhodou elastomerů je v omezeném teplotním intervalu jejich použití nebo vliv času na změnu vlastností. Naopak mezi výhody lze zařadit vysokou elasticitu, schopnost tlumení (přeměna mechanické energie na tepelnou), schopnost snášet opakovanou deformaci, chemickou stabilitu, nepropustnost pro tekutiny, elektrické vlastnosti apod. [7]



Obrázek 1: Nadmolekulární struktura polymerů [2]

## 1.2 Polykarbonát

Jak bylo zmíněno výše, polykarbonát (PC) patří mezi termoplastické amorfní polymery. Patří do skupiny polyesterů, kde tvoří kyselou složku kyselina uhličitá. Alkoholickou složku zde tvoří převážně aromatické dvojfunkční alkoholy. [3]



Obrázek 2: Strukturní vzorec polykarbonátu [3]

Polykarbonáty jsou transparentní, s propustností světla 85 % a indexem lomu 1,557. Mají dobrou rozpustnost v chlorovaných uhlicích a v cyklohexanu, naopak těžce rozpustné

v ketonech, esterech a aromatických uhlovodících. Dosahují vysoké rázové houževnatosti i za velmi nízkých teplot vynikají dobrou rozměrovou stabilitou až do 140 °C. Dále vynikají dobrými elektroizolačními vlastnostmi, vysokou mechanickou pevností, odolností proti UV- záření, nízkou absorpcí vody, stálostí proti oxidaci (až do 120°C) a dobrou odolností proti hydrolýze. Také jsou odolné vůči roztokům zředěných kyselin, alifatickým uhlovodíkům a alkoholům, uhličitanu sodného a mýdel. Naproti tomu jejich odolnost nedostatečná vůči dlouhodobému působení vroucí vody a páry, methanolům, aminům a amoniaku. [3]

Polykarbonáty mají stejně jako ostatní termoplasty velmi dobrou zpracovatelnost. K nejčastějším způsobům patří vstřikování, vytlačování a vyfukování. Největší podíl polykarbonátů se zpracovává vstřikováním při teplotách 280 až 310 °C. Teploty forem se pohybují od 80 do 120 °C. Výsledné smrštění výrobků se pohybuje mezi 0,7 až 0,8 %. Pro výrobu fólií se nejvíce využívá vyfukování do rukávu, kde je důležité dbát na výkonné chlazení forem. I přes nízkou absorpci vody je třeba materiál před zpracováním vysušit, jinak může dojít ke vzniku nekvalitních výrobků. Průměrná doba sušení při 120 °C je okolo 4 hodin. Výrobky z polykarbonátu se také dají dobře třískově opracovávat, svařovat horkým vzduchem a lepit. Pro lepení se používají epoxidy a různé druhy rozpouštědel. Polykarbonát má v praxi široké využití hlavně tam, kde je potřeba přesnost, tvarová stálost, odolnost a vysoké hodnoty mechanických a elektrických vlastností. Využívá se v mnoha oblastech od automobilového průmyslu (LED svítidla, světlomety) přes optické aplikace (brýlové čočky) až po aplikace v oblasti medicíny (různé druhy chirurgických nástrojů). [4]



Obrázek 3: Využití polykarbonátu v praxi



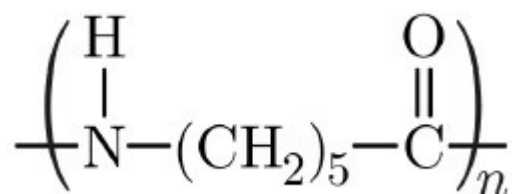
### 1.3 Polyamidy

Polyamidy patří do skupiny semikrystalických termoplastů. Jsou to lineární polymery obsahující v řetězcích amidové skupiny –CONH–. Jsou to tzv. konstrukční plasty, které jsou využívány pro výrobu technicky namáhaných součástí. Polyamidy se vyrábějí nejčastěji polykondenzací diaminů (s šesti atomy uhlíku) a dikarboxylových kyselin (s šesti, deseti nebo dvanácti atomy uhlíku). Takto se vyrábí polyamidy 66, 610 a 612. Polykondenzací aminokarboxylových kyselin (s šesti, jedenácti a dvanácti atomy uhlíku) v přítomnosti vody vznikají polyamidy 6, 11 a 12. Pro výrobu tzv. alkalického polyamidu se využívá iontová radiace. Díky četnému počtu modifikací pro výrobu základních druhů polyamidů, vzniká široké množství plastů určené pro nejrozličnější aplikace. [5]

Podle výrobního způsobu je možno polyamidy dělit do těchto skupin:

- polyamidy na bázi ω-aminokyselin a jejich laktonů
- polyamidy na bázi dikarboxylových kyselin a diaminů
- polyamidy vícesložkové (např. diamin a karboxylová kyselina + ω-aminokyselina)
- polyamidy obsahující v řetězci aromatické jádro

Mezi technicky nejdůležitější a nejvíce užívané patří polyamidy první a druhé skupiny.[3]

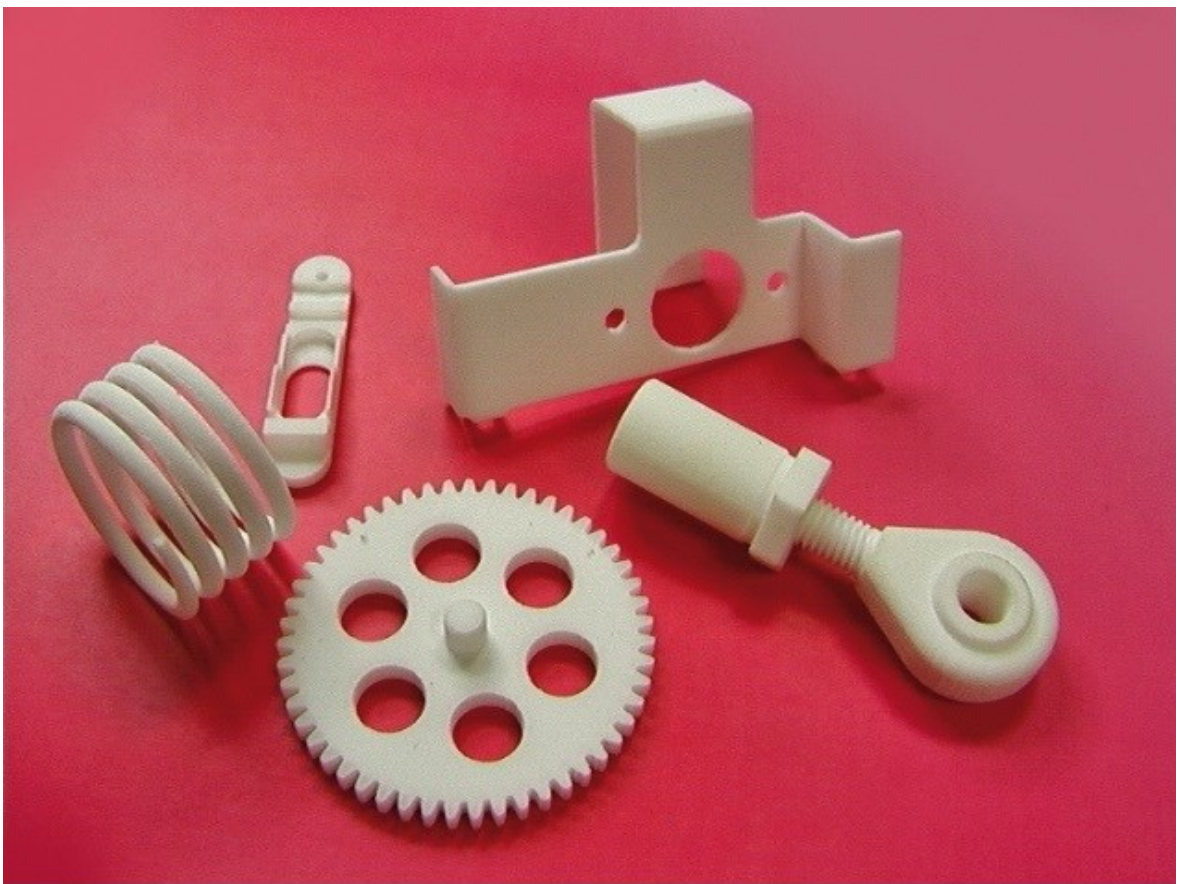


Obrázek 4: Strukturní vzorec PA6 [3]

Polyamidy obsahují relativně velký podíl vody, který se v závislosti na typu a oblasti užití může dle relativní vlhkosti vzduchu měnit. Mezi méně navlhavé polyamidy patří PA11, PA12, naopak více navlhavé jsou PA6, PA66. Pouze s určitým podílem vlhkosti si polyamidy zachovávají svou úplnou pružnost, tuhost a rázovou pevnost. Polyamidy, u kterých je číselné označení vyšší než 6 se vyznačují velkou pevností, odolností proti oděru a malým koeficientem tření. Se stoupajícím typovým číslem také klesá stupeň krystalinity, bod tání a nasákavost. Jejich barva je bíložlutá nebo mléčně bílá. Postupem času díky UV záření žloutnou. Barvitelnost je dobrá v různých odstínech. Jsou odolné proti běžným rozpouštědlům (aceton, alkohol atd.). I při růstu

tepelného zatížení si udržují velmi dobrou stálost rozměrů. V závislosti zatížení a tvaru výrobků se jejich dovolené provozní teploty pohybují od -40 do 125 °C. Teplota tavení začíná na 300°C. [6]

Zpracovatelnost polyamidů je velmi dobrá díky vysoké tekutosti a rychlé tuhosti. Mezi nejdůležitější metody zpracování polymerů patří vstřikování. Vstřikovací teplota bývá zpravidla o 15 až 20 °C výše, než je bod tání příslušného polyamidu (230-270°C). Forma může být jak teplá (pro technické dílce), tak studená (pro dílce, kde je potřeba optimální pevnost, houževnatost, tažnost a lesklý povrch). Smrštění se pohybuje od 0,5 do 1%. Vstřikováním se vyrábějí různé součásti s dokonalou úpravou povrchu, s různou barevností apod. jako např. ozubená kola, ložiska, těsnění a technické díly do motorového prostoru v automobilech. Další metodou pro zpracování polyamidů je vytlačování. Touto metodou lze vyrábět trubky, fólie či profily. Také se jej používá pro opláštění vodičů. [3,4]

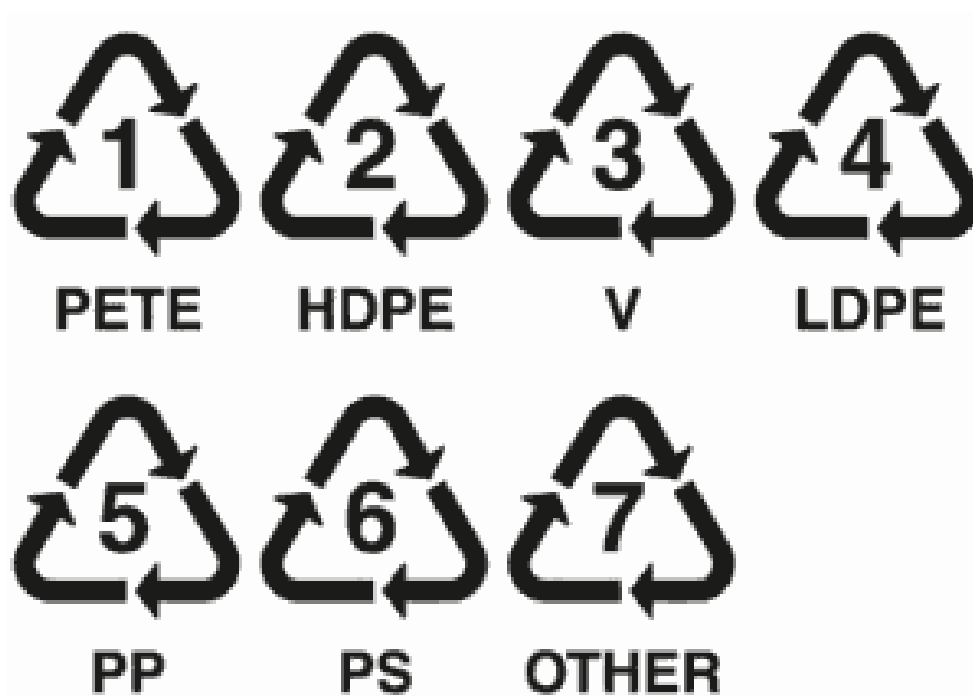


Obrázek 5: Využití polyamidu v praxi

## 2 POLYMERNÍ ODPAD

Ve světě dnes vzniká kolem 35 milionů tun polymerní odpadu ročně. I přesto že tvoří asi 15% celkového odpadu, je to velký problém. Ekologická závadnost polymerů spočívá ve velmi pomalé biodegradaci, v obsahu toxických nebo karcinogenních látek (sloučeniny Cd, Sb, Sn, halogenové organické sloučeniny) a ve schopnosti uvolňovat vysoce toxické zplodiny např. při požáru, spalování anebo skládkování. [9]

Polymerní odpad může vznikat již při výrobě (přetoky, zmetky, vtokové soustavy) jako tzv. technologický (vratný) odpad nebo až po upotřebení výrobku tzv. komunální (sběrový) odpad. Podle druhu se polymerní odpady označují identifikačním číslem s piktogramem. Toto označení pokrývá jen malý počet polymerů, ale hromadně se používá pro označení v obalové technice. V dnešní době, zejména u vstřikovaných výrobků pro automotive, obsahuje každý díl značku polymeru, ze kterého je vyroben. Obalová technika zabírá až 50 % celkového odpadního polymeru a tak toto značení značně přispívá ke zlepšení třídění a tak i recyklaci samotného odpadu. Celkově se recykluje asi 30% celkového plastového odpadu, zbytek je spalován či skládkován. [9]



Obrázek 6: Identifikační označení polymerního odpadu [17]

## 2.1 Rozdělení plastového odpadu

Důležitá součást recyklace polymerního odpadu je jeho zpracování. K opětovnému použití ve výrobě je potřeba odpad přizpůsobit. Stupeň znečištění nám udává jakým způsobem a jak dobře se bude odpad zpracovávat. Pro jednoduchost lze polymerní odpad rozdělit do 4 základních skupin:

### a) *Plasty jediného druhu neznečištěné*

Tento odpad je nejkvalitnější a lze jej opět zařadit do procesu, při kterém vznikl. Jedná se především o vtokové zbytky nebo odřezky fólií, desek, trubek apod. Není zde potřeba žádná speciální úprava. Materiál se nejčastěji rozemele na drť, která je následně v určitém poměru přidána k původnímu polymeru. Pokud je odpadu větší množství, je rozdrčený materiál plastikován, homogenizován (na kontinuálním hnětiči) a poté granulován. Díky tomu, že tato recyklace je málo náročná, většina firem ji provádí přímo ve své výrobě [3,8]

### b) *Plasty jediného druhu kontaminované*

Oproti předešlé skupině odpadů, zde již nelze odpad zahrnout do opětovného procesu, při němž byl vyroben. Jedná se např. o pytle na hnojiva, obalové a zemědělské fólie, palety apod. Je tedy potřeba dalšího zpracování pro jiné koncové aplikace. Hlavním rozdílem ve zpracování oproti neznečištěnému materiálu je přidání praní a sušení do procesu. Dále se také musí před granulováním znečištěný odpad filtrovat. Kvalita získaného materiálu silně závisí na kvalitním odstranění nečistot. [3,8]

### c) *Směsné plastové odpady o známém složení*

Opadu této skupiny neobsahuje žádnou neplastovou složku. Na druhou stranu obsahuje různé druhy plastových odpadů, které mají různé vlastnosti. Tento nedostatek se nejčastěji projevuje při plastikaci a homogenizaci. Pro zpracování tohoto odpadu se nejčastěji používá diskontinuální hnětič nebo speciálně konstrukčně upravený hnětič kontinuální. Pomocí působení třecího tlaku a tepla dochází k homogenizace drtě. Oproti předešlým odpadům, se tato směs různých druhů plastů negranulujeme. Takto upravený odpad našel využití ve výrobě podlahových krytin či protihlukových stěn. [3,8]

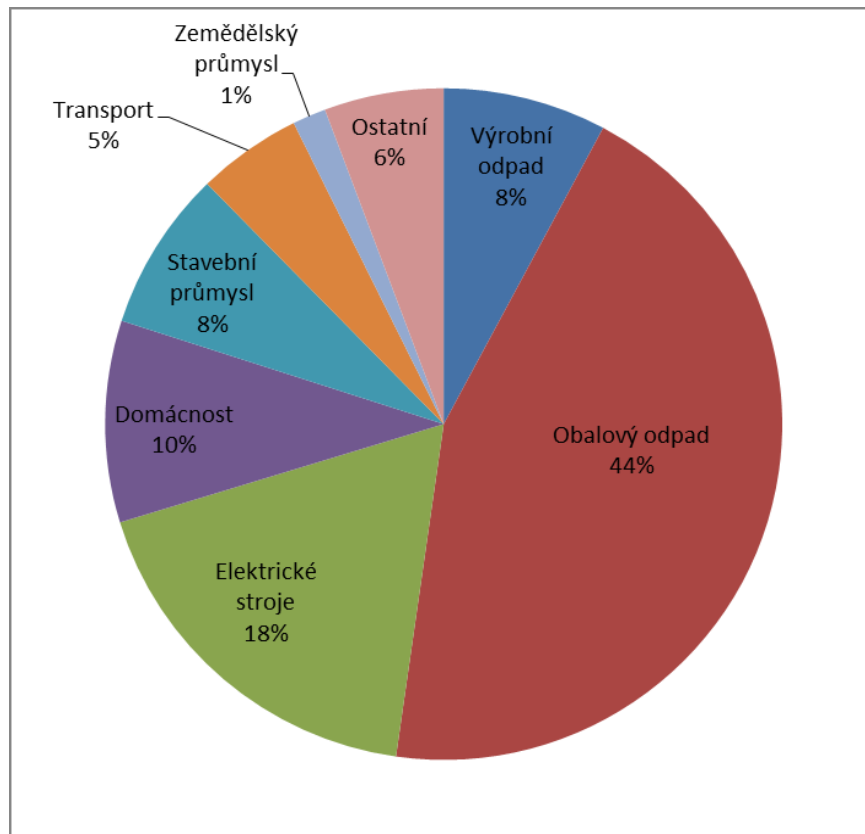
### d) *Náhodně sesbíraný a komunální odpad.*

Tento druh odpadu již obsahuje i jiné neplastové materiály. Proces recyklace této skupiny odpadu patří mezi obtížné a nejméně ekonomické. Zpracování zahrnuje především dezin-

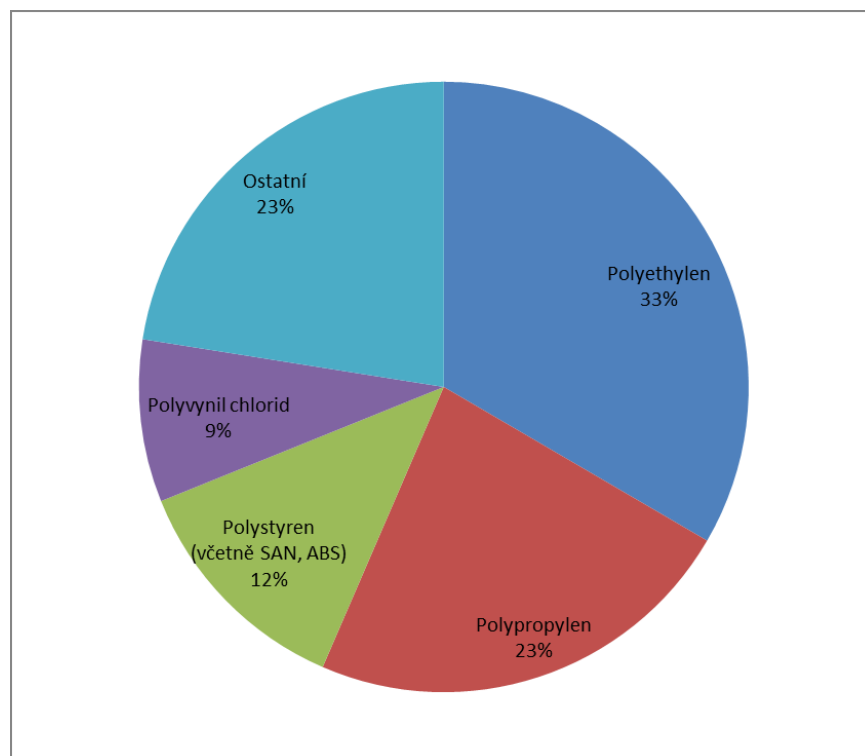
tegraci a třídění podle druhu materiálu a velikosti částic. Toto se provádí např. magneticou a fluidní separací, ručním dělením, proséváním a promýváním. Díky tomu je výsledný recyklát často cenově vyšší, než materiál čistý. Toto je hlavní důvod, proč většina takového odpadu končí na skládkách. [3,8]

## 2.2 Mechanická úprava polymerního odpadu

Polymerní odpad je často velmi objemný. Toto je nevýhoda zvláště z hlediska manipulace a dopravy. Lze jej zmenšit stlačováním odpadu v lisovacích, paketovacích, pěchovacích a dalších zařízeních. Pro odpad, který je hůře deformovatelný se využívají drtiče a mlýny. Dále se odpad třídí na jednotlivé složky podle druhu nebo typu materiálu. Využívá se buď identifikační značení, nebo dělení probíhá podle fyzikálních případně chemických vlastností materiálu (např. optické vlastnosti, hustota atd.). Třídění probíhá buď manuálně, nebo automaticky. Nejčastěji se provádí třídění založené na rozdílu hustot různých materiálů. Ta se provádí v mokrému tříděči – hydrocyklónu, kdy suspenze rozemleté drtě ve vodě je přivedena do válcové části tříděče a zde dojde pomocí odstředivé síly k dělení drtě. Hrubší a těžší částice se dostanou ke stěně kužele, po které kloužou do spodní části a odtud odcházejí jako spodní výtok. Jemnější a lehčí částice jsou vírem vyneseny nahoru a odtékají jako přepad středním otvorem. Třídění je prováděno selektivně, což znamená, že na pásu zůstane žádaný druh a nežádané příměsi jsou odděleny. Postup může být i naopak, kdy na pásu zůstanou nežádané příměsi. [9]



Obrázek 7: Rozdělení plastového odpadu podle zdroje pro rok 2013 [13]

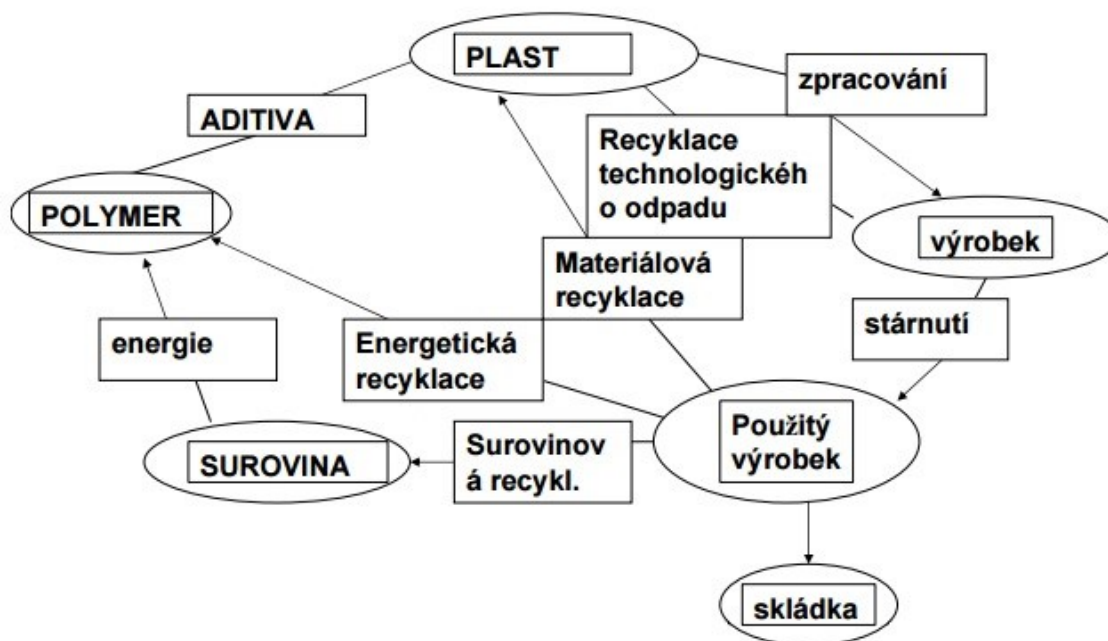


Obrázek 8: Rozdělení plastového odpadu podle druhu materiálu pro rok 2013

### 3 RECYKLACE POLYMERŮ

Recyklace je proces nakládání s odpadem, které vede k jeho dalšímu využití. Jedná se o opětovné cyklické využití odpadu jako jejich vlastností jako druhotné suroviny ve výrobním procesu. Co se týče polymerního průmyslu, je recyklace důležitou součástí. S každoročním zvýšením produkce polymerů se obdobným tempem zvyšuje i polymerní odpad. Nejúčinnější možností je snížení spotřeby samotného polymerního materiálu. Toto však je velmi obtížné proto, že tyto materiály jsou v praxi hojně využívány stále více jako náhrada jiných materiálů. Proto je zde snaha alespoň částečně redukovat množství vzniklého odpadu jako jsou například horké vtokové systémy u vstřikování. Další možností je vývoj a použití snadno degradovaných polymerů tzv. biopolymery. Tyto však nemohou v dohledné době nahradit stávající polymery a to z důvodů jejich špatné zpracovatelnosti a tím i vyšší ceny. Také mechanické vlastnosti biopolymerů nedosahují potřebných hodnot. [10]

Jako nezbytné se proto jeví alespoň recyklování polymeru. V tomto procesu je vždy materiál cíleně přetvářen již jinak nepoužitelného odpadu na druhotnou surovinu, která je použitelná pro další zpracování. Tento proces umožňuje šetřit obnovitelné i neobnovitelné zdroje (na výrobu polymerů je spotřebováno až 8% celkové produkce ropy). Recyklace je důležitá pro snížení plýtvání prvotní suroviny, snížení energie, znečištění ovzduší (spalování) a vody (skládování), a emisí skleníkových plynů ve srovnání s výrobou nových polymerních materiálů [11]



Obrázek 8.: Recyklační cyklus [12]

### 3.1 Druhy recyklací

V závislosti na příslušné kategorii jsou plastové odpady zpracovány jako přímo recyklované (primární a sekundární), chemicky recyklované a dále jako energetická surovina jsou spalovány či zplynovány. [3]

#### 3.1.1 Recyklace materiálová

Recyklace materiálová je nejvíce vhodná pro termoplasty. Procesy zahrnuje od nejjednoduššího mletí využitých výrobků s následným tepelně mechanickým zpracováním (výroba nových výrobků), až po kompatibilizační postupy v tavenině (výroba vícesložkových materiálů ze směsí odpadních plastů). Tento způsob recyklace je založen na dodávce tepelné a mechanické energie a aditiv (stabilizátorů, barviv, plniv) pro přeměnu odpadu na nový materiál, jehož mechanické a estetické vlastnosti se blíží vlastnostem původního polymeru. [14]

Materiálová recyklace slouží pro co nejefektivnější využití surovinového a energetického odpadu do nedotčeného polymeru. Z hlediska způsobu rozdělení polymerního odpadu lze tuto recyklaci rozdělit do dvou skupin:



### *Primární recyklace*

U této recyklace se jedná o zpracování čistého, nekontaminovaného odpadu jediného druhu plastu (technologický odpad). Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější způsob recyklace, zvláště ve výrobních podnicích, kde tento typ odpadu vzniká a kde je možné zajistit udržet jej v čistém stavu. Pro tuto recyklaci není potřeba žádná zvláštní úprava, materiál se pouze rozemele na drť. Tato se pak přidává se v určitém poměru (v praxi nejčastěji 15%) k původnímu materiálu, nebo pro samotnou výrobu nového produktu s nižšími požadavky na kvalitu. [3][8]

Přestože se tato recyklace jeví jako velmi jednoduchá, je třeba připomenout, že při zpracování plastů dochází k chemickým reakcím, které poté mohou vést degradaci. Této degradaci lze poměrně snadno zabránit pomocí restabilizace. Dostatečné stability lze v mnoha případech dosáhnout přidáním malého množství fenolických nebo fosfiových antioxidantů. Pro zabránění fotooxidace jsou zároveň přidávány UV stabilizátory. Množství těchto stabilizátorů jsou často několikanásobně vyšší než u stabilizátorů použitých v originálním materiálu. [3][8]

### *Sekundární recyklace*

Jedná se o zpracování odpadu obsahující různé druhy plastu a je zpracováván mnoha operacemi, jako je granulace, drcení, separace jednotlivých druhů plastu, čištění a sušení. Tento druh recyklace lze ještě rozdělit na dva základní přístupy. První skupinou je recyklace tříděných plastů a spočívá v oddělení plastů od jejich kontaminantů s následným oddělením podle druhových typů, přičemž jeden nebo několik z nich jsou recyklovány do výrobku z čistého materiálu. Oddělení jednotlivých plastů je založeno na rozdílných hustotách, rozměrech, barvě, fyzikálních a chemických vlastnostech. Druhým přístupem sekundární recyklace netříděných směsí a spočívá v separaci plastových a neplastových materiálů s následným roztavením tohoto plastového odpadu bez další separace na jednotlivé druhy plastů. Suroviny získané ze sekundární recyklace se používají u méně náročných operací, jako je např. výroba palet, sloupků oplocení, plotových dílců, koberečků, cívek kabelů, průmyslových podlah apod. Obecně platí, že vlastnosti materiálu získaného touto metodou jsou značně odlišné od původního materiálu. [3][8][15]

### 3.1.2 Recyklace chemická

Principem chemické (někdy též uváděna jako terciální) recyklace je rozklad polymerního materiálu na nízkomolekulární látky, které jsou vhodné pro opětovné využití jako monomery pro polymeraci. Jako příklad lze uvést tepelnou depolymeraci, jež se využívá u recyklace PS a PMMA. Působením vysokých teplot (400°C až 600°C) podléhá materiál degradaci, kdy se z konců polymerních řetězců postupně odštěpují monomerní jednotky. Dalším příkladem chemické recyklace je solvolýza. Touto metodou je možné získat výchozí monomerní jednotky opačným postupem polykondenzace. Dochází tedy k rozkladu polykondenzátů účinkem nízkomolekulárních látek. Z toho vyplývá, že tímto způsobem je možné recyklovat takové polymery, které byly vyráběny polykondenzací nebo polyadicií. Mezi takovéto polymery patří polyestery, polykarbonáty, polyamidy nebo polyuretany. Pokud tento rozklad nastává účinkem vody, hovoříme o tzv. hydrolýze, rozklad účinkem alkoholu je pak nazýván alkoholýza. [3][8]

Podle některých zdrojů se do chemické recyklace řadí také recyklace surovinová. Principem této recyklace je přeměna odpadu na výrobní surovinu. Toho se uskutečňuje pomocí destrukčních procesů, které rozkládají polymery na směs plyných a kapalných uhlovodíků. Ty je poté možné následně využít jako petrochemické suroviny nebo topné oleje. Do této skupiny je možné zařadit hydrogenaci, což je vysokotlaký katalytický proces, jehož produktem jsou kapalné, nasycené uhlovodíky. Mezi další surovinové recyklace lze zařadit pyrolýzu. Jedná se o tepelný rozklad polymerů, který probíhá za nízkého tlaku a zvýšených teplot bez přítomnosti kyslíku. Proces by měl probíhat za takových podmínek, aby vznikající pyrolýzní plyn a olej obsahovaly v nejpříznivějším případě monomery, v méně příznivých případech jednoduché sloučeniny zpracovatelné jako druhotné suroviny v další výrobě. [3][8][12]

Tabulka 1: Výtěžek monomerů podle druhu polymeru [16]

Polymer	Výtěžek monomeru [%]
Polytetrafluorethylen	97 - 100
Polystyren	42
Polyisobutylen	32
Polypropylen	0,2 - 2
Polyethylen	Méně než 1

### 3.1.3 Energetické využití

Energetickým využitím se myslí získání alespoň energetického zdroje z obsahu odpadního plastu. Pokud nelze plastový odpad recyklovat žádnou jinou metodou, jež byly popsány výše, patří energetické využití k neefektivnějšímu způsobu ke snížení objemu organického odpadu. Tato metoda je jistě také lepší alternativou k zavážení tohoto odpadu na skládky – tzv. skládkování. Díky tomu, že výchozí surovinou plastů je ropa, mají velmi vysokou energetickou hodnotu. Mezi energetické využití řadíme spalování a zplyňování. Spalováním se využije vysokého spalného tepla. Tabulka 2 uvádí hodnoty spalných tepel plastů a některých srovnávacích materiálů. Největším rizikem je spalování materiálů s obsahem chlóru jako je např. PVC. Při vysokých teplotách se tvoří polychlorované aromatické sloučeniny, které se pak usazují na sazích. Tyto sloučeniny (polychlorované dibenzofurany a debenzidioxiny) jsou velmi toxické a proto může dojít k znečištění ovzduší. Proces spalování probíhá ve speciálně konstruovaných topeništích. Je potřeba navrhnout co nejvhodněji toto topeniště a technologické podmínky spalování tak, aby nedocházelo k možnosti úniku toxických plynů. [3][8][15]

Tabulka 2: Spalná tepla plastů a srovnávacích materiálů [15]

Látka	Spalné teplo [kJ/kg]
Polyethylen	46 300 - 49 000
Polypropylen	44 200 - 46 800
Polystyren	40 300 - 45 600
Polykarbonát	29 600 - 32 400
Polymethymethakrylát	28 000
Polyvinylchlorid	20 900
Polyamid	20 200 - 25 600
Pryže	32 000 - 43 000
Černé uhlí	23 600
Hnědé uhlí energetické	13 100
Dřevo (různé druhy)	11 600 - 20 900

Dalším energetickým využitím je možnost zplyňování. Při tomto procesu se energie obsažená v tuhém odpadu převede do plynné fáze a tím se získá plynné palivo. Toto palivo umožní mnohem větší účinnost využití energetického obsahu odpadu. Spalitelné uhlíkaté látky v odpadu se na hořlavé plyny přeměňují tepelným štěpením a nedokonalým spalováním. Jedná se o řadu propracovaných postupů, jež zahrnují jak oxidační procesy, při kte-

rých vzniká topný plyn s velkým obsahem oxidu uhelnatého, tak procesy pyrolýzní doprovázené vznikem topného plynu s velkým obsahem methanu a dalších uhlovodíků. Pro tento proces se používají různé reaktory, jako jsou např. šachtové pece, trubkové reaktory, fluidní reaktory, rotační válcové pece, pražící bubny. [16]

### 3.2 Ekonomické a environmentální zhodnocení recyklace

Pokud hovoříme o ekonomickém a environmentálním zhodnocení, je třeba splnit mnoho předpokladů, aby došlo k požadované efektivitě. Samotným smyslem recyklace je využití energetického potenciálu obsaženého v plastovém odpadu. Také zde lze zahrnout zmenšení výdajů fosilních paliv, jež jsou spojeny s jejich výrobou. Proti tomu stojí energetické výdaje spotřebované samotnou recyklací, jako jsou výdaje na dopravu, drcení, sušení a další procesy. Proto je zcela zásadní velikost rozdílu mezi celkovými energetickými bilancemi výrobku z čistého původního materiálu a výrobku z recyklátu. [16]

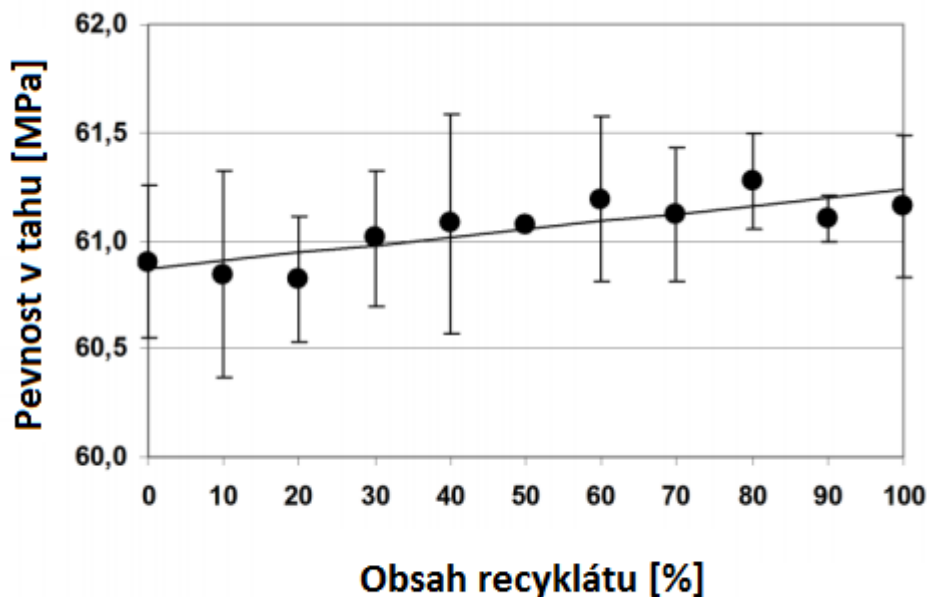
V různých případech může být proces recyklace náročný jak v oblasti energetické a ekonomické, tak v oblasti environmentální. I přesto pokud srovnáme tyto výdaje s výdaji potřebnými na výrobu nových surovin, jedná se o dopady mnohonásobně menší. Také ve srovnání se skládkováním či spalováním jsou přínosy recyklace nesrovnatelně vyšší. [16]

Mezi hlavní přínosy pak patří uchování přírodních zdrojů. Nové technologie využívané v procesech recyklace umožňují výrobu materiálů se zvýšenou kvalitou a tím tak rozšiřují množství odvětví, kde mohou být tyto recyklované výrobky využity. S tím je tedy spjata šetření životního prostředí. Recyklace je také výhodnější z ekologického hlediska v porovnání se skládkováním či spalováním. Tyto skládky kontaminují rozsáhlá území a z nich pak prosakují do spodních vod škodlivé látky. Spalováním se zase dostává do ovzduší toxický popel a emise. Ekonomickým hlediskem může být také vytvoření nových pracovních míst spojených se samotnou recyklací. [16]

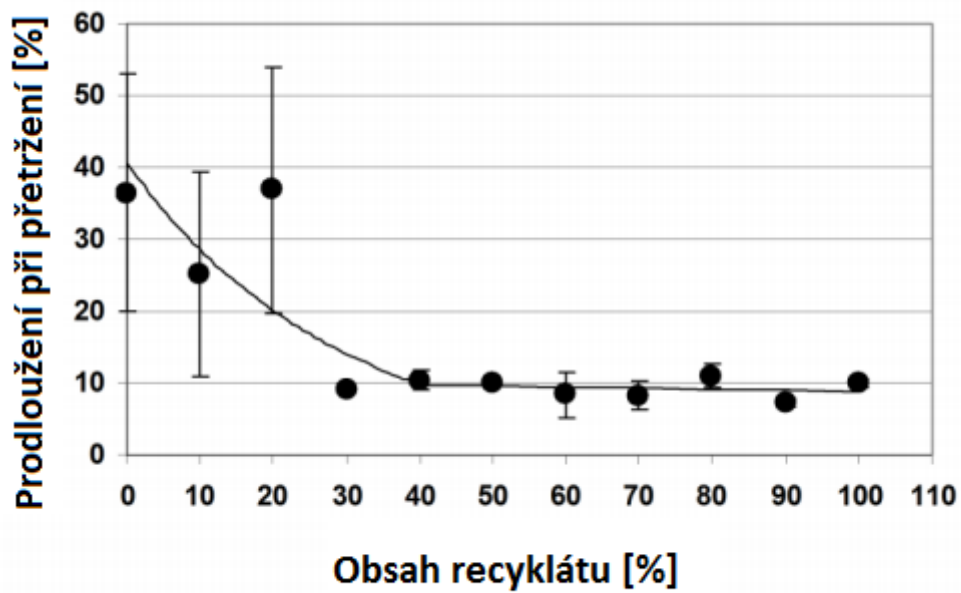
## 4 VLIV RECYKLACE NA MECHANICKÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI U PC A PA

Problematice recyklace vybraných konstrukčních plastů, kterou se zabývá praktická část této práce, byla předmětem i v řadě dalších výzkumných pracích. Tyto výzkumy nám shodně ukazují, že několikanásobná recyklace či přidání recyklátu k čistému materiálu má za následek postupné zhoršení mechanických vlastností.

Co se týče polykarbonátu, studie F. Ronkaye ukazuje, že průměrná molekulová hmotnost klesá o 8% již po prvním vstřikování. Snížení molekulové hmotnosti mělo za následek zvýšení objemového průtoku o 25%. Dále se tato studie zabývala přidáním různého množství recyklovaného odpadu PC k čistému materiálu. Výsledky ukazují, že pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu se příliš nemění se zvyšováním obsahu recyklovaného PC. Avšak hodnoty rázové pevnosti a prodloužení při přetržení značně klesají při použití více než 20% obsahu odpadu. Studie se také zabývala optickými vlastnostmi, kde výsledkem bylo, že při použití více jak 10% odpadu má za následek zjistitelný rozdíl v absorpci fialového světla (380-408 nm). [18]

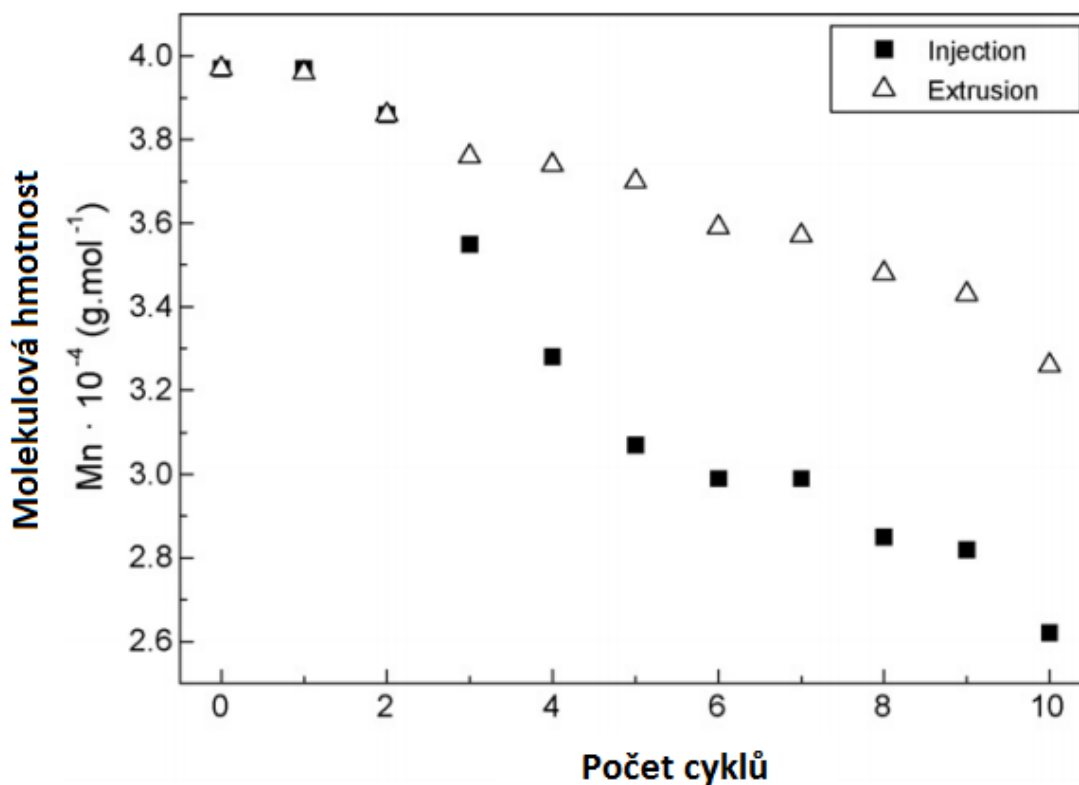


Obrázek 9: Závislost pevnosti v tahu na obsahu recyklátu PC [18]



Obrázek 10: Závislost prodloužení při přetržení na obsahu recyklátu PC [18]

Studie J.M. Péreze zkoumala vliv počtu recyklací na vlastnosti materiálu PC. Výsledkem této práce je, že ani modul pružnosti ani pevnost v tahu nebyla ovlivněna v prvních 7 cyklech, zatímco rázová pevnost znatelně klesala již při druhém cyklu. Dalším výsledkem bylo zjištění, že s počtem cyklů (jak u vstřikování, tak u vytlačování), dochází k poklesu molekulové hmotnosti a tím k poklesu teploty skelného přechodu ( $T_g$ ) a počáteční teploty rozkladu ( $T_i$ ). [19]

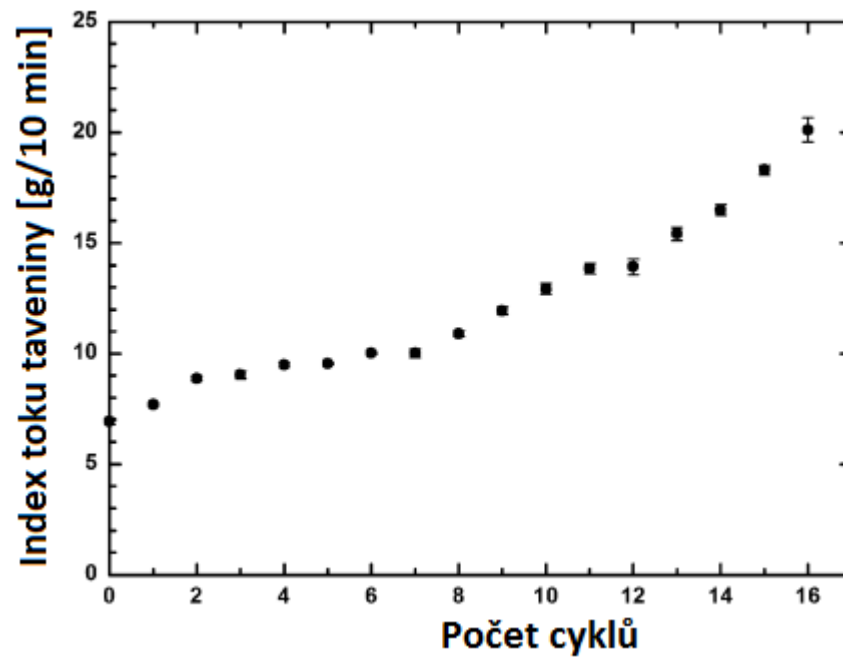


Obrázek 11: Vliv molekulové hmotnosti na počtu recyklačních cyklů [19]

Práce Longa a Sokola se zase zabývala vlivem vlhkosti na degradaci PC při vstřikování. Bylo zjištěno, že i velmi nízká vlhkost během zpracování nepříznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti konečného produktu. [20]

Několik dalších prací se také věnovalo možnosti recyklace polyamidů. Studie Lozano - Gonzalese a kol. ukázala rozdíl mechanických vlastností mezi čistým PA6 a PA6 po desátém cyklu přepracování. Tento rozdíl se pohyboval v rozmezí 10 až 15 %. Vyjimkou byla hodnota prodloužení při přetrhnutí, která se zvýšila až o 70% při desátém cyklu. Recyklace suchého a mokrého PA6 s přidaným antioxidantem byla provedena firmou La Mantia. Výsledky ukázaly, že reologické a mechanické vlastnosti se mírně měnily se zvyšováním počtu přepracování. Degradace materiálu byla způsobena termomechanickým namáháním působícím na roztavený materiál. Přepracování vlhkého materiálu mělo za následek drastické snížení molekulové hmotnosti díky hydrolytickému štěpení řetězce. Použití přísady schopné odstranit vodu umožňuje recyklaci i ve vlhkém prostředí. Takto zpracovaný materiál vykazoval dobré vlastnosti i po pěti krocích přepracování. Ke stejným vý-

sledkům došla také studie Kuan-Hua Sa a kol. ,kde šestnáct cyklů daleko přesáhlo běžnou průmyslovou praxi. [21,22,23]



Obrázek 12: Index toku taveniny v závislosti na počtu cyklů [23]



## 5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

V úvodní sekci této diplomové práce byly diskutovány základy polymerních materiálů, kde bylo popsáno jejich rozdělení s následným popisem jednotlivých druhů, jejich využitím a určením typických příkladů. Dále byly v této části podrobněji popsány materiály PC a PA, se kterými se následně pracuje v praktické části.

Druhá část se zabývala polymerním odpadem. V této části byl přiblížen vznik odpadu a zejména pak jeho rozdělení podle složení. Také zde byla popsána základní mechanická úprava odpadu.

Třetí část byla zaměřena na samotnou recyklaci, kdy byl nejdříve diskutován základní princip recyklace. Poté byly určeny jednotlivé druhy recyklací s větším zaměřením na recyklaci materiálů. V závěru této části bylo diskutováno ekologické a ekonomické zhodnocení recyklace.

Poslední část rozebírala výsledky různých studií, jež se zabývaly obdobným tématem jako tato práce.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍL PRÁCE

Hlavní cíl práce lze rozdělit na dvě části. První se zabývala tím, jak se mění mechanické a fyzikální vlastnosti s přibývajícím počtem přepracování u vstřikování. V této části se pracovalo s PA. V druhé části se pracovalo s PC. Zde se zkoumal vliv množství obsahu recyklovaného PC v čistém PC, opět na mechanické a fyzikální vlastnosti.

Jednotlivé cíle práce lze shrnout do těchto bodů.

- 1) Příprava a zpracování recyklátu PC
- 2) Příprava směsi s různým podílem recyklátu PC
- 3) Sušení materiálů
- 4) Několikanásobné vstřikování a drcení materiálu PA
- 5) Výroba zkušebních tělísek vstřikováním
- 6) Měření lesku před a po lakování materiálu PC
- 7) Měření reologických vlastností u materiálu PC a PA
- 8) Měření mechanických vlastností u materiálu PC a PA
- 9) Statické vyhodnocení dat
- 10) Diskuze a závěreční vyhodnocení

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Skladba experimentální části je provedena tak, aby bylo dosaženo vytyčených cílů práce.

### 7.1 Použité materiály a příprava směsí

Pro potřeby experimentu byly vybrány dva polymery, kdy jeden zástupce je amorfní – polykarbonát (PC) a druhý semikrystalický - polyamid (PA). Oba materiály byly dodány spolupracující firmou, která vstřikuje dílce pro automobilový průmysl a to jak dílce pohledové, tak dílce technické.

#### 7.1.1 Polykarbonát

Dodaný materiál byl PC s obchodním názvem Apec 1795 s hodnotou smrštění 0,8 %. V druhém kroku byl dodán odpadní materiál. Jednalo se o vstřikované a následně pokovené výrobky. Tyto výrobky byly zbaveny nečistot a poté drceny v laboratorním nožovém mlýnu (Obrázek 14) na drť o velikosti částic 4-8 mm (Obrázek 13). [26]



Obrázek 13: Drť recyklátu PC

Tato drť byla pak přimíchána v různém poměru k čistému PC. Takto bylo namícháno celkem 6 směsí od 100 % čistého PC po 100 % recyklát. Směsi byly promíchány ručně, opakovaně přesypány a opět míchány. Složení směsí je uvedeno v tabulce níže (Tabulka 3).

*Tabulka 3: Označení jednotlivých směsí materiálu PC*

Označení	Čistý granulát	Recyklát
PC_1	100%	0%
PC_2	90%	10%
PC_3	85%	15%
PC_4	80%	20%
PC_5	70%	30%
PC_6	0%	100%

### 7.1.2 Polyamid

Celkem byly zvoleny dva typy polyamidů. V prvním případě se jednalo o PA6 s obchodním názvem C218 V30 vyráběný firmou Technyl. Tento PA je vyztužen z 30 % skelnými vlákny. Jako druhý materiál byl vybrán PA66 s obchodním názvem A218 V50 opět od firmy Technyl. Obsah skelných vláken je v tomto případě 50 %. Oba tyto materiály vykazují dobré mechanické vlastnosti a jsou využívány v mnoha odvětvích průmyslu, zejména pro technické dílce v automobilovém průmyslu.

V obou případech probíhala příprava směsí stejně. Nejdříve byly připraveny výrobky-zkušební tělesa z čistého granulátu. Část těchto výrobků byla odebrána a výrobky byly označeny jako čistý polymer. U zbytku výrobků došlo k regranulaci v podobě mletí v nožovém mlýnu. Výsledná drť byla připravena k opětovnému vstřikování. Tento cyklus opakujícího se mletí a vstřikování proběhl celkem desetkrát, kdy po každém třetím cyklu byla odebrána část vzorků k testování. Výsledkem této části byly tedy dvě série (PA6, PA66) po čtyřech skupinách zkušebních těles: čistý granulát, 3xdrť (4.vstřik), 6xdrť (7.vstřik), 9xdrť (10.vstřik). Označení jednotlivých směsí, resp. skupin zkušebních těles je uvedeno v Tabulka 4.

Tabulka. 4: Označení jednotlivých směsí materiálu PA

Označení	Materiál	Stav
PA66_1	A218 V50	čistý granulát
PA66_2	A218 V50	3xdrceno (4. vstřík)
PA66_3	A218 V50	6xdrceno (7. vstřík)
PA66_4	A218 V50	9xdrceno (10. vstřík)
PA6_1	C218 V30	čistý granulát
PA6_2	C218 V30	3xdrceno (4. vstřík)
PA6_3	C218 V30	6xdrceno (7. vstřík)
PA6_4	C218 V30	9xdrceno (10. vstřík)



Obrázek 14: Laboratorní nožový mlýn

## 7.2 Příprava zkušebních těles

Oba zkoušené materiály můžeme zařadit mezi navlhavé. Obsah vlhkosti v hmotnostních procentech je u PC 0,5-1 %, u PA6, PA66 více než 2 %. Z tohoto důvodu bylo potřeba zařadit před samotným vstřikováním proces sušení. To znamená zbavit materiál absorbované vlhkosti, neboť přítomnost vody se projevuje se problémy při vstřikování, zhoršováním kvality povrchu výrobků i poklesem mechanických vlastností. [3]

Proto byla použita sušárna Memmert UN55. Materiál PC byl sušen po dobu 12 hodin při teplotě 100 °C. Materiály PA6 a PA66 po dobu 12 hodin při teplotě 80°C.

Jak bylo zmíněno výše, zkušební tělesa byla připravena pomocí technologie vstřikování na vstřikovací stroji Mitsubishi 180MEtIII. Byla použita dvounásobná vstřikovací forma ve tvaru lopatky dle normy ČSN EN ISO 527-1. Část těchto lopatek pak byla dále upravena na zkušební tělesa – tyčinky, dle požadavků normy ČSN EN ISO 179.

Dále byla vstřikována zkušební tělesa pro měření lesku. Jednalo se o kvádry se čtvercovou postavou 110 mm a tloušťkou 2 mm (Obrázek 15).

Procesní podmínky nastavené na stroji vycházely z materiálových listů dodávaných výrobcem (Tabulka. 5).

*Tabulka 5: Procesní podmínky vstřikování zkušebních těles*

Vstřikovací parametry	Materiál	
	PA	PC
Vstřikovací rychlost [mm/s]	80	90
Vstřikovací tlak [Mpa]	80	80
Dotlak [Mpa]	50	60
Doba dotlaku [s]	4	6
Doba chlazení [s]	16	20
Teploty plastikační jednotky		
Pásmo 1 (tryska) [C°]	240	330
Pásmo 2 [C°]	245	340
Pásmo 3 [C°]	240	335
Pásmo 4 [C°]	225	330
Pásmo 5 [C°]	220	320
Teplota pod násypkou [C°]	50	60



*Obrázek 15: Zkušební těleso pro měření lesku*

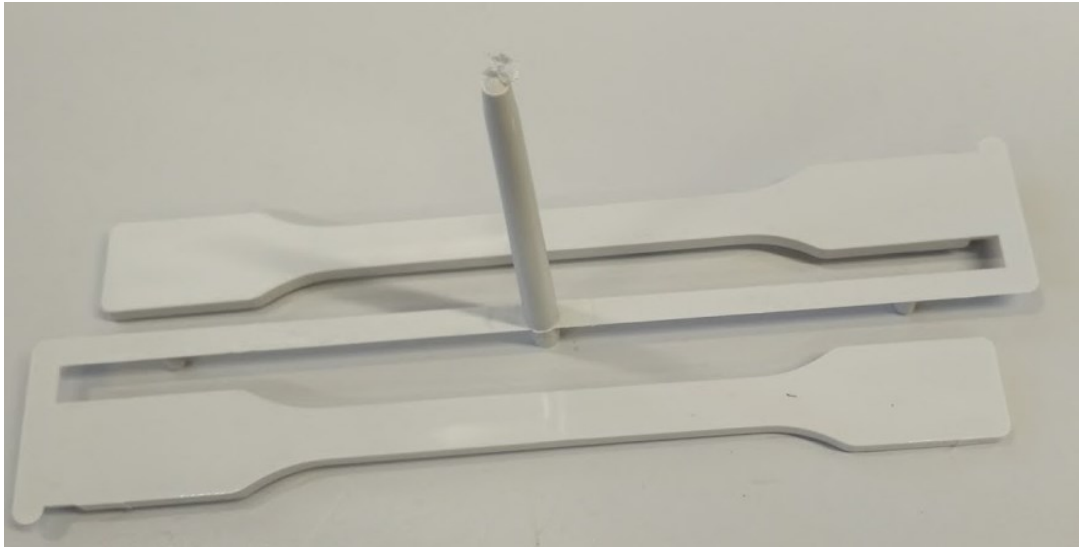
### **7.3 Provedené zkoušky**

Práce se zaměřuje zejména na popis mechanických, optických a zpracovatelských (kapilární viskozimetrie) vlastností.

#### **7.3.1 Zkouška tahem**

Statická zkouška byla provedena pomocí univerzálního zkušebního trhacího stroje ZWICK 1456 za pokojové teploty 23°C. Zkouška probíhala dle normy ČSN EN ISO 527-1 [24] při rychlosti odtahu příčnicku 50 mm/min. Pro materiál PC bylo pro každý vzorek provedeno 15 měření pro následné statické vyhodnocení. U materiálu PA se jednalo o 10 měření na jeden vzorek-směs. Vyhodnocené veličiny byly modul pružnosti v tahu  $E$  a mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$ .





Obrázek 16: Zkušební tělíska pro tahovou zkoušku

### 7.3.2 Zkouška vrubové houževnatosti

Hodnoty vrubové houževnatosti byly zjištěny na zkušebním přístroji Resil Impactor junior dle normy ČSN EN ISO 179 [25]. Měření probíhalo opět za pokojové teploty 23°C. Tělíska byly před samotnou zkouškou opatřeny vrubem tvaru V o velikosti 2 mm. Vyhodnocovanou hodnotou byla maximální rázová síla  $F_{\max}$  a celková práce (energie) potřebná k přeražení vzorku Ab.



Obrázek 17: Zkušební tělíska pro zkoušku vrubové houževnatosti

### 7.3.3 Měření tokových vlastností

V této části bylo cílem práce získat závislost viskozity  $\eta$  [Pa\*s] na rychlosti smykové deformace  $\dot{\gamma}$  [ $s^{-1}$ ]. K tomu byl použit kapilární reometr Goetfert GR 50 (Obrázek 18.). Ten se používá pro měření viskozity polymerních tavenin při vysokých smykových rychlostech. V tomto případě se jednalo o rozmezí rychlosti od  $30 s^{-1}$  do  $2000 s^{-1}$  kdy měření probíhalo sestupně, vždy od nejvyšší po nejnižší rychlost. Měření probíhalo také při dvou různých

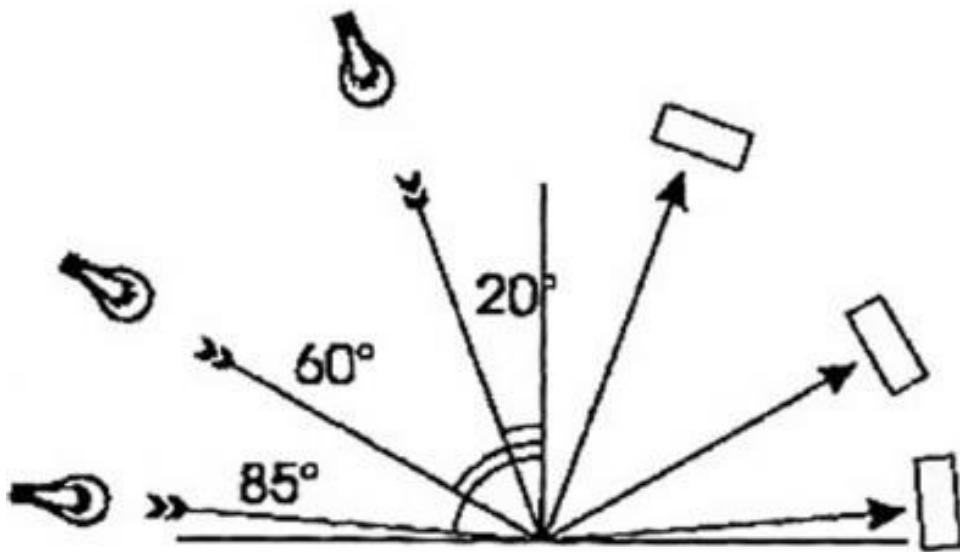
teplotách dle měřeného materiálu. Pro standartní měření tokových charakteristik byla použita dlouhá kapilára s průměrem  $D = 1$  mm a poměrem  $L/D = 20/1$ . Materiál byl do válců vkládán ve formě granulí (nebo drceného regranulátu) s postupným stlačováním tak, aby bylo zamezeno vzniku vzduchových bublin. Poté byly vzorky při malém zatížení prohřívány po dobu 10 minut z důvodu roztavení polymeru v celém objemu. Teprve poté byl test spuštěn.



*Obrázek 18: Kapilární reometr GR 50*

#### **7.3.4 Měření lesku**

Míru lesku lze určit jako poměr mezi dopadajícím a odraženým zářením. Měření lesku je založeno na principu měření intenzity odraženého záření s různou geometrií. Standardní geometrie bývá  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  a  $85^\circ$  (Obrázek 19). Výsledná hodnota je v jednotkách GU, kdy 100 GU odpovídá úrovni černého skla o indexu lomu 1,567. [27]

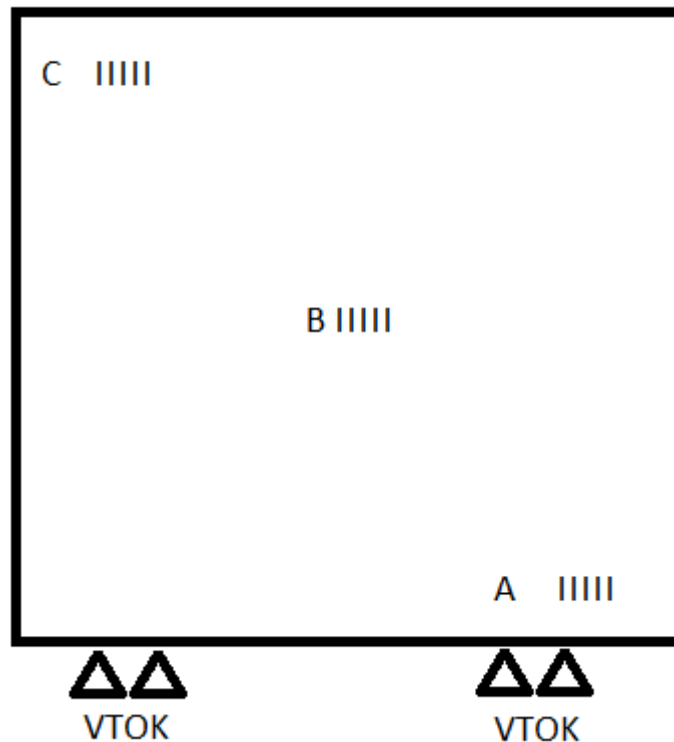


Obrázek 19: Standartní geometrie přístrojů pro měření lesku

Měření probíhalo pomocí leskoměru NHG od firmy 3nh (Obrázek 20), který odpovídá normě ISO 2813. Míra lesku byla měřena pouze u materiálu PC. Pro každou směs byla zhotovena 3 testovací tělesa. Každé testovací těleso bylo měřeno 5krát na třech různých místech, s ohledem na jejich vzdálenosti od vtoku, označených jako A, B, C (Obrázek 21). Celkem bylo získáno 15 hodnot pro jeden vzorek a 45 hodnot pro každou směs. Pro všechna měření byly použity všechny tři standartní geometrie, ale pro reálné vyhodnocení je dle [27] vhodné posuzovat vzorky dle úhlu  $20^\circ$  pro vysoce reflexní povrchy a úhlu  $85^\circ$  naopak pro povrchy matné. Po získání všech hodnot byly zkušební vzorky pokoveny a proběhlo totožné měření ještě jednou.



Obrázek 20: Leskoměr NHG



Obrázek 21: Polohy měření lesku

#### 7.4 Skenovací elektronová mikroskopie

SEM měření bylo provedeno pouze na vzorcích PA6 a PA66. Toto měření proběhlo za účelem určení míry lámání vláken. Připravené směsi byly vypáleny v muflové peci při teplotě 600°C. Poté byly pořízeny snímky na dvou zařízeních (Phenom PRO a Tescan Vega LMU2).

#### 7.5 Statické vyhodnocení dat

Statické vyhodnocení dat i jejich grafická interpretace byla provedena v programu MS Excel 2010.

V grafech jsou zobrazeny hodnoty reprezentující aritmetický průměr naměřených dat spolu s chybovou úsečkou charakterizující směrodatnou odchylku. Obě veličiny byly vypočítány dle rovnic uvedených níže.

### *Aritmetický průměr*

Udává odhad střední hodnoty statického souboru dat. Je definován jako součet hodnot všech proměnných ( $x_i$ ) vydělený celkovým počtem proměnných ( $n$ ). [28]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

### *Směrodatná odchylka*

Udává kvadratický průměr odchylek od hodnot  $x_i$  od jejich aritmetického průměru. [28]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

### *Variační koeficient*

Variační koeficient je definovaná jako poměr směrodatné odchylky a absolutní odchylky ze střední hodnoty. Udává se v procentech pro bezrozměrné vyjádření. [28]

### *Maximum/minimum*

Udává maximální a minimální naměřenou hodnotu vyskytující se ve statistickém souboru dat. [28]

## 8 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 8.1 Výsledky a diskuze pro materiál PC

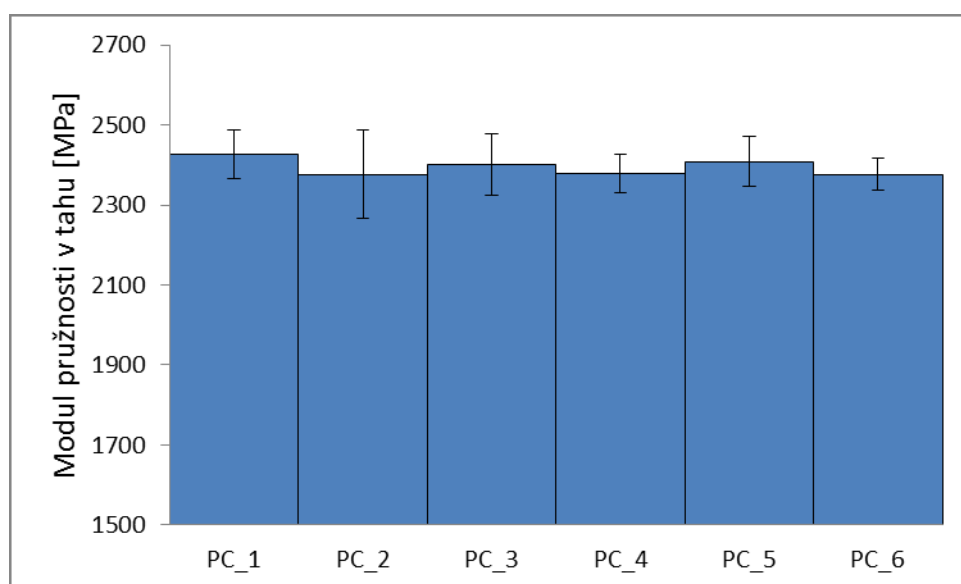
U materiálu PC byla zjišťována změna vlastností v závislosti na obsahu recyklátu v čistém materiálu.

#### 8.1.1 Modul pružnosti v tahu pro materiál PC

V Tabulce 6 a na Obrázku 21 můžeme vidět hodnoty modulu pružnosti v tahu pro materiál PC s různým obsahem recyklátu v čistém materiálu. Z těchto dat vyplynulo, že obsah recyklátu nemá téměř žádný vliv na modul pružnosti v tahu. Nejlépe to lze pozorovat při porovnání 100 % čistého materiálu a 100 % recyklátu, kde rozdíl aritmetických průměrů je 49 MPa tedy asi jen 2 % .

Tabulka 6: Naměřená data modulu pružnosti pro materiál PC

Označení materiálu	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5	PC_6
Aritmetický průměr [MPa]	2426	2376	2401	2378	2408	2377
Směrodatná odchylka [MPa]	61	110	77	48	63	41
Variační koeficient [%]	2,5	4,7	3,2	2,0	2,6	1,7
Max. hodnota [MPa]	2500	2590	2480	2480	2550	2460
Min. hodnota [MPa]	2310	2130	2190	2310	2330	2300



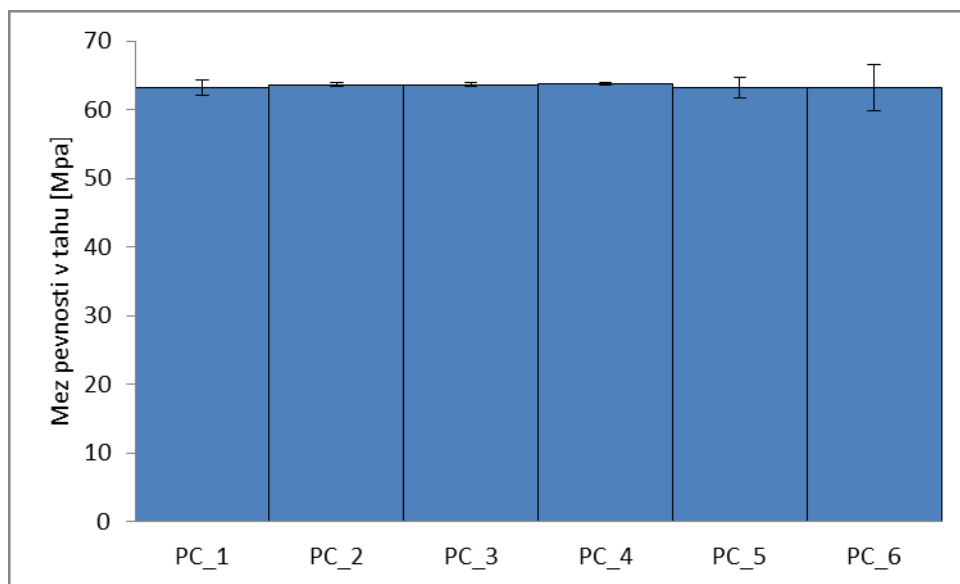
Obrázek 21: Modul pružnosti v tahu pro materiál PC

### 8.1.2 Mez pevnosti v tahu pro materiál PC

Z dalších hodnot zjišťovaných pomocí tahové zkoušky byla mez pevnosti. Z výsledků těchto měření lze opět pozorovat, že obsah recyklátu nemá vliv na tuto hodnotu. Hodnoty aritmetických průměrů všech zkušebních materiálů jsou v rámci desetin MPa shodné.

Tabulka 7: Naměřená data meze pevnosti v tahu pro materiál PC

Označení materiálu	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5	PC_6
Aritmetický průměr [MPa]	63,2	63,6	63,6	63,7	63,2	63,2
Směrodatná odchylka [MPa]	1,2	0,3	0,3	0,2	1,5	3,3
Variační koeficient [%]	1,9	0,5	0,5	0,3	2,4	5,3
Max. hodnota [MPa]	64,5	64,2	64,2	64,0	64,2	65,0
Min. hodnota [MPa]	62,2	62,9	63	63,4	57,7	54,0



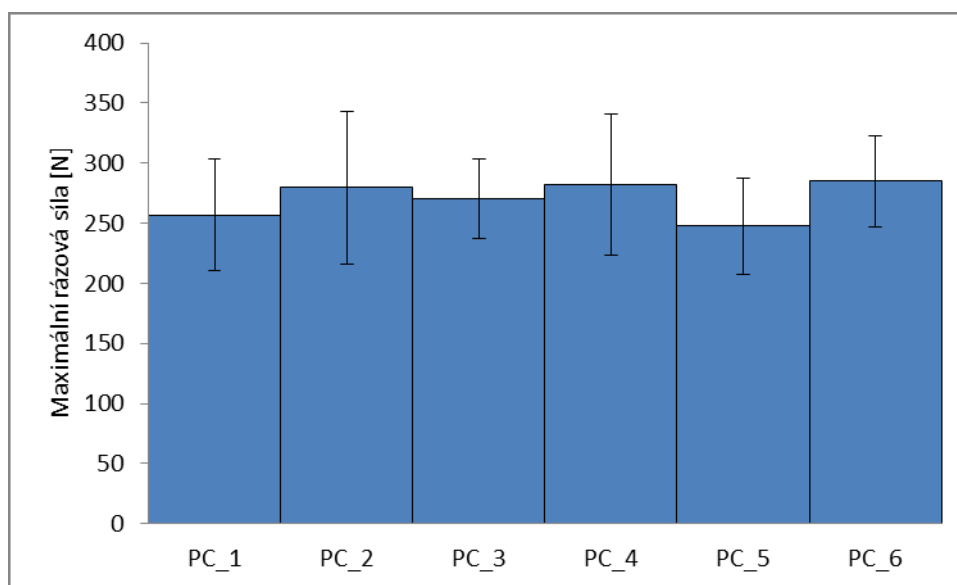
Obrázek 22: Mez pevnosti v tahu pro materiál PC

### 8.1.3 Maximální rázová síla pro materiál PC

Další mechanickou zkouškou byla zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy. Výsledky tohoto měření nejsou tak přesné jako u zkoušky tahem (data mají značný rozptyl). U měření maximální rázové síly se hodnoty variačního koeficientu pohybovaly v rozmezí 13,29 až 22,57 (Tabulka 8). I tak lze z těchto výsledků pozorovat, že vliv recyklátu v čistém materiálu nemá vliv na hodnotu maximální rázové síly.

Tabulka 8: Naměřená data pro maximální rázovou sílu pro materiál PC

Označení materiálu	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5	PC_6
Aritmetický průměr [N]	257,01	279,58	270,52	282,21	247,76	285,00
Směrodatná odchylka [N]	46,20	63,10	33,12	59,16	40,22	37,89
Variační koeficient [%]	17,98	22,57	12,24	20,96	16,23	13,29
Max. hodnota [N]	330,78	411,24	321,25	360,00	312,90	332,56
Min. hodnota [N]	208,00	192,51	216,94	194,29	195,49	231,25



Obrázek 23: Maximální rázová síla pro materiál PC

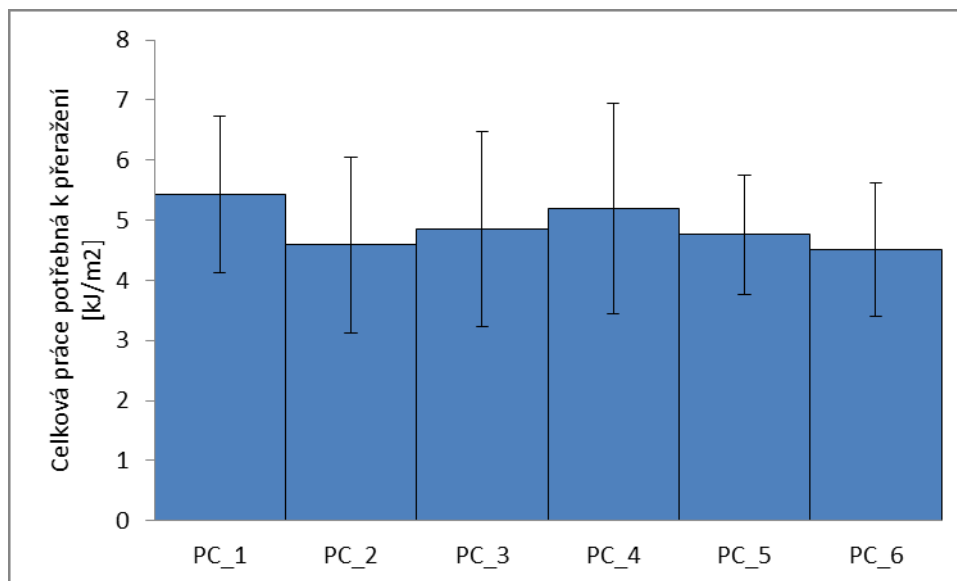
#### 8.1.4 Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PC

Stejně jako u výsledků maximální rázové síly, tak i u hodnot celkové práce potřebné k přeražení materiálu jsou hodnoty méně přesné a variační koeficienty všech výsledků přesahují 20 %. Přesto však lze opět konstatovat, že vliv recyklátu v čistém materiálu nemá vliv na změnu této hodnoty.

Tabulka 9: Naměřená data celkové práce potřebné k přeražení pro materiál PC

Označení materiálu	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5	PC_6
Aritmetický průměr [kJ/m <sup>2</sup> ]	5,43	4,59	4,85	5,20	4,76	4,52
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	1,30	1,46	1,61	1,76	1,00	1,11
Variační koeficient [%]	23,86	31,85	33,25	33,80	20,93	24,62
Max. hodnota [kJ/m <sup>2</sup> ]	6,84	6,48	6,71	7,01	6,21	5,94
Min. hodnota [kJ/m <sup>2</sup> ]	2,6	2,4	2,45	2,21	2,54	2,39





Obrázek 24: Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PC

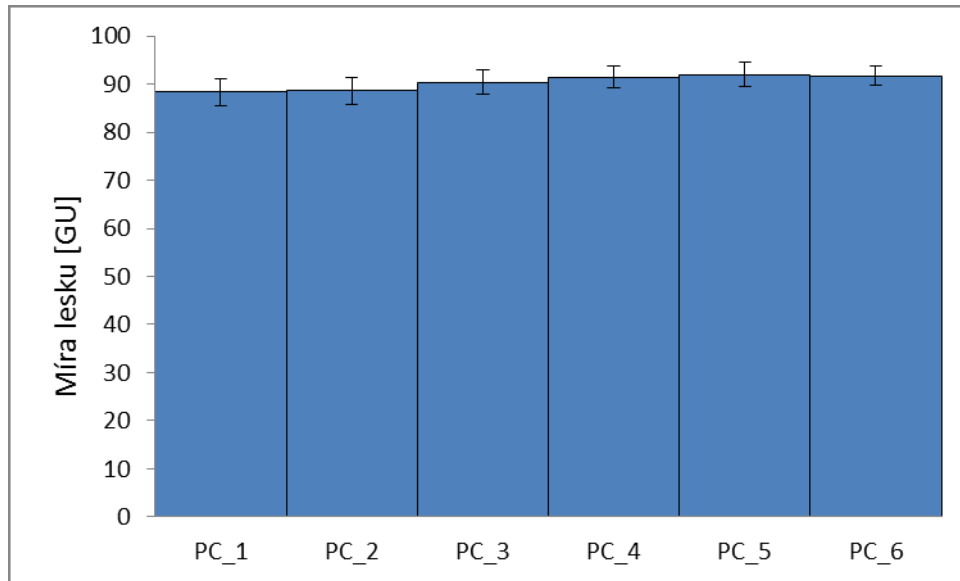
### 8.1.5 Míra lesku pro materiál PC

Jak bylo zmíněno výše, pro měření lesku bylo použito všech tří geometrií: 20°, 60°, 85°. Za normálních podmínek je využívána geometrie 60°. Pokud však při této geometrii dojde k překročení hodnoty 70GU, jedná se o vysoce lesklý materiál a pro reálné vyhodnocení dat je vhodné vzorky posuzovat dle úhlu 20°. Toto platí pro oba měřené typy zkušebních těles (pokovené i nepokovené). [27]

Z Tabulky 10 lze vyvodit dva závěry. První nám ukazuje, že míra lesku není závislá na vzdálenosti od vtoku. Toto platí u všech zkušebních těles. Druhý závěr říká, že i přes minimální zvyšování míry lesku se zvyšujícím se obsahem recyklátu, jedná se o rozdíl nepatrný a lze tedy konstatovat, že míra lesku je konstantní při jakémkoli množství obsahu recyklátu.

Tabulka 10: Naměřená data míry lesku pod úhlem 20° pro nepokovený materiál PC

Označení materiálu	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5	PC_6
Poloha A	88,41	89,77	89,91	91,55	92,89	91,55
Poloha B	88,81	89,93	90,62	91,63	92,63	92,45
Poloha C	87,92	86,11	90,73	91,22	90,32	90,99
Aritmetický průměr [GU]	88,38	88,60	90,42	91,47	91,94	91,66
Směrodatná odchylka [GU]	2,84	2,77	2,50	2,36	2,58	1,98
Variační koeficient [%]	3,22	3,13	2,77	2,58	2,81	2,16
Max. hodnota [GU]	93,80	95,10	95,80	96,00	97,60	95,20
Min. hodnota [GU]	79,30	80,80	81,40	81,80	85,40	84,20

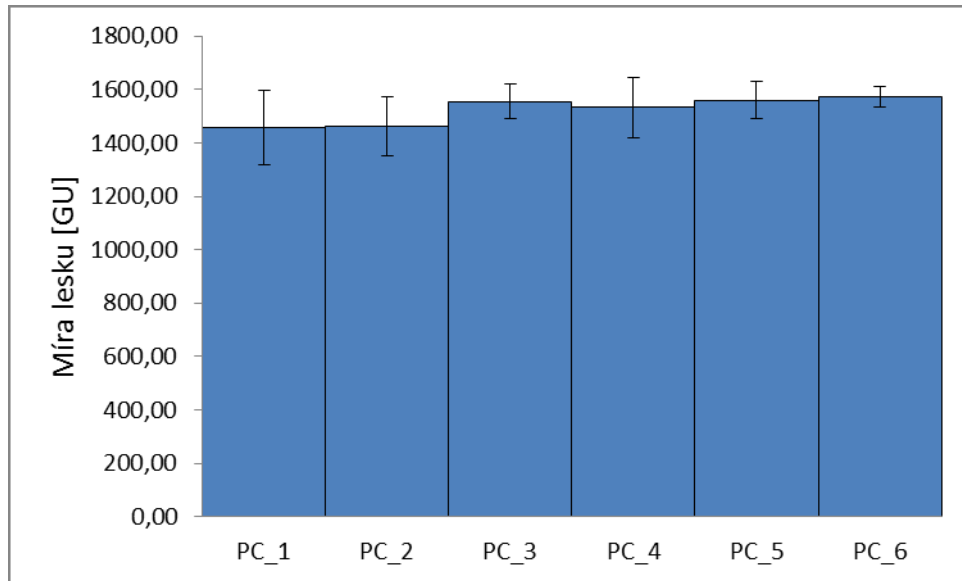


Obrázek 25: Míra lesku pro nepokovený materiál PC

U pokovených zkušebních těles došlo automaticky ke zvýšení lesku oproti nepokoveným zkušebním tělesům. Toto zvýšení bylo totožné na všech měřených vzorcích. Proto lze konstatovat stejný závěr jako u materiálu nepokoveného a to, že míra lesku se s přibývajícím se obsahem recyklátu v čistém materiálu výrazně nemění, lze však pozorovat jistý trend zvyšování lesku.

Tabulka 11 : Naměřená data míry lesku pod úhlem 20° pro pokovený materiál PC

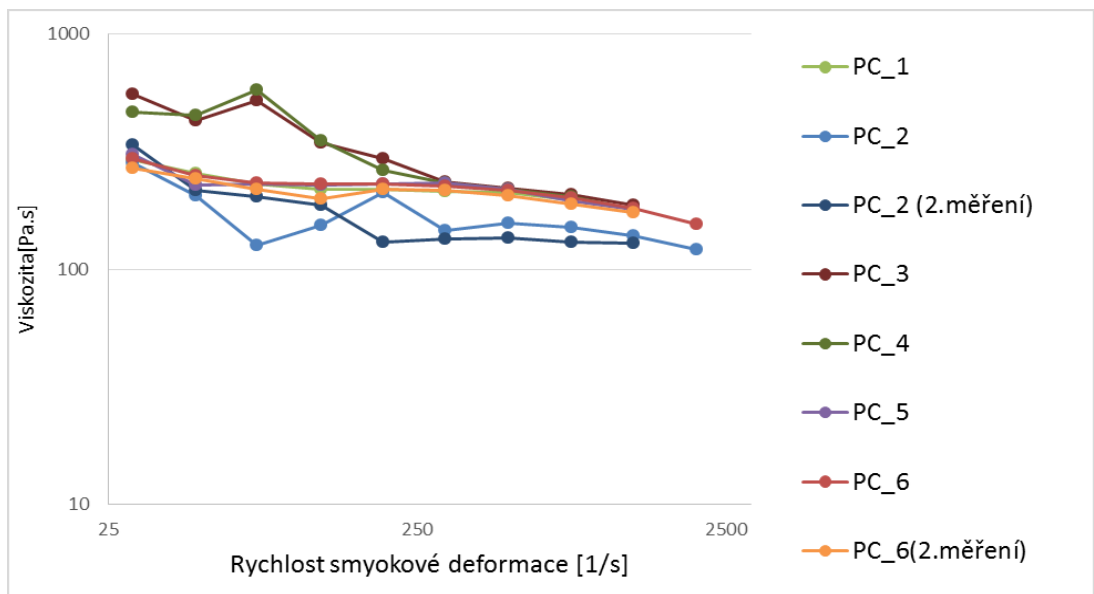
Označení materiálu	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5	PC_6
Poloha A	1445	1412	1535	1544	1513	1560
Poloha B	1446	1464	1588	1536	1611	1607
Poloha C	1479	1510	1541	1515	1552	1552
Aritmetický průměr [GU]	1456	1462	1555	1532	1559	1573
Směrodatná odchylka [GU]	139	109	66	112	70	38,79
Variační koeficient [%]	9,59	7,49	4,27	7,35	4,52	2,46
Max. hodnota [GU]	1655	1655	1708	1685	1664	1651
Min. hodnota [GU]	1069	1217	1329	1483	1394	1489



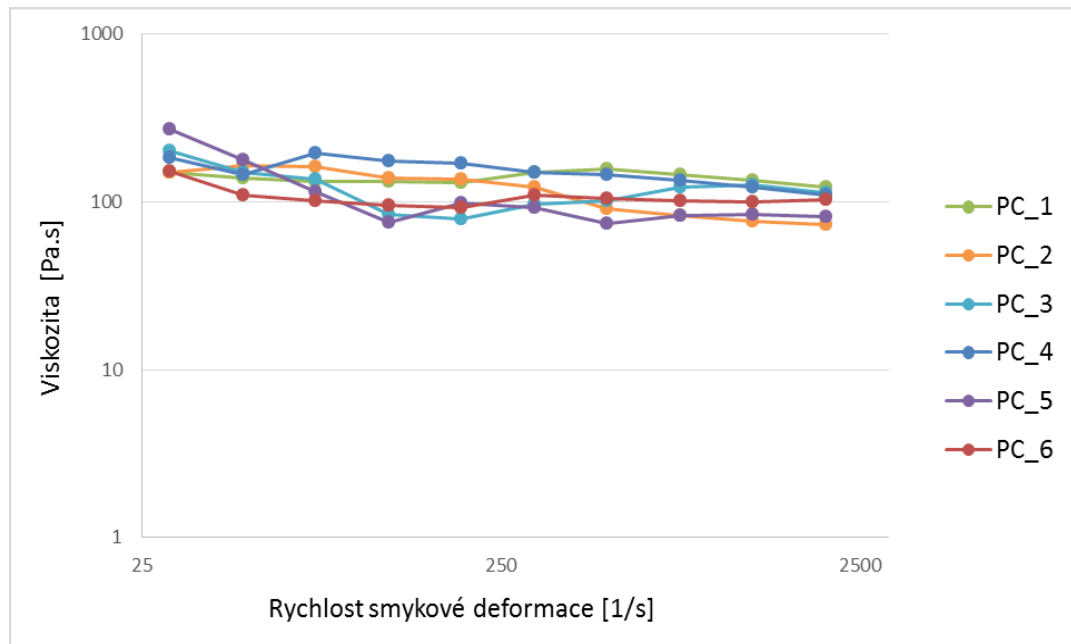
Obrázek 26: Míra lesku pro pokovený materiál PC

### 8.1.6 Tokové vlastnosti pro materiál PC

V této části byla měřena závislost viskozity na rychlosti smykové deformace. Měření probíhalo pro dvě různé teploty (330°C a 340°C).



Obrázek 27: Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace při teplotě 330°C



Obrázek 28: Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace při teplotě 340°C

Pro obě teploty a pro všechny zkušební vzorky platí, že viskozita s rostoucí smykovou deformací klesá. Jedná se tedy o chování pseudoplastické. Z výsledků je také patrné, že při nižších teplotách dosahovala viskozita při stejné smykové deformaci vyšších hodnot.

Na Obrázku 28 lze pozorovat při rychlosti smykové deformace  $25 \text{ s}^{-1}$ , že nejvyšší viskozitu má vzorek PC\_5, nejnižší pak shodně vzorky PC\_1, PC\_2 a PC\_6. Při rychlosti smykové deformace  $2500 \text{ s}^{-1}$  dosahuje viskozita nejvyšší hodnoty u vzorku PC\_1, nejnižší PC\_2. Z těchto výsledků lze konstatovat, že obsah recyklátu nemá výrazný vliv na tokové vlastnosti materiálu. Obecně lze však konstatovat, že výsledky jsou značně nestabilní, zejména při nižších rychlostech smykových deformací. Avšak vstřikování probíhá při vyšších rychlostech a není tedy předpokládáno, že bude docházet k tokovým nestabilitám při vstřikování. Tato skutečnost byla potvrzena při poloprovozních zkouškách směsi PC\_5, která byla použita pro vstřikování reálného výrobku z produkce kooperující firmy. Procesní parametry nebylo třeba měnit (při vstřikování čistého PC – směs PC\_1 a tedy zmíněné PC\_5). Vstřikované dílce jsou zobrazeny na Obrázek 29.)



Obrázek 29: Vstříkovaný dílec

### 8.1.7 Rozměrová stabilita pro materiál PC

Jak bylo zmíněno kooperující firmou, byly zhotoveny procesem vstříkování dva finální výrobky. Pro výrobu prvního byla použita směs PC\_1 (čistý materiál), pro druhý směs PC\_5 (příměs 30 % recyklátu v čistém materiálu). Poté byla provedena kontrola 15 hodnot resp. parametrů. Toto měření bylo prováděno ve firmě na tří-osém dotykovém měřicím centru. Hodnoty těchto parametrů jsou zobrazeny na Obrázku 30 a 31.

Pos. Item	Dimension / Spezifikation Dimension / Specification			Meß- mittel Meas. Equip.	Spec. Char. Spec. Char.	Meßergebnisse von Lieferant Supplier Measurement Results					i. O. OK	n.I.O. not OK
						Teil / Part						
Formnest-Nr. / Cavity No.:						1	2	3	4	5		
LH												
1a	2,5	0,1	-0,1	SC		2,54	2,54	2,53	2,53	2,55	x	
1b	2,5	0,1	-0,1	SC		2,34	2,31	2,31	2,33	2,32		x
2a	2,5	0,1	-0,1	SC		2,77	2,76	2,77	2,74	2,76		x
2b	2,5	0,1	-0,1	SC		2,56	2,56	2,54	2,56	2,55	x	
3	2	0,1	-0,1	PP		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	x	
4	14,5	0,1	-0,1	PP		14,42	14,43	14,41	14,44	14,42	x	
5x	2,3	0,1	-0,1	SC		2,32	2,30	2,30	2,32	2,31	x	
5y	2,3	0,1	-0,1	SC		2,39	2,37	2,35	2,38	2,36	x	
6x	6	0,1	-0,1	PP		6,05	6,04	6,03	6,05	6,04	x	
6y	6	0,1	-0,1	PP		6,26	6,29	6,30	6,26	6,28		x
7	Alteration					OK	OK	OK	OK	OK	x	
8	AL- Logo - A6					OK	OK	OK	OK	OK	x	
9	Date grid - T1 / 12,5					OK	OK	OK	OK	OK	x	
10	Material identification acc. to DIN 1451-H4					OK	OK	OK	OK	OK	x	
11	Handside identification Acc. To DIN 1451-H4					OK	OK	OK	OK	OK	x	
12	Part number acc. To DIN 1451-H3					OK	OK	OK	OK	OK	x	
13	metallized acc. to 1 309 919 139...					OK	OK	OK	OK	OK	x	
						Díl splňuje požadavky na korozní odolnost dle DIN50017 (48hod) a NaOH test. Tloušťky vrstev nejsou průkazně měřitelné, body 3, 4, 5.1 předpisu 1309919138 viz. příloha č.1 - odchylky od normy viz. příložený text.						
14	visual quality acc. To AL CP 577					OK	OK	OK	OK	OK	x	
15	PC - HT APEC 1795/Grey					OK	OK	OK	OK	OK	x	

Obrázek 30: Rozměrová stabilita výrobku pro materiál PC\_1

Pos. Item	Dimension / Spezifikation Dimension / Specification			Meß- mittel Meas. Equip.	Spec. Char. Spec. Char.	Meßergebnisse von Lieferant Supplier Measurement Results					i. O. OK	n.i.O. not OK
						Teil / Part						
Formnest-Nr. / Cavity No.:						1	2	3	4	5		
LH												
1a	2,5	0,1	-0,1	SC		2,54	2,53	2,54	2,53	2,54	x	
1b	2,5	0,1	-0,1	SC		2,33	2,32	2,31	2,33	2,32		x
2a	2,5	0,1	-0,1	SC		2,75	2,77	2,77	2,74	2,76		x
2b	2,5	0,1	-0,1	SC		2,55	2,54	2,54	2,55	2,55	x	
3	2	0,1	-0,1	PP		2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	x	
4	14,5	0,1	-0,1	PP		14,43	14,43	14,42	14,44	14,42	x	
5x	2,3	0,1	-0,1	SC		2,31	2,30	2,32	2,32	2,30	x	
5y	2,3	0,1	-0,1	SC		2,37	2,39	2,35	2,36	2,36	x	
6x	6	0,1	-0,1	PP		6,04	6,05	6,03	6,03	6,04	x	
6y	6	0,1	-0,1	PP		6,28	6,30	6,30	6,28	6,28		x
7	Alteration					OK	OK	OK	OK	OK	x	
8	AL- Logo - A6					OK	OK	OK	OK	OK	x	
9	Date grid - T1 / 12,5					OK	OK	OK	OK	OK	x	
10	Material identification acc. to DIN 1451-H4					OK	OK	OK	OK	OK	x	
11	Handside identification Acc. To DIN 1451-H4					OK	OK	OK	OK	OK	x	
12	Part number acc. To DIN 1451-H3					OK	OK	OK	OK	OK	x	
13	metallized acc. to 1 309 919 139...					OK	OK	OK	OK	OK	x	
						Díl splňuje požadavky na korozní odolnost dle DIN50017 (48hod) a NaOH test.						
						Tloušťky vrstev nejsou průkazně měřitelné, body 3, 4, 5.1 předpisu 1309919138 viz. příloha č.1 - odchylky od normy viz. příložený text.						
14	visual quality acc. To AL CP 577					OK	OK	OK	OK	OK	x	
15	PC - HT APEC 1795/Grey					OK	OK	OK	OK	OK	x	

Obrázek 31: Rozměrová stabilita výrobku pro materiál PC\_5

Jak lze z obrázků pozorovat všech 15 měřených rozměrů parametrů je u obou vzorků totožných: respektive vykazují shodné odchylky od výkresových rozměrů (což zřejmě odpovídá vadám formy). Závěrem lze tedy říct, že rozměrová stabilita u výrobku z čistého materiálu je stejná jako u výrobku, který obsahuje 30% recyklátu.

## 8.2 Výsledky a diskuze pro materiál PA

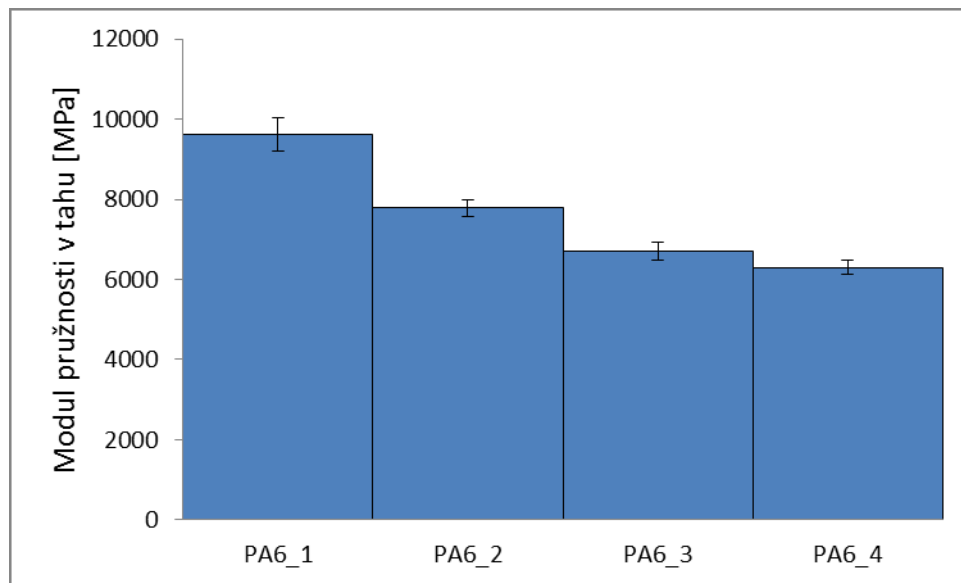
U materiálu PA byla zjišťována změna vlastností v závislosti na počtu přepracování u vstřikování. Konkrétně se jednalo o měření modulu pružnosti v tahu, maximální pevnosti v tahu, rázové houževnatosti a změn v tokovém chování jejich tavenin. Také byla provedena SEM mikroskopie.

### 8.2.1 Modul pružnosti v tahu PA

Porovnáním výsledků modulu pružnosti v tahu pro materiál PA6 je patrný jeho pokles s rostoucím počtem přepracování (Obrázek 32). Dále je z výsledků patrné, že s přibývajícím počtem přepracování se tento pokles snižuje. Po první třech přepracování došlo k poklesu o 24 %, po dalších třech o 16 %, a dalších třech o 7 %. Celkový pokles po deseti přepracováních je o 53 % z 9613 MPa na 6294 MPa.

Tabulka 12. Naměřená data modulu pružnosti pro materiál PA6

Označení materiálu	PA6_1	PA6_2	PA6_3	PA6_4
Aritmetický průměr [MPa]	9613	7777	6714	6294
Směrodatná odchylka [MPa]	423	193	225	176
Variační koeficient [%]	4,40	2,49	3,35	2,80
Max. hodnota [MPa]	10400	8090	7110	6680
Min. hodnota [MPa]	9100	7560	6300	6100

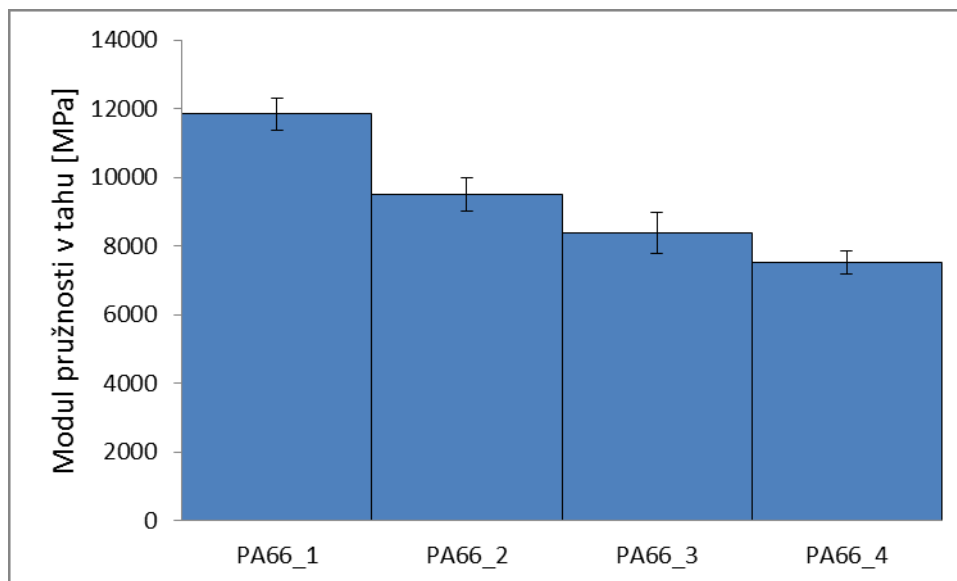


Obrázek 32: Modul pružnosti v tahu pro materiál PA6

Díky vyššímu obsahu skelných vláken dosahuje materiál PA66 vyšších hodnot modulu pružnosti v tahu oproti materiálu PA6. S přibývajícím počtem přepracování je však možné pozorovat opět pokles modulu pružnosti. Po první třech přepracování došlo k poklesu o 20 %, po dalších třech o 12 %, a dalších třech o 10 %. Po deseti přepracování klesl modul pružnosti o 57 %, z 11850 MPa na 7511 MPa.

Tabulka 13. Naměřená data modulu pružnosti pro materiál PA66

Označení materiálu	PA66_1	PA66_2	PA66_3	PA66_4
Aritmetický průměr [MPa]	11850	9501	8373	7511
Směrodatná odchylka [MPa]	463	499	598	336
Variační koeficient [%]	3,90	5,26	7,17	4,47
Max. hodnota [MPa]	12800	10400	9170	8020
Min. hodnota [MPa]	11500	8940	7340	6750



Obrázek 33: Modul pružnosti v tahu pro materiál PA66

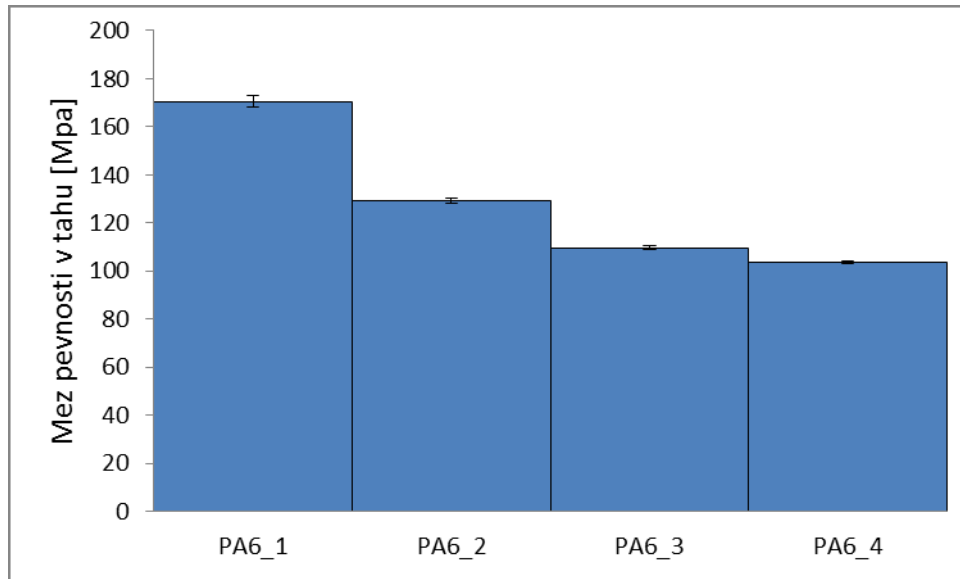
### 8.2.2 Mez pevnosti v tahu PA

Porovnáním výsledků meze pevnosti v tahu pro materiál PA6 je patrný jeho pokles s rostoucím počtem přepracování (Obrázek 34). Nejvyšší hodnota modulu pružnosti byla naměřena u materiálu vstříkovaného jednou (PA6\_1). Po první třech přepracování došlo k poklesu o 24%, po dalších třech o 15 %, a dalších třech o 5 %. Rozdíl mezi materiálem PA6\_1 a PA6\_4 je 65 %, tedy pokles z 170,6 MPa na 103,6 MPa.

Tabulka 14. Naměřená data meze pevnosti pro materiál PA6

Označení materiálu	PA6_1	PA6_2	PA6_3	PA6_4
Aritmetický průměr [MPa]	170,6	129,2	109,6	103,6
Směrodatná odchylka [MPa]	2,5	1,2	0,8	0,7
Variační koeficient [%]	1,5	0,9	0,7	0,7
Max. hodnota [MPa]	174,0	130,0	111,0	105,0
Min. hodnota [MPa]	165,0	126,0	108,0	103,0



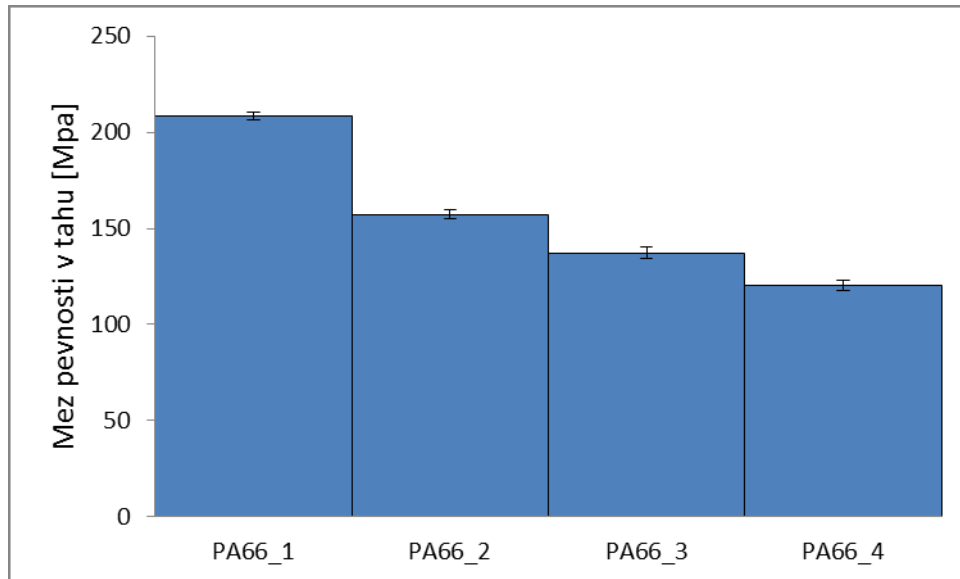


Obrázek 34: Mez pevnosti v tahu pro materiál PA6

Díky vyššímu obsahu skelných vláken dosahuje materiál PA66 vyšších hodnot meze pevnosti v tahu oproti materiálu PA6. S přibývajícím počtem přepracování je však možné pozorovat opět pokles modulu pružnosti. Po první třech přepracování došlo k poklesu o 24 %, po dalších třech o 13 %, a dalších třech o 12 %. Po deseti přepracování klesl modul pružnosti o 73 % ,z 208,2 MPa na 120,4 MPa.

Tabulka 15. Naměřená data meze pevnosti pro materiál PA66

Označení materiálu	PA66_1	PA66_2	PA66_3	PA66_4
Aritmetický průměr [MPa]	208,2	157,3	137,1	120,4
Směrodatná odchylka [MPa]	2,1	2,11	3,1	2,5
Variační koeficient [%]	1,0	1,3	2,3	2,1
Max. hodnota [MPa]	210,0	160,0	139,0	124,0
Min. hodnota [MPa]	204,0	154,0	130,0	116,0



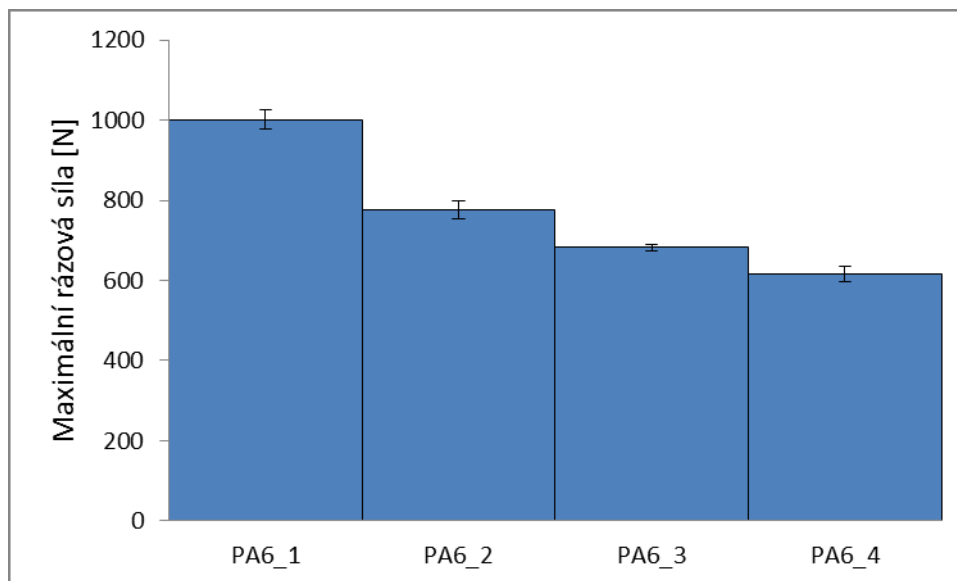
Obrázek 35: Mez pevnosti v tahu pro materiál PA66

### 8.2.3 Maximální rázová síla pro materiál PA

Při porovnání výsledků měření (Obrázek 36 a Tabulka 16) pro materiál PA6 bylo zjištěno, že maximální rázová síla s rostoucím počtem přepracování vstřikováním klesá. Dále je patrné, že s přibývajícím počtem přepracování, tento pokles klesá. Po prvních třech přepracování došlo k poklesu o 29 %, po dalších třech o 14 % a po dalších třech o 11 %. Celkový pokles po deseti přepracování je 63 %.

Tabulka 16: Naměřená data maximální rázové síly pro materiál PA6

Označení materiálu	PA6_1	PA6_2	PA6_3	PA6_4
Aritmetický průměr [N]	1001,22	776,63	682,63	615,94
Směrodatná odchylka [N]	23,10	21,46	7,67	19,75
Variační koeficient [%]	2,31	2,76	1,12	3,21
Max. hodnota [N]	1036,43	807,57	691,35	643,73
Min. hodnota [N]	966,70	739,63	670,49	590,63

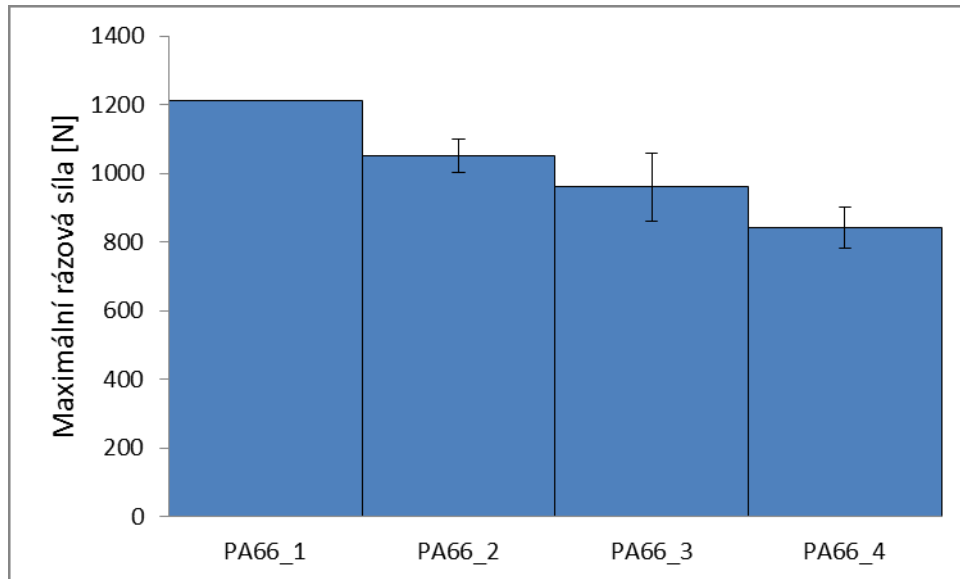


Obrázek 36: Maximální rázová síla pro materiál PA6

Vlivem vyššího počtu skelných vláken došlo ke zvýšení maximální rázové síly potřebné k přeražení materiálu pro materiál PA66 oproti materiálu PA6. Při získávání maximální hodnoty pro čistý materiál PA66\_1, došlo k překročení rozsahu měřícího přístroje a proto je potřeba brát tuto hodnotu pouze orientačně. Při porovnání výsledků (Obrázek 37) lze opět konstatovat, že s přibývajícím počtem přepracování vstřikováním dochází k poklesu maximální rázové síly. Po prvních třech přepracování došlo k poklesu o 13%, po dalších třech o 9% a po dalších třech o 13%. Celkový pokles po deseti přepracování byl 30%.

Tabulka 17: Naměřená data maximální rázové síly pro materiál PA66

Označení materiálu	PA66_1	PA66_2	PA66_3	PA66_4
Aritmetický průměr [N]	1211,66	1050,06	959,74	842,74
Směrodatná odchylka [N]	0	48,17	98,16	59,52
Variační koeficient [%]	0	4,59	10,23	7,06
Max. hodnota [N]	1211,66	1128,22	1034,65	917,83
Min. hodnota [N]	1211,66	999,48	764,66	752,14



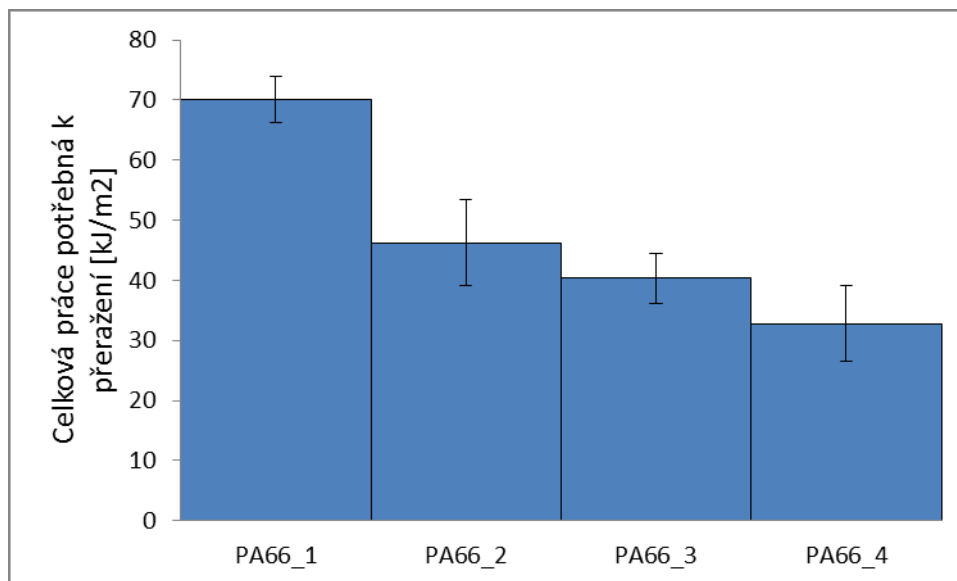
Obrázek 37: Maximální rázová síla pro materiál PA66

#### 8.2.4 Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PA

Porovnáním výsledků meze pevnosti v tahu pro materiál PA6 je patrný jeho pokles s rostoucím počtem přepracování (Obrázek 38). Nejvyšší hodnota modulu pružnosti byla naměřena u materiálu vstříkovaného jednou (PA6\_1). Po prvních třech přepracování došlo k poklesu o 34 %, po dalších třech o 13 % a po dalších třech o 20 %. Rozdíl mezi materiálem PA6\_1 a PA6\_4 je 53 %, tedy pokles ze 70,14 kJ/m<sup>2</sup> na 32,82 kJ/m<sup>2</sup>.

Tabulka 18: Naměřená data pro celkovou práci potřebnou k přeražení pro materiál PA6

Označení materiálu	PA66_1	PA66_2	PA66_3	PA66_4
Aritmetický průměr [kJ/m <sup>2</sup> ]	70,14	46,26	40,32	32,82
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	3,83	7,09	4,13	6,33
Variační koeficient [%]	5,46	15,33	10,24	19,27
Max. hodnota [kJ/m <sup>2</sup> ]	73,15	55,25	44,53	43,79
Min. hodnota [kJ/m <sup>2</sup> ]	63,97	38,21	33,06	24,6

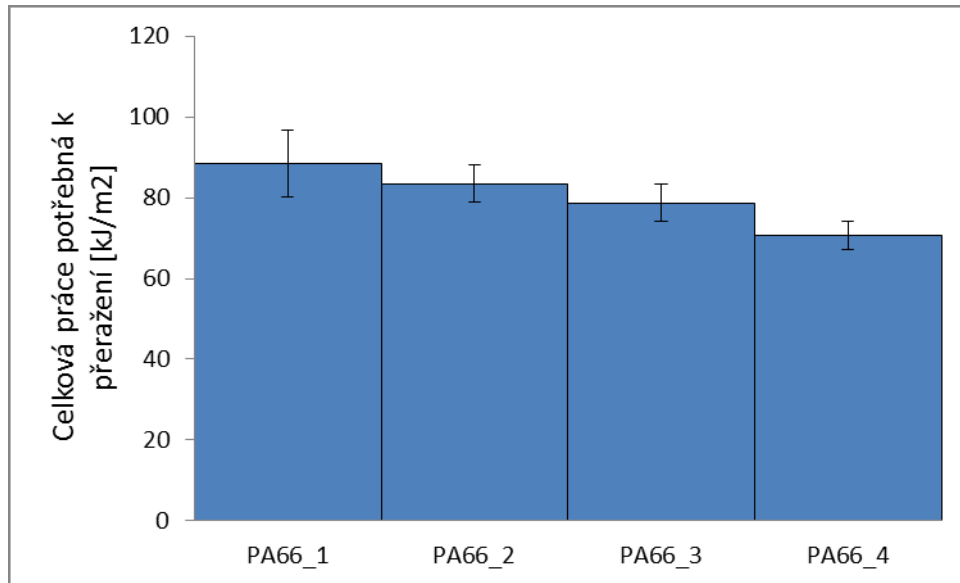


Obrázek 38: Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PA6

Při získávání hodnoty celkové práce potřebné k přeražení pro čistý materiál PA66\_1, došlo k překročení rozsahu měřicího přístroje. Naměřená hodnota  $\text{kJ/m}^2$  je však blízká hodnotě z materiálových listů ( $90 \text{ kJ/m}^2$ ). Proto lze brát tuto hodnotu za věrohodnou. Při porovnání výsledků (Obrázek 39) lze pozorovat opět pokles měřené hodnoty. Po prvních třech přepracování došlo k poklesu o 6 %, po dalších třech o 6 % a po dalších třech o 10 %. Výsledný pokles celkové práce potřebné k přeražení materiálu PA66 po deseti cyklech přepracování je 20 %. Tento pokles je oproti poklesu stejné veličiny u materiálu PA6 menší o 33 % a to díky vyššímu obsahu skelných vláken.

Tabulka 19: Naměřená data pro celkovou práci potřebnou k přeražení pro materiál PA66

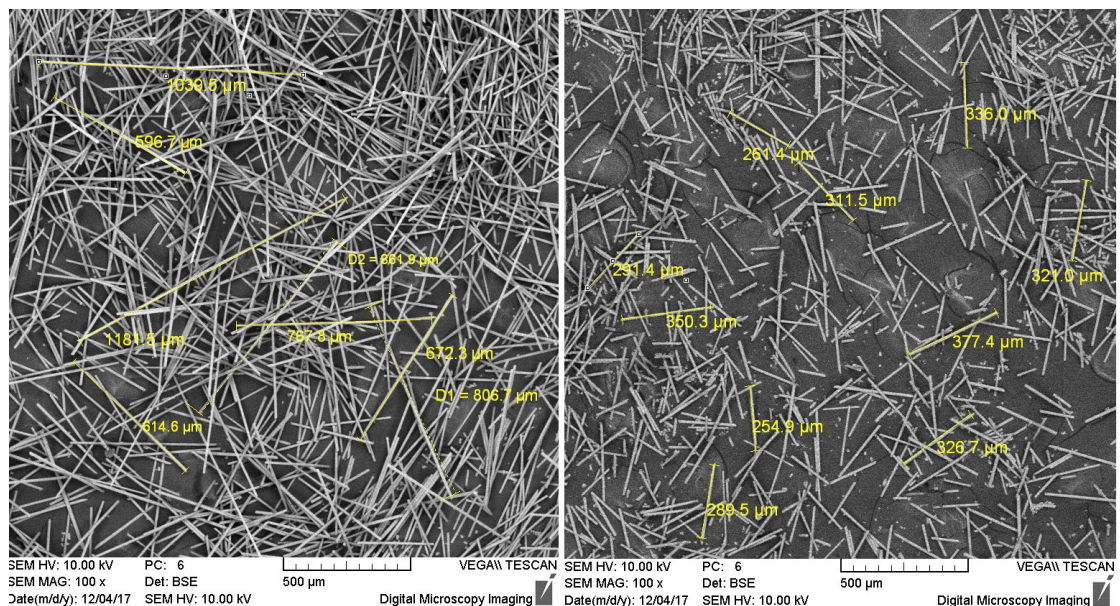
Označení materiálu	PA6_1	PA6_2	PA6_3	PA6_4
Aritmetický průměr [ $\text{kJ/m}^2$ ]	88,46	83,45	78,75	70,60
Směrodatná odchylka [ $\text{kJ/m}^2$ ]	8,24	4,65	4,59	3,53
Variační koeficient [%]	9,31	5,57	5,83	5,01
Max. hodnota [ $\text{kJ/m}^2$ ]	99,43	89,27	85,69	76,64
Min. hodnota [ $\text{kJ/m}^2$ ]	78,31	75,85	72,96	65,02



Obrázek 39: Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PA66

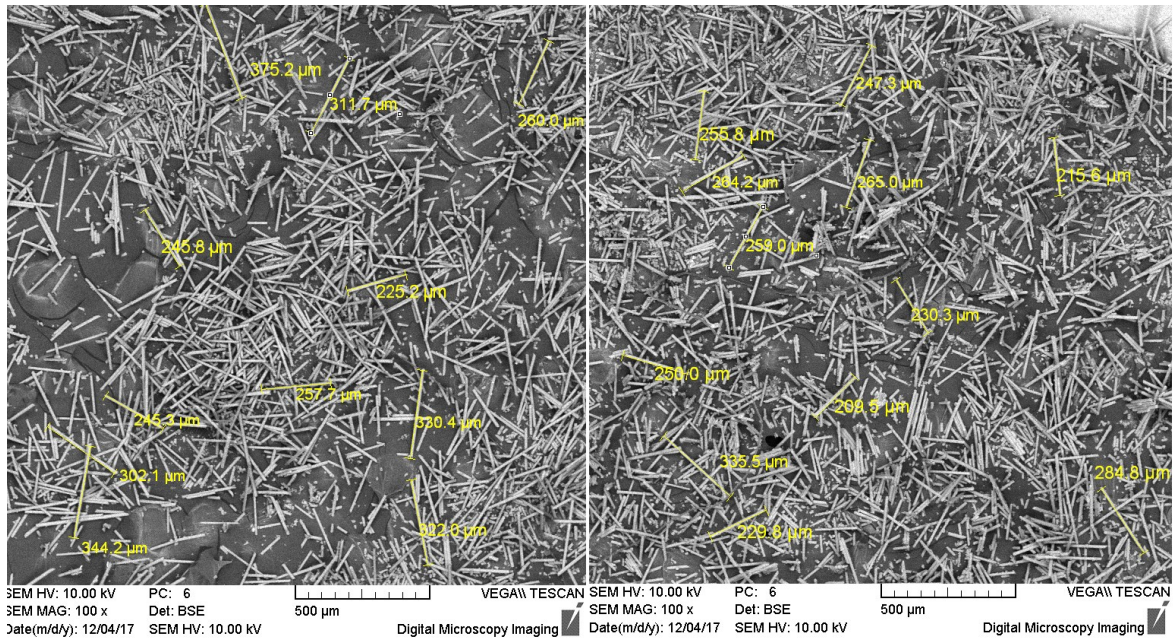
### 8.2.5 Skenovací elektronová mikroskopie

Ve snímcích níže (Obrázek 40 - 42) jsou zaznačeny délkové hodnoty pomocí kót na nejdelších vláknech v dané oblasti. Porovnáním těchto snímků je patrné, že s opětovným přepracováním dochází ke zkracování vláken. Po prvních třech přepracování dochází ke zkrácení cca o 60 %, s každým dalším třetím cyklem pak přibližně o 20 až 25 %.

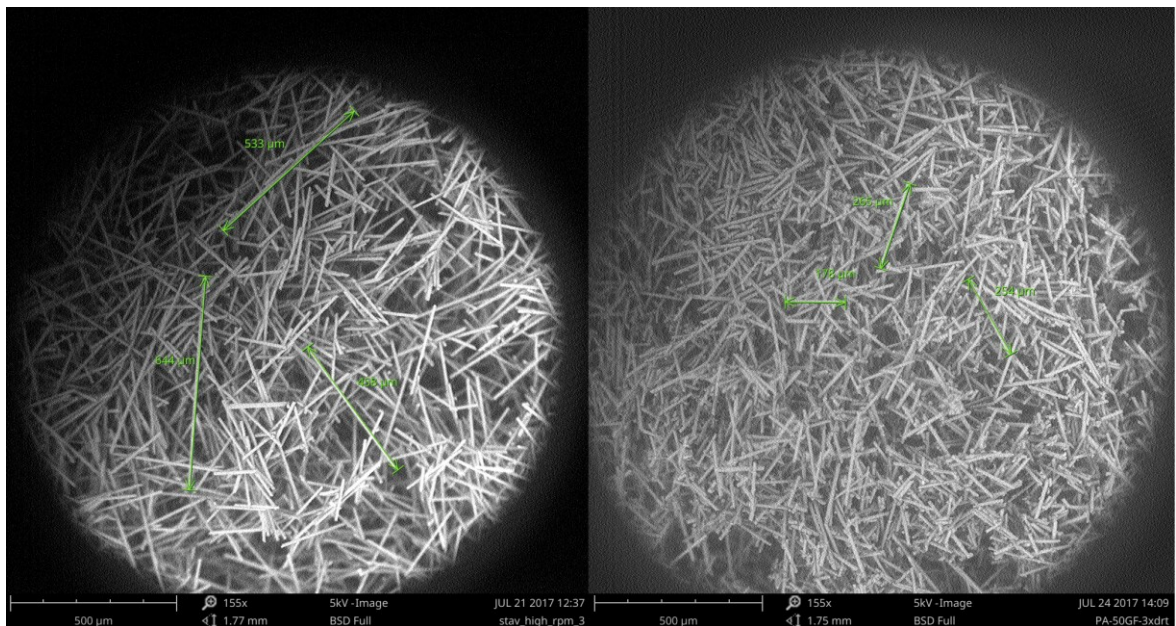


Obrázek 40: Délka vláken pro materiál PA6\_1(vlevo) a PA6\_2(vpravo)

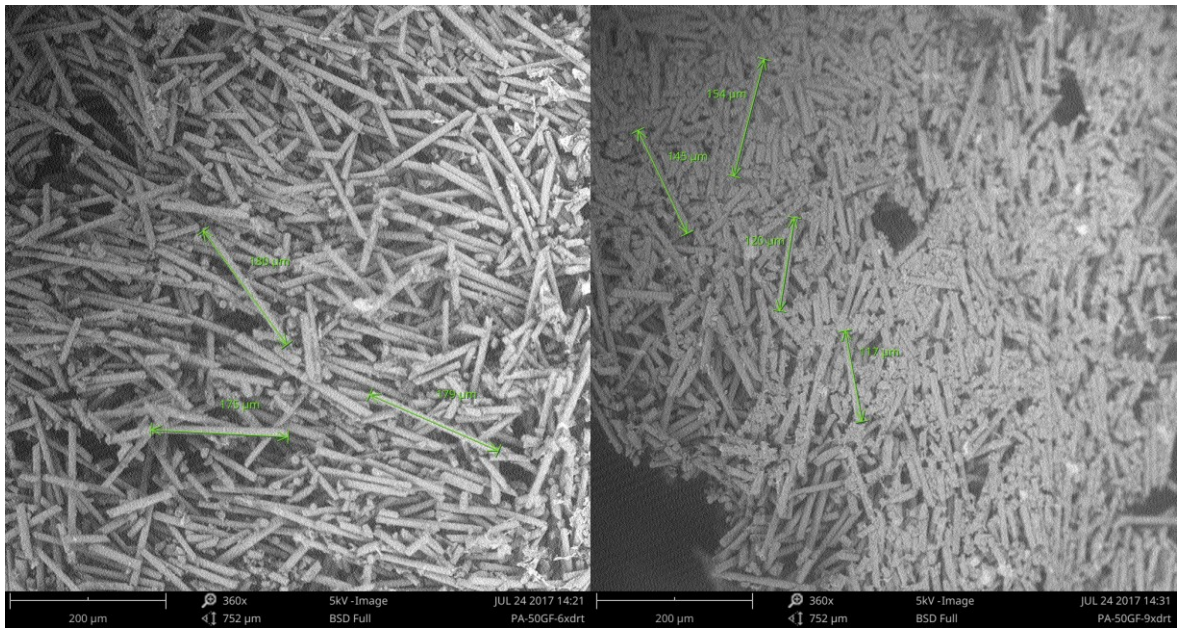




Obrázek 41: Délka vláken pro materiál PA6\_3(vlevo) a PA6\_4(vpravo)



Obrázek 42: Délka vláken pro materiál PA66\_1(vlevo) a PA66\_2(vpravo)



Obrázek 43: Délka vláken pro materiál PA66\_3(vlevo) a PA66\_4(vpravo)



## ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo určit vliv procesu recyklace, opětovného použití recyklátu a jeho zpracování na fyzikálně-mechanické vlastnosti materiálů PC a PA.

U materiálu PC byla experimentálně zkoumána změna vlastností v závislosti na obsahu recyklátu ve směsi s čistým materiálem. Byly provedeny zkoušky v tahu a rázu, dále byly měřeny tokové vlastnosti a také proběhlo měření lesku. U materiálu PA byla zkoumána změna vlastností v závislosti na počtu přepracování u vstřikování. V této části proběhli mechanické zkoušky a to zkouška tahová a rázová, a také SEM mikroskopie.

Po vyhodnocení všech dat u materiálu PC bylo zjištěno, že obsah recyklátu v čistém materiálu nemá větší vliv na žádné vlastnosti provedených zkoušek. Nejlépe lze toto tvrzení dokázat při porovnání výsledků pro 100 % čistý materiál PC a pro 100 % recyklát materiálu PC. Hodnota modulu pružnosti v tahu klesla pouze o 2 %, výsledné hodnoty pro mez pevnosti v tahu byly totožné v rámci desetin MPa. Míra lesku se zvětšila o 3 % u nepokoveného materiálu a o 7 % u materiálu pokoveného. Hodnoty viskozity jsou také téměř neměnné, zvláště pak při vyšších rychlostech smykové deformace. Výsledky zkoušky vrubové houževnatosti (Maximální rázová síla potřebná k přeražení a celková práce potřebná k přeražení) jsou méně přesné a to díky velkému rozptylu dat. I tak lze z těchto hodnot vyvodit závěr, že obsah recyklátu nemá vliv na tyto vlastnosti.

Z výsledků dat pro materiál PA, lze vysledovat, že s rostoucím počtem přepracování nastává pokles vlastností. Tento pokles lze pozorovat u všech měřených vlastností a to jak pro materiál PA6, tak i PA66. Dále je z výsledků patrné, že s přibývajícím počtem přepracování se tento pokles snižuje. Celkový pokles po deseti cyklech přepracování, se u všech měření pohybuje v rozmezí 50 – 70 %. Tyto výsledky jsou dány tím, že s každým dalším zpracováním dochází k lámání skelných vláken, které materiál obsahuje. Tento předpoklad byl potvrzen pomocí SEM mikroskopie, kdy z výsledných snímků je patrné, že při každém dalším přepracování se délka skelných vláken zkracuje. Po prvních třech přepracování došlo ke zkrácení cca o 60 %, s každým dalším třetím cyklem pak přibližně o 20 až 25 %.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KREBS J., 2006: *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Technická univerzita v Liberci, Liberec, 250 s. ISBN 80-7372-133-3
- [2] Katedra tváření kovů a plastů – Skripta. [cit. 10.10.17] Dostupné z <http://www.ksp.vslib.cz/>.
- [3] MLEZIVA J., *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [4] MAŇAS M., HELŠTÝN J. *Výrobní stroje a zařízení: Gumárenská a plastikářské stroje II*. Editační středisko VUT Brno, 1990. ISBN 80-214-0213.
- [5] VESELÝ, K: *Plasty a kaučuk*, Praha: SNTL, 1981
- [6] KOLEKTIV AUTORŮ: *Základy fyziky polymerů*, Praha: Macro, 1998
- [7] DVOŘÁK, Z., JAVOŘÍK, J. *Konstrukce výrobků, konstrukční materiály elastomerní a formy pro jejich výrobu*. 1. vyd. Zlín, 2009. 145 s.
- [8] KUTA, ANTONÍN. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. 978-80-7080-367-7.
- [9] LENFELD, PETR. *Technologie vstřikování*. Technická univerzita v Liberci. 2015 ISBN: 978-80-88058-74-8.
- [10] AZAPAGIC, A., EMSLEY, L., HAMERTON, I.: *Polymers, the Environment and Sustainable Development*. West Sussex; John Wiley & sons, inc. publ., 2003. 219p. ISBN 0-471-87740-9
- [11] GOODSHIP, VANNESSA. *Introduction to plastics recycling. 2nd ed. Shrewsbury: Smithers Rapra Technology, 2007, iv, 174 s. ISBN 978- 1-84735-085-5.*
- [12] KUČEROVÁ, EVA. *Elektrotechnické materiály a prostředí*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2002. 174 s. ISBN: 80-7082-940-0.
- [13] Introduction to Plastic Recycling. [cit. 28.09.17] Dostupné z [http://www.pwmi.or.jp/ei/plastic\\_recycling\\_2016.pdf](http://www.pwmi.or.jp/ei/plastic_recycling_2016.pdf)
- [14] KUDLÁČEK, IVAN. *Ekologie průmyslu*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 8001024954.

- [15] KEPÁK, FRANTIŠEK. Průmyslové odpady. Vyd. 1. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2005, sv. ISBN 80-7044-709-51.
- [16] KOPEČNÁ, HANA. Možnosti využití polymerních odpadních materiálů. Zlín, 2008. Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 48 s.
- [17] Časopis Odpady, Odpadové Fórum, zpracovatelé, EPS, J. Kizlink-Odpady 2014, Recypoint.cz, komunalweb
- [18] FERENC RONKAY. *Effect of Recycling on the Rheological, Mechanical and Optical Properties of Polycarbonate*. Department of Polymer Engineering. Budapest University of Technology and Economics. 2013, 12s.
- [19] PÉREZ J. M., VILAS J. L., LAZAA J. M., ARNÁIZB S., MIJANGOSA F., BILBAOC E., RODRÍGUEZA M., LEÓN L. M. *Effect of Reprocessing and Accelerated Ageing on Thermal and Mechanical Polycarbonate Properties*. J. Mater. Process. Tech. 2010; 210:727-733
- [20] LONG T. S., SOKOL R. J. *Molding Polycarbonate: Moisture Degradation Effect on Physical and Chemical Properties*. Polym. Eng. Sci. 1974; 14:817-822
- [21] M.J. LOZANO-GONZALEZ, M.T. RODRIGUEZ-HERNANDEZ, E.A.G. LOS SANTOS, J. VILLALPANDO-OLMOS, J. Appl. Polym. Sci. 76 (2000) 851–858.
- [22] M.L. MASPOCH, H.E. FERRANDO, J.I. VELASCO, MACROMOL. Symp. 194 (2003) 295–303.
- [23] KUAN-HUA SU, JIA-HORNG LIN, CHIH-CHING LIN. *Influence of reprocessing on the mechanical properties and structure of polyamide 6*. Journal of Materials Processing Technology 192–193 (2007) 532–53
- [24] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – část 1: Základní principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997. 15 s. Třídící znak 64 0604
- [25] ČSN EN ISO 179. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998. 18 s. Třídící znak 64 0612

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

C	Uhlík
O	Kyslík
H	Vodík
Cl	Chlór
$T_m$	Teplota tání
$T_f$	Teplota viskózního toku
PS	Polystyren
PMMA	Polymethylmethakrylát
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PA	Polyamid
PP	Polypropylen
Cd	Cadmium
Sb	Antimon
Sn	Cín
$T_g$	Teplota skelného přechodu
nm	Nanometr
$T_i$	Teplota počátečního rozkladu
kol	Kolektiv
$\sigma_M$	Mez pevnosti v tahu
E	Modul pružnosti v tahu
$F_m$	Maximální rázová síla
Ab	Celková energie potřebná k přeražení vzorku
$\eta$	Dynamická viskozita

$\gamma$	Rychlost smykové deformace
GU	Jednotka lesku (Gloss Unit)
$\bar{x}$	Aritmetický průměr
$s$	Směrodatná odchylka
MPa	Megapascal
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Nadmolekulární struktura polymerů [2]</i> .....	15
<i>Obrázek 2: Strukturální vzorec polykarbonátu [3]</i> .....	15
<i>Obrázek 3: Využití polykarbonátu v praxi</i> .....	16
<i>Obrázek 4: Strukturální vzorec PA6 [3]</i> .....	17
<i>Obrázek 5: Využití polyamidu v praxi</i> .....	18
<i>Obrázek 6: Identifikační označení polymerního odpadu [17]</i> .....	19
<i>Obrázek 7: Rozdělení plastového odpadu podle zdroje pro rok 2013 [13]</i> .....	22
<i>Obrázek 8.: Recyklační cyklus [12]</i> .....	24
<i>Obrázek 9: Závislost pevnosti v tahu na obsahu recyklátu PC [18]</i> .....	29
<i>Obrázek 10: Závislost prodloužení při přetržení na obsahu recyklátu PC [18]</i> .....	30
<i>Obrázek 11: Vliv molekulové hmotnosti na počtu recyklačních cyklů [19]</i> .....	31
<i>Obrázek 12: Index toku taveniny v závislosti na počtu cyklů [23]</i> .....	32
<i>Obrázek 13: Drť recyklátu PC</i> .....	36
<i>Obrázek 14: Laboratorní nožový mlýn</i> .....	38
<i>Obrázek 15: Zkušební těleso pro měření lesku</i> .....	40
<i>Obrázek 16: Zkušební tělíska pro tahovou zkoušku</i> .....	41
<i>Obrázek 17: Zkušební tělíska pro zkoušku vrubové houževnatosti</i> .....	41
<i>Obrázek 18: Kapilární reometr GR 50</i> .....	42
<i>Obrázek 19: Standardní geometrie přístrojů pro měření lesku</i> .....	43
<i>Obrázek 20: Leskoměr NHG</i> .....	43
<i>Obrázek 21: Modul pružnosti v tahu pro materiál PC</i> .....	46
<i>Obrázek 22: Mez pevnosti v tahu pro materiál PC</i> .....	47
<i>Obrázek 23: Maximální rázová síla pro materiál PC</i> .....	48
<i>Obrázek 24: Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PC</i> .....	49
<i>Obrázek 25: Míra lesku pro nepokovený materiál PC</i> .....	50
<i>Obrázek 26: Míra lesku pro pokovený materiál PC</i> .....	51
<i>Obrázek 27: Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace při teplotě 330°C</i> .....	51
<i>Obrázek 28: Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace při teplotě 340°C</i> .....	52
<i>Obrázek 29: Vstříkovaný dílec</i> .....	53
<i>Obrázek 30: Rozměrová stabilita výrobku pro materiál PC_1</i> .....	53
<i>Obrázek 31: Rozměrová stabilita výrobku pro materiál PC_5</i> .....	54

---

<i>Obrázek 32: Modul pružnosti v tahu pro materiál PA6 .....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 33: Modul pružnosti v tahu pro materiál PA66 .....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 34: Mez pevnosti v tahu pro materiál PA6.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 35: Mez pevnosti v tahu pro materiál PA66.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 36: Maximální rázová síla pro materiál PA6.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 37: Maximální rázová síla pro materiál PA66.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 38: Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PA6.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 39: Celková práce potřebná k přeražení pro materiál PA66 .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 40: Délka vláken pro materiál PA6_1(vlevo) a PA6_2(vpravo) .....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 41: Délka vláken pro materiál PA6_3(vlevo) a PA6_4(vpravo) .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 42: Délka vláken pro materiál PA66_1(vlevo) a PA66_2(vpravo) .....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 43: Délka vláken pro materiál PA66_3(vlevo) a PA66_4(vpravo) .....</i>	<i>64</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1: Výtěžek monomerů podle druhu polymeru [16].....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 2: Spalná tepla plastů a srovnávacích materiálů [15].....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 3: Označení jednotlivých směsí materiálu PC.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka. 4: Označení jednotlivých směsí materiálu PA.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 5: Procesní podmínky vstřikování zkušebních těles.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 6: Naměřená data modulu pružnosti pro materiál PC.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 7: Naměřená data meze pevnosti v tahu pro materiál PC.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 8: Naměřená data pro maximální rázovou sílu pro materiál PC.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 9: Naměřená data celkové práce potřebné k přeražení pro materiál PC.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 10: Naměřená data míry lesku pod úhlem 20° pro nepokovený materiál PC.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 11 :Naměřená data míry lesku pod úhlem 20° pro pokovený materiál PC.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 12. Naměřená data modulu pružnosti pro materiál PA6.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 13. Naměřená data modulu pružnosti pro materiál PA66.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 14. Naměřená data meze pevnosti pro materiál PA6.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 15. Naměřená data meze pevnosti pro materiál PA66.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 16: Naměřená data maximální rázové síly pro materiál PA6.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 17: Naměřená data maximální rázové síly pro materiál PA66.....</i>	<i>59</i>



## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: CD s elektronickou verzí práce