

# Recyklace radiačně síťovaných polyolefinů

Bc. Roman Válek

---

Diplomová práce  
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Roman VÁLEK**  
Osobní číslo: **T09706**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Recyklace radiačně síťovaných polyolefinů**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární rešerži na dané téma**
- 2. Připravte materiály pro výrobu zkušebních tělísek**
- 3. Provedte výrobu zkušebních tělísek**
- 4. Provedte mechanické zkoušky**
- 5. Vyhodnoťte naměřené výsledky**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle zadání vedoucího DP.**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Romana Lamborová**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**14. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2011**

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*ředitel ústavu*

## 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 vzdělávacího 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). Odpirá-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**

Tato diplomová práce pojednává o různých možnostech využití výrobků z ozářených polymerů po skončení jejich životnosti.

Z velké části bude v teoretické části věnována pozornost zejména polyolefinům, různým druhům záření či síťování, míchání gumárenských směsí, zkouškám mechanických vlastností a recyklaci polymerních materiálů.

Praktická část popisuje přípravu materiálu, jeho míchání s ozářeným materiálem v určitých poměrech, vstřikování zkušebních těles a následné vyhodnocení výsledků po tahových zkouškách. Pro danou problematiku byl použit nízkohustotní polyetylén (LDPE) a vysokohustotní polyetylén (HDPE).

Klíčová slova: polyolefiny, síťování, míchání, ozařování, recyklace, vstřikování, tahová zkouška

## **ABSTRACT**

This master thesis concentrates on a study of possible use of irradiated polymer products after their lifetime period.

The theoretical part concentrates on polyolefins, different kinds of radiation or crosslinking, mixture compounding, mechanical properties studying and polymer materials recylation.

The practical part describes the preparation of material and its mixture with the irradiated one in different proportion, injection of specimens and the explanation of tensile test results. Low Density Polyethylene (LDPE) and High Density Polyethylene (HDPE) were used.

Keywords: Polyolefin, Crosslinking, Compounding, Irradiation, Recyclation, Injection Moulding, Tensile Test

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce, Ing. Romaně Lamborové za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce, dále Ing. Zdeňku Holíkovi za odbornou pomoc při měření a vyhodnocování výsledků a Ing. Michalu Daňkovi za odbornou konzultaci a technickou podporu při zpracování praktické části diplomové práce.

## **Čestné prohlášení**

Čestně prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, jak je to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uvedený jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....

Podpis diplomanta

## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POLYMERNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ PLASTŮ .....	11
1.1.1 Rozdělení na základě teplotního chování.....	11
1.1.2 Rozdělení z hlediska vnitřní struktury .....	12
1.1.3 Rozdělení podle druhů přísad.....	13
1.2 POLYOLEFINY .....	13
1.2.1 Polyetylen.....	14
1.2.2 Nízko-hustotní polyetylen LDPE .....	17
1.2.3 Vysoko-hustotní polyetylen HDPE .....	18
<b>2 SÍŤOVÁNÍ</b> .....	<b>19</b>
2.1 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ .....	19
2.1.1 Měrné jednotky techniky ozařování .....	20
2.1.2 Materiály pro radiační síťování .....	21
2.1.3 Zlepšení vlastností radiačně síťovaných plastů.....	21
<b>3 DRUHY ZÁŘENÍ</b> .....	<b>24</b>
3.1 ZÁŘENÍ ALFA .....	24
3.2 ZÁŘENÍ BETA .....	24
3.3 ZÁŘENÍ GAMA .....	25
<b>4 RECYKLACE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ</b> .....	<b>27</b>
4.1 RECYKLACE POLYMERŮ .....	27
4.2 RECYKLACE VÝCHOZÍHO PRODUKTU .....	28
4.3 REKUPERACE ENERGIE .....	29
4.4 METODY RECYKLACE PLASTŮ .....	30
4.4.1 Materiálová recyklace .....	31
4.4.2 Chemická recyklace .....	33
4.4.3 Surovinová recyklace .....	34
4.4.4 Energetická recyklace.....	36
4.4.5 Třídící linka .....	36
<b>5 VSTŘIKOVÁNÍ</b> .....	<b>38</b>
<b>6 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ- ZKOUŠKA TAHEM</b> .....	<b>40</b>
6.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	40
6.1.1 Zkušební tělesa.....	41
6.1.2 Tahová křivka.....	42
<b>7 DRCENÍ A MÍCHÁNÍ GUMÁRENSKÝCH SMĚSÍ</b> .....	<b>46</b>



7.1	VÁLCOVÉ A KUŽELOVÉ MLÝNY A DRTIČE .....	46
7.2	NOŽOVÉ MLÝNY .....	46
7.3	FLUIDNÍ MÍCHAČKY .....	47
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>49</b>
8.1	MATERIÁLY PRO MĚŘENÍ.....	49
8.1.1	Příprava směsí LDPE a HDPE pro měření.....	50
8.2	SÍTOVÁ ANALÝZA.....	51
8.2.1	Výsledek sítové analýzy .....	52
8.3	MĚŘÍCÍ TECHNIKA .....	53
8.3.1	Vstříkování zkušebních tělísek .....	54
8.3.2	Zkouška tahem .....	55
<b>9</b>	<b>MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>57</b>
9.1	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MATERIÁLU LDPE .....	57
9.1.1	Zkouška tahem LDPE při pokojové teplotě 23 °C .....	58
9.1.2	Zkouška tahem LDPE za zvýšené teploty 80 °C .....	62
9.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MATERIÁLU HDPE.....	68
9.2.1	Zkouška tahem za pokojové a zvýšené teploty .....	68
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>80</b>

## ÚVOD

V posledních letech stále stoupá celosvětová spotřeba polymerů, které lze použít v různých oblastech průmyslu. Zpracování polymerů se proto výrazně dostává do popředí pro většinu různých oborů a to hlavně díky snadné zpracovatelnosti. Mezi jejich výhody patří nízká hustota, chemická odolnost, tepelná odolnost, tvrdost a pružnost. S plasty se setkáváme prakticky všude a lze je použít pro vícero účelů, proto nalezly použití v domácnostech či průmyslových odvětvích.

Pod pojmem recyklace polymerů si můžeme představit opětovné využití výrobků po skončení jeho životnosti. Je tedy zřejmé, že v důsledku vzrůstajícího používání nejrůznějších druhů plastů se recyklace polymerů stává čím dál více důležitější.

Pro zvýšení vlastností polymerních materiálů využíváme radiační síťování o různých dávkách ozáření, kdy se používá záření beta a gama, která na základě svých energií iniciují chemické procesy. Radiační síťování probíhá při pokojové teplotě bez dodatečného namáhání výrobku. Jeho hlavní výhoda spočívá v tom, že je provedeno po zpracovatelském procesu (např. po vstřikování, vytlačování nebo vyfukování). Variací ozařovacích parametrů lze měnit stupeň zesíťení, čímž ovlivníme vlastnosti materiálu tak, jak je požadováno. Radiační síťování umožňuje vysokou flexibilitu ve volbě surovin, zlepšuje vlastnosti a to jak mechanické, chemické či teplotní. V praktické části byla studována změna těchto vlastností materiálu.

Pro tuto práci byly použity trubky z HDPE, které byly ozářeny dávkou 165 kGy a poté namlety na jemný prášek, který byl smíchán v určených poměrech s čistým práškem LDPE a HDPE. Po vystříknutí zkušebních tělísek ze směsi ozářeného prášku HDPE a čistého prášku LDPE došlo ke znovu ozáření těchto tělísek dávkou 165 kGy, aby mohlo dojít k porovnání s neozářenými tělísky stejného typu směsi. Byla také sledována závislost množství plniva, tedy množství ozářeného prášku HDPE v čistém prášku HDPE a LDPE. Po přípravě všech zkušebních tělísek byly provedeny tahové zkoušky a to při pokojové teplotě a při zvýšené teplotě 80 °C. Po přípravě směsi a dokončení měření se učinily příslušné závěry.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Slovo polymer pochází z řečtiny a znamená mnoho (poly) částic (mer). Polymery jsou chemické látky obsahující ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, ale i dusíku, chloru a jiných prvků. Za normálních teplot jsou v tuhém stavu. Za zvýšené teploty přechází do stavu kapalného (taveniny), což umožňuje udělit polymerní tavenině tvar budoucího výrobku. Z hlediska chování za normální a zvýšené teploty se polymery dělí na plasty a elastomery. [1]

### 1.1 Rozdělení plastů

Plasty je možno klasifikovat podle různých hledisek:

- rozdělení na základě teplotního chování,
- rozdělení z hlediska vnitřní struktury,
- rozdělení podle druhu přísad. [1]

#### 1.1.1 Rozdělení na základě teplotního chování

Plasty jako materiál jsou látky, jejichž struktura je tvořena makromolekulárními řetězci (oproti kovům, které mají strukturu tvořenou krystalickými mřížkami). Jsou rozděleny na dva základní druhy:

- termoplasty, které mají řetězce přímé (lineární polymery) nebo řetězce s bočními větvemi (rozvětvené polymery). Při ohřevu se uvolní soudržnost řetězců a hmota je viskózní. V tomto stavu se může tvářet. Po ochlazení se dostanou opět do původního stavu,
- reaktoplasty, které mají v konečné fázi zpracování řetězce příčně propojeny chemickými vazbami a vytváří prostorovou trojrozměrnou síť. Při ohřevu tato síť zvětšuje svoji pohyblivost, ale řetězce se zcela neuvolní. Při tváření vlivem teploty a tlaku nastává zesíťování (vytvrzování) plastu (někdy i působením katalyzátoru). Jsou-li původní řetězce velmi ohebné a hustota sítě je přiměřená, je hmota za normální teploty poddajná a pružná. Takové materiály se nazývají elastomery a zesíťování u nich nastává při vulkanizaci, čímž se převedou na pryž. Jakmile je chemický proces ukončen, další tváření již není možné. [1]

### 1.1.2 Rozdělení z hlediska vnitřní struktury

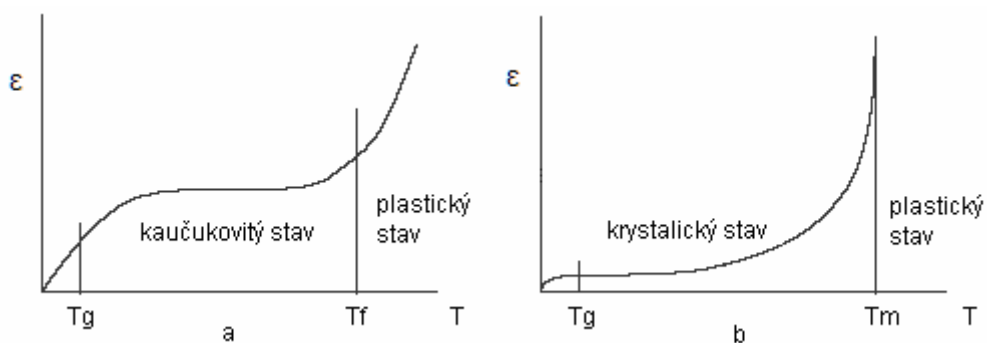
Rozdělení z hlediska vnitřní struktury se termoplasty dělí na:

- amorfní, jejichž řetězce jsou nepravidelně prostorově uspořádány,
- semikrystalické, kde je podstatná část řetězců pravidelně a těsně uspořádána a tvoří krystalické útvary.

Zbytek má amorfní uspořádání, využitelnost výrobků z amorfních plastů je v oblasti pod teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ). Polymer je v tomto stavu pevný. Zvyšováním teploty nad  $T_g$  postupně slábnou kohezní síly mezi makromolekulami a plast přechází do plastické oblasti až do viskózního stavu, kdy se zpracovává. Se zvyšováním teploty současně narůstá i objem polymeru.

U semikrystalických plastů jsou části makromolekul vázány pevněji v lamelách a ve sférolitech krystalické fáze. Zvyšováním teploty se nejprve uvolní část makromolekul z amorfní

oblasti, potom i ostatní. To je doprovázeno značným objemovým nárůstem. Použití plastu tohoto typu je v oblasti nad teplotou  $T_g$ , protože mají výhodnou kombinaci pevnosti a houževnatosti nad touto teplotou. Rozdíl obou typů termoplastů je patrný z obr.1.



Obr. 1 Termomechanická křivka amorfního (a) a krystalického (b) polymeru

### 1.1.3 Rozdělení podle druhů přísad

Základní vlastnosti polymerů se mohou měnit i vlivem nejrůznějších přísad a tím splnit požadavek volby vhodného plastu.

- neplněné plasty - neplněný plast je takový plast, u kterého množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice,
- plněné plasty – plnivo ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti plastu.

Plniva zlepšují mechanické vlastnosti materiálu nebo chemickou odolnost či tvarovou stálost při zvýšené teplotě, jiné lze použít pro zlevnění hmoty.

Jako přísady se používají:

- plniva prášková nebo vláknitá. Svým charakterem mění především fyzikální i mechanické vlastnosti plastu. Vláknitá plniva především vyztužují hmotu a zvětšují její pevnost,
- prášková plniva naopak při vyšší koncentraci zmenšují tyto hodnoty; některé však mechanické hodnoty zvětšují, což jsou plniva aktivní (saze v kaučuku),
- změkčovadla se přidávají k některým tvrdým polymerům pro získání měkkosti a ohebnosti,
- barviva slouží k dosažení žádaného barevného odstínu,
- stabilizátory zlepšují některé vlastnosti, např. odolnost proti vyšším teplotám při jejich zpracování, proti UV záření, stárnutí apod.,
- nadouvadla uvolňují při zpracování plyny a vytváří tak lehčenou strukturu plastu se svými zvláštními vlastnostmi. [1]

## 1.2 Polyolefiny

Polyolefiny jsou částečně krystalické termoplasty a představují skupinu syntetických polymerů s největší absolutní spotřebou. Důvodem je cenová dostupnost surovin, dobrá zpracovatelnost a relativně výhodné uživatelské vlastnosti. Mezi nejvýznamnější polyolefiny můžeme zařadit: polypropylen, polyetylen, poly-1-buten, polyisobutylen a poly-4-methyl-1-penten. Tyto materiály velmi dobře izolují proti elektrickému proudu, mají většinou dobrou chemickou odolnost, nízkou absorpci vody a nízký koeficient tření. Polyolefiny reprezentují důležitou třídu polymerů, která se zkoumá v oblasti nanokompozitních materiálů. [7]

### 1.2.1 Polyethylen

Polyethylen je celosvětově nejrozšířenější polymer a každý s ním denně přichází do kontaktu. Význam polyethylenu je v jeho přirozených vlastnostech, jeho široce přijatelném použití a jeho rozsáhlém aplikačním potenciálu. Polyethylen je vyráběn různými postupy a tvoří širokou paletu produktů s různými zpracovatelskými a užitnými vlastnostmi. Rozmanitost vlastností je výsledkem rozdílů v míře krátkého větvení polymerních řetězců a tím i v obsahu krystalické fáze a rovněž rozdílů v molekulové hmotnosti jednotlivých typů PE. Produkty s různým stupněm krystalinity se liší hustotou, která se stala společně s charakterizací tvaru řetězce, základem pro třídění polyethylenů. [7]

Vlastnosti PE:

Polyethylen je tuhá látka, v tenkých vrstvách nebo filmech ohebná, elastická, téměř průhledná, popř. s mléčným zákalem. Naopak má voskovitý charakter. Všechny typy PE mají vysokou krystalinitu. Teplota tání se pohybuje mezi 105 až 136°C. PE má vysokou houževnatost a tažnost. Omezená je jeho stálost proti oxidačním činidlům. Za normální teploty se nerozpouští v žádném rozpouštědle, při teplotách nad 50°C se většina typů PE rozpouští v aromatických nebo chlorovaných uhlovodících či v dekalinu. LDPE při teplotách nad 70°C úplně rozpouští v *p*-xylenu, HDPE se vněm rozpouští teprve nad 100°C. Svými dielektrickými vlastnostmi a nízkou hustotou se PE podobá alkalickým uhlovodíkům. PE nepropouští vodní páru a je mrazuvzdorný. Absorbuje tuky, uhlovodíky, aminy, ethery, ketony i jiné kapalné organické sloučeniny, které jim zvolna difundují. Podléhá studenému toku a má sklon k praskání pod napětím. Nestabilizovaný PE patří mezi plasty s nízkou odolností proti povětrnosti, zejména proti slunečnímu záření. Rychlost fotooxidačního odbourávání stoupá s koncentrací terciárních uhlíků v řetězcích a klesá se zvyšující krystalinitou, neboť k fotooxidaci dochází hlavně v amorfních oblastech polymeru. [4], [10], [11]

Výhodnými charakteristikami PE jsou [4], [10], [11]:

- nízká cena,
- snadná zpracovatelnost,
- velmi dobrá chemická odolnost,
- tuhost a vláčnost při nízkých teplotách,

- průhlednost tenkých folií,
- nízká permeabilita vodních par.

Použitelnost PE je omezena [4], [10], [11]:

- nízkým bodem měknutí,
- sklonem k oxidaci,
- nízkou pevností v tahu,
- hořlavostí.

Zpracování PE:

Polyethylen se zpracovává všemi obvyklými metodami zpracování termoplastů. PE má dobrou zpracovatelnost a vyrovnanou kvalitu. Polymer lze snadno přeměnit z granulí dodávaných výrobcem, výše uvedenou technologií vytlačování (extruzí) na trubku. LDPE je stálý v rozmezí teplot -50 až 85°C. Zpracovatelské teploty závisí na tavném indexu a na metodě zpracování. Při vytlačování na trubky činí 140 až 170°C. Lineární polyethylen HDPE je stálejší proti organickým rozpouštědlům než rozvětvený PE. Vyšší krystalinita se projevuje i jako ztužující faktor, který zvyšuje modul pružnosti, tvrdost a snižuje propustnost pro plyny a páry. Teplotní použitelnost HDPE je krátkodobě až do 110°C. Potrubí z polyethylenu lze dobře ohýbat, svařovat a tvarovat. [4], [7], [10]

Tab. 1 Třídění PE podle hustoty

Typ	Zkratka	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
PE s velmi nízkou hustotou	ULDPE	0,888-0,915
PE s nízkou hustotou	LDPE	0,910-0,955
Lineární PE s nízkou hustotou	LLDPE	0,918-0,955
PE se střední hustotou	MDPE	0,925-0,940
PE s vysokou hustotou	HDPE	0,941-0,954
PE s vysokou molekulovou hmotností	HMW-HDPE	0,944-0,954
PE s ultravysokou molekulovou hmotností	UHMW-HDPE	0,955-0,957

[7]

Základními typy jsou LDPE, HDPE a LLDPE. Rozdíly ve tvaru polymerních řetězců tří základních typů jsou důsledkem různých polymeračních mechanismů a kopolymerace s  $\alpha$ -olefiny. Radikálovou polymerací vyráběný LDPE je často označován jako rozvětvený PE



nebo podle polymeračního tlaku jako vysokotlaký PE, zatímco HDPE a LLDPE jsou označovány jako lineární nebo taky jako nízkotlaké nebo středotlaké polyethyleny. [7]

Kopolymery polyethylenu:

V současné době je vyráběno několik typů kopolymerů ethenu. Některé jsou vyráběny radikálovou polymerací obdobnou technologií jako LDPE. Jsou to kopolymery s metylmetakrylátem (EMA) a ethylakrylátem (EEA), s vinylacetátem (EVA), vinylalkoholem (EVOH), kyselinou methakrylovou (EMAA) nebo kyselinou akrylovou (EAA). Další jsou vyráběny na Zieglerových případně na metallocenových katalyzátorech, jako jsou kopolymery s propenem.

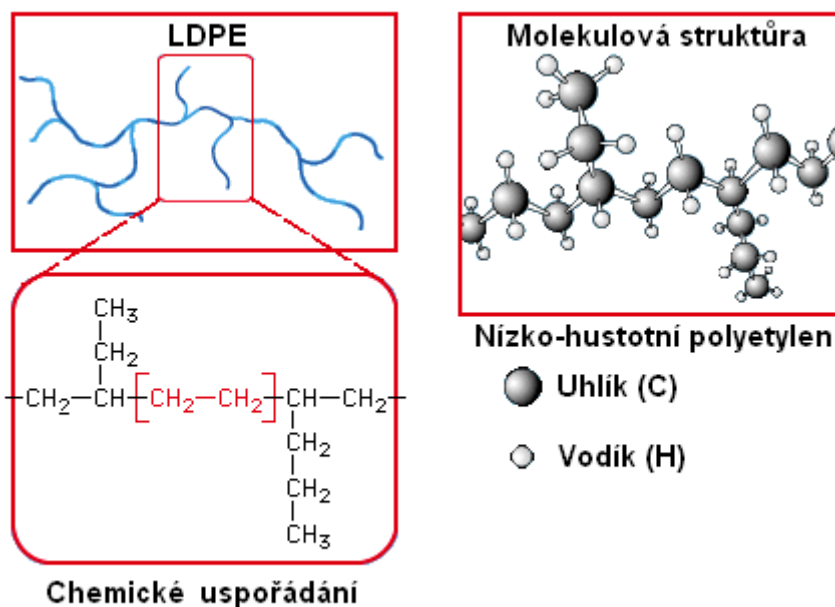
Kopolymery ethylenu s vinylacetátem se vyrábějí blokovou radikálovou vysokotlakou polymerací při 140 MPa a 180 až 250 °C. Představují asi 5 % výroby LDPE. Vlastnosti kopolymerů závisejí na obsahu vinylacetátové složky. Kopolymery jsou průsvitné až průhledné, mají vysokou pevnost, rozpouštějí se v ketonech a v aromatických i chlorovaných uhlovodících. Lze je hodně plnit. Se stoupajícím obsahem vinylacetátu stoupá jejich průtažnost, rázová houževnatost a odolnost proti tvorbě trhlin pod napětím. Pevnost v tahu je maximální při obsahu vinylacetátu 20 až 30 %. Tvrdost a tvarová stálost za tepla naproti tomu se stoupajícím obsahem vinylacetátu klesají. Největší podíl kopolymerů EVA má obsah vinylacetátu 7%. Fólie z kopolymerů EVA jsou dobře svařovatelné při teplotách 105 až 135 °C. Kopolymery Eva s obsahem vinylacetátu 20 % se vlastnostmi blíží měkčenému PVC. Používají se k výrobě fólií, hadic, obalovin atd. Kopolymery s obsahem vinylacetátu 20 až 40 % se používají pro nanášení na papír, pro výrobu snímacích laků a snímacích povlaků proti korozi a jako disperze i pro nátěrové hmoty. Významné použití mají pro výrobu tavných lepidel pro polygrafický a nábytkářský průmysl. Produkty s obsahem vinylacetátu 40 až 70 % se používají jako oxidačně zesíťované kaučuky s nadprůměrnou tepelnou odolností. Polymery připravené polymerací v rozpouštědle za tlaku 20 až 40 MPa a při teplotě 80 °C mají dlouhá rozvětvení a lze je zesíťovat peroxidy za přítomnosti triallylkyanurátu nebo triallylfosfátu. Používají se pro opláštění kabelů, topných vedení a těsnění ve stavebnictví pro fólie a profily vystavené povětrnosti. [7]

### 1.2.2 Nízko-hustotní polyethylen LDPE

Nízko-hustotní polyethylen se díky silně rozvětvenému řetězci makromolekul často označuje jako rozvětvený polyethylen. Se zřetelem k použitým výrobním tlakům se také hovoří o vysokotlakém polyethylenu.

Vzhledem k povaze vysokého tlaku při procesu polymerace, kterým se vyrábí LDPE, butyl a etyl větve jsou často seskupovány dohromady oddělené dlouhými nerozvětvenými řetězci. Dlouhé řetězce větví vznikají náhodně podél hlavního řetězce. Dlouhé řetězce se mohou zase sami rozvětvit. Velké množství větví, charakteristické pro nízko-hustotní polyetylenové molekuly, omezují jejich schopnost krystalizovat, což má za následek snížení hustoty oproti HDPE.

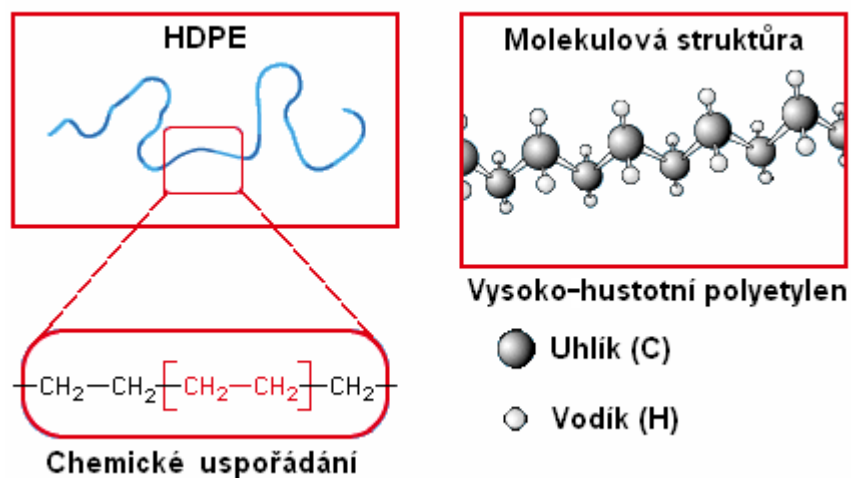
Nízko-hustotní polyethylen je nejstarší typ polyetylenu. Je vyráběn za použití vysokého tlaku. Je to měkký, pevný a ohebný druh polyetylenu vzhledem k jeho vysoce rozvětvené struktuře. Je používán pro pevné, poddajné předměty jako jsou např. víka a podobné výrobky. Byl dlouho používán jako izolační materiál. V současnosti je nejvíce oblíbenou aplikací folie, mezi další příklady patří například balící. Obr. 2 ukazuje vysoce rozvětvenou molekulární strukturu nízko-hustotního polyethylenu. [4]



Obr. 2 Nízko-hustotní polyethylen

### 1.2.3 Vysoko-hustotní polyethylen HDPE

HDPE je chemicky nejbližší strukturou čistého polyetylénu. Je tvořen převážně z nerozvětvených molekul s nízkou mírou větvení a s velmi malým počtem kazů, které vedou k porušení linearitě. S extrémně nízkou úrovní vad ve struktuře je možno dosáhnout vysokého stupně krystalinity, které mají vysokou hustotu (ve srovnání s ostatními druhy polyetylénu). Připravuje se z etylénu katalytickým procesem. Nepřítomnosti větví má za následek více „zabalenu“ strukturu s vyšší hustotou a poněkud vyšší chemickou odolností než LDPE. HDPE je také o něco těžší a více neprůhledný. Může vydržet poměrně vysoké teploty (120 °C, na krátkou dobu, 110 °C nepřetržitě). Lineární polyethylen se běžně vyrábí s molekulovou hmotností v rozmezí 200.000 až 500.000, ale může být ještě vyšší. Jeho výroba se uskutečňuje při nízkých nebo středních tlacích. Obr. 3 ukazuje lineárně rozvětvenou molekulární strukturu vysoko-hustotního polyethylénu.



Obr. 3 Vysoko-hustotní polyethylen

## 2 SÍŤOVÁNÍ

Pojmem síťování označujeme vzájemné spojování polymerních řetězců za vzniku prostorové sítě. Přidáním potřebného množství síťovacího činidla nekonečně vzroste molekulová hmotnost polymeru a makromolekula bude mít rozměry příslušného výrobku. U mnohých plastů dochází k zesíťování vlivem ozáření. U tohoto typu síťování není často zapotřebí žádné další přísady. Další výhodou je, že proces je proveden až na samotném výrobku po zpracovatelském procesu.

Tím můžeme přetvořit např. termoplasty na materiály vykazující v určitých teplotních oblastech vlastnosti elastomerů.

Zesíťováním ztrácejí polymery rozpustnost (v rozpouštědlech pouze bobtnají, tj. zvětšují svůj objem), tavitelnost a termoplasticitu a naopak získávají tvarovou stálost za zvýšených teplot, někdy i vyšší odolnost vůči chemikáliím.

Prostorově zesíťované struktury vznikají různými způsoby, zejména:

- polykondenzací nebo polyadící tří a vícefunkčních monomerů,
- kopolymerací monomerů, z nichž alespoň jeden má vyšší funkčnost než 2,
- zabudováním příčných vazeb mezi lineární nebo rozvětvené makromolekulární řetězce,
- vzájemnou reakcí makromolekulárních řetězců s vhodnými reaktivními skupinami.

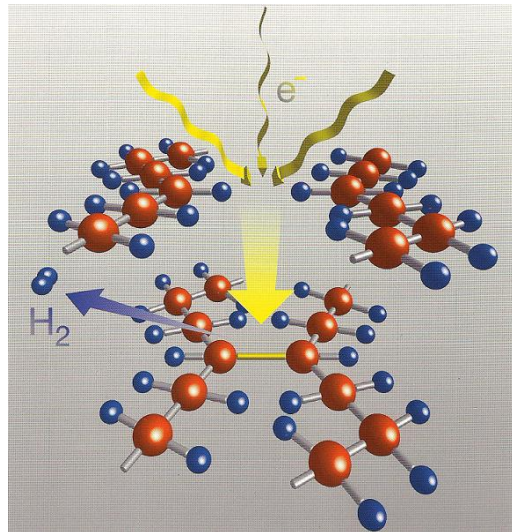
[5]

### 2.1 Radiační síťování

Radiační síťování probíhá při pokojové teplotě bez dodatečného namáhání výrobku. Jeho hlavní výhoda spočívá v tom, že je provedeno až po zpracovatelském procesu (po vstřikování, vytlačování nebo vyfukování). Variací ozařovacích parametrů lze měnit stupeň zesíťení, čímž ovlivníme vlastnosti materiálu tak, jak je požadováno.

Základním předpokladem je, aby materiál po dobu ionizačního záření síťoval, a ne degradoval. U některých polymerů je poté nutné přidavku pomocného síťovacího činidla.

Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály (rozpad vazeb C-H), ty pomocí rekombinace vytvoří v řetězci síť a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C.



Obr. 4. *Schéma radiačního síťování  
elektronovým zářením*

[5]

Pro radiační síťování se používá záření beta a gama, která na základě svých energií iniciují chemické procesy. V ozářených produktech přitom nevzniká žádná radioaktivita. Radiační síťování umožňuje vysokou flexibilitu ve volbě surovin, zlepšuje vlastnosti a má i výrobně-technické a ekonomické výhody. Díky tomu, že je radiační síťování oddělený technologický krok od zpracovatelského procesu, zůstávají odpady po zpracování nezesíťované a mohou být znovu použity při výrobě nového výrobku. [5]

### 2.1.1 Měrné jednotky techniky ozařování

Požadované změny vlastností u radiačního síťování určuje v první řadě dávka ozáření, tzn. množství absorbované energie záření na měrnou jednotku hmoty. Jednotka intenzity záření je Gray (Gy), dříve používaná jednotka byla rad.

Penetrace (hloubka pronikání) vysoce energetických elektronů popř. gama záření je závislá na jejich energii. Měrná jednotka energie je joule (J), dříve označovaná elektronvolt (eV).

Výkon zdroje radioaktivního záření je charakterizován jeho aktivitou. Jednotka je Becquerell.

### 2.1.2 Materiály pro radiační síťování

Pro výběr vhodného materiálu jsou rozhodující požadované užité vlastnosti výrobků. Využitím technologie radiačního síťování mohou být realizovány výrobky s mimořádnými technickými výhodami a efektem ekonomického zisku. V Tab. 2 vidíme některé materiály vhodné k zesíťování. [5]

Tab. 2 *Radiačně síťovatelné polymery*

Polyolefiny	CSM, chlorsulfonovaný polyetylen EEA, kopolymer etylenu s akrylátem EPDM, etylenpropylendienový kaučuk EVA, kopolymer etylenu s vinylacetátem PE, polyetylen (LDPE, HDPE, LLDPE,...) CM, chlorovaný polyetylen PP, polypropylen
Polyestery	PBT, polybutylentereftalát UP, nenasycená polyesterová pryskyřice
Halogenové polymery	CSM, chlorsulfonovaný polyetylen ETFE, kopolymer etylenu s tetrafluoretylenem FPM, fluor kaučuk PVC, polyvinylchlorid PVDF, polyvinylidenchlorid
Další polymery	PA, polyamid 6., 6.6, 11., 12 PVAL, polyvinylalkohol
Elastomery	ACM, polyakrylátový kaučuk, BR, polybutadienový kaučuk CR, polychloroprenový kaučuk, FPM, fluor kaučuk IR, polyizoprenový kaučuk NBR, butadien akrylonitrilový kaučuk NR, přírodní kaučuk SBR, butadien styrenový kaučuk, SBS
Termoplastické elastomery	FPM, fluor kaučuk, TPE-E, polyesterový termoplastický elastomer TPE-O, polyolefinický termoplastický elastomer TPE-S, polystyrenový termoplastický elastomer TPE-U, polyuretanový termoplastický elastomer

[5]

### 2.1.3 Zlepšení vlastností radiačně síťovaných plastů

Některé termoplasty díky radiačnímu zesíťování získávají v poměrně širokých teplotních oblastech vlastnosti elastomerů. Ty se projevují především nad teplotou tání krystalů, resp. teplotou skelného přechodu neupraveného polymeru.

V důsledku radiačního síťování může původně termoplastický výrobek odolávat vyšším teplotám. Tvarová stálost za působení tepla je značně zlepšena v porovnání s výchozím termoplastickým materiálem.

V důsledku ozařování dochází nejčastěji ke změnám mechanických, teplotních a chemických vlastností materiálu.

Radiačním síťováním dochází ke změnám následujících vlastností plastů:

Mechanické vlastnosti:

- nárůst Youngova modulu pružnosti,
- zvýšení pevnosti,
- snížení tažnosti,
- redukce studeného toku (creepu),
- zlepšení meze únavy (při střídavém ohybu),
- zvýšení pevnosti studených spojů,
- nárůst tvrdosti,
- zlepšení otěruvzdornosti,
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem.

Tepelných vlastností:

- zlepšení tvarové stálosti za tepla,
- cílenému nastavení teplotní roztažnosti,
- zlepšení trvalé deformace při zatížení tlakem (tahem),
- zvýšení tepelné odolnosti,
- zvýšení odolnosti proti působení žhavým drátem,
- vyšší odolnosti proti stárnutí.

Chemických vlastností:

- snížení rozpustnosti,
- zlepšení odolnosti proti bobtnání,

- zvýšení odolnosti proti trhlinám způsobených pnutími,
- zlepšení odolnosti proti hydrolýze,
- zvýšená olejuvzdornost. [5]

Tab. 3 Přehled možných aplikací v průmyslu a vlastností po ozáření

Aplikace	Materiál	Zlepšené vlastnosti
Palivová potrubí pro automobilový průmysl	Polyamidy 6, 66, 11, 12	Tepelná odolnost Odolnost proti hydrolýze  Pevnost v tlaku Pevnost
Vlité trubky Ochranné trubky Tlakové a sací potrubí	PE, TPE	Tepelná odolnost Pevnost v tlaku Odolnost proti okujím ze svařování
Smršťovací trubky Smršťovací hadice	PE	Zotavení materiálu „memory efekt“
Těsnění Profily	PE, TPE	Odolnost proti chemikáliím Tvarová stálost za tepla Tlaková zpětná deformovatelnost Snížení studeného tečení (creep) Možný nárůst tvrdosti Shore
Kabely a izolace vodičů	PE, TPU, PUR, PVC	Tepelná odolnost Odolnost proti okujím ze svařování Odolnost proti chemikáliím Odolnost proti otěru

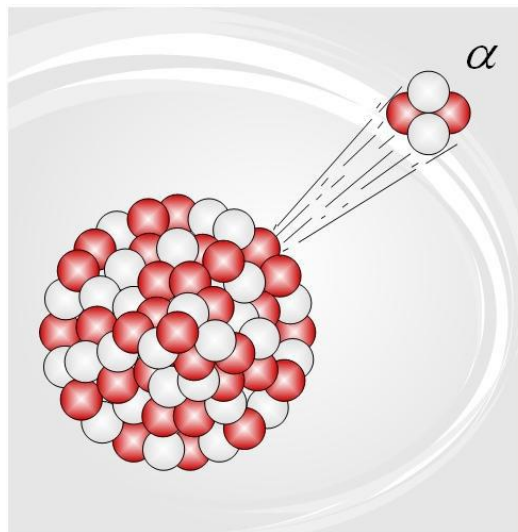
[5]



### 3 DRUHY ZÁŘENÍ

#### 3.1 Záření alfa

Jako částice alfa ( $\alpha$ ,  $He_{2+}$ ) označujeme jádro hélia. V podstatě jde o atom hélia bez elektronového obalu. Tvoří je dva protony a dva neutrony (jsou tedy kladně nabitě s elektrickým nábojem  $+2e$ ). [5]



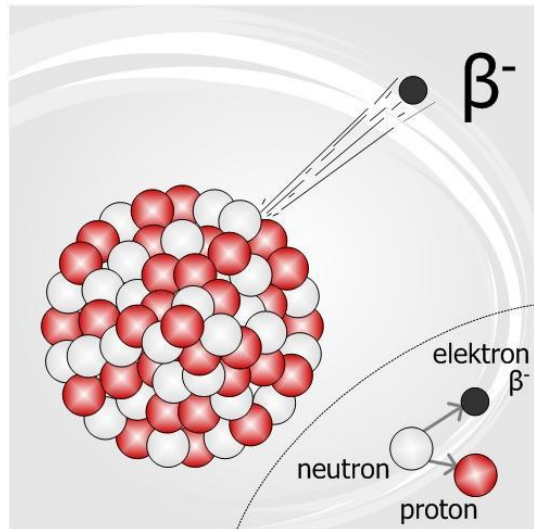
Obr. 5 Záření  $\alpha$

[5]

Proud  $\alpha$  částic se označuje jako alfa záření. K jeho pohlcení stačí list papíru, ve vzduchu se pohltí po několika centimetrech. Záření alfa se vychyluje jak v elektrickém tak v magnetickém poli. Částice alfa letí velkou rychlostí a mají silné ionizační účinky. Jejich kinetická energie se pohybuje mezi 2 MeV a 8MeV. [5]

#### 3.2 Záření beta

Záření beta jsou částice (elektrony nebo pozitrony), které jsou vysílány radioaktivními jádry prvků při beta rozpadu. Pohybují se velmi rychle, nesou kladný nebo záporný elektrický náboj a jejich pohyb může být tedy ovlivňován elektrickým polem. Jejich pronikavost je větší než u alfa částic, mohou pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou, k jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1 m nebo kovu o šířce 1 mm.

Obr. 6 Záření  $\beta$ 

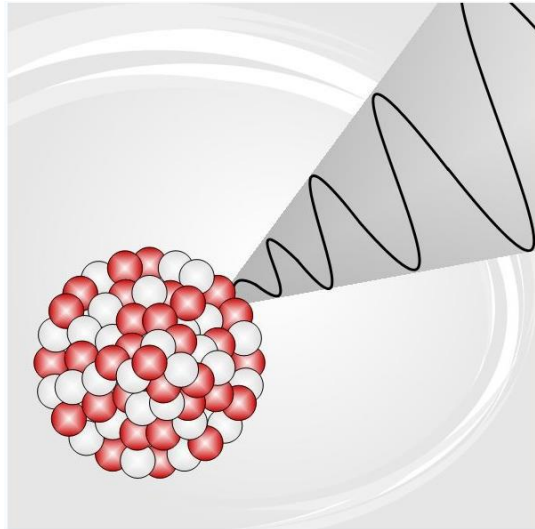
[5]

Záření beta mínus ( $\beta^-$ ) je proud elektronů  $e^-$ , které vylétují z jádra atomu. Malá hmotnost částic se projevuje výrazným zakřivením trajektorie částic jak v magnetickém, tak v elektrickém poli, avšak na opačnou stranu než záření alfa. Energie elektronů záření dosahuje 10 MeV a jejich rychlost se blíží rychlosti světla. Elektrony v jádře vznikají přeměnou z neutronu, za vzniku protonu a antineutrína.

Záření beta plus ( $\beta^+$ ) je proud pozitronů  $e^+$  vyzářovaných některými radionuklidy při jaderných přeměnách. Toto záření je však v praxi velmi vzácné a v drtivé většině případů se setkáme s prvním typem záření. [5]

### 3.3 Záření gama

Záření gama ( $\gamma$ ) je vysoce energetické elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních a jiných jaderných a subjaderných dějích. Gama záření silně ionizuje, uvolňuje z látky nabitě částice v důsledku fotoefektu. Zdrojem záření je jádro izotopu, který vznikl přeměnou radionuklidu. Toto jádro je excitované, v krátké době však přechází do základního stavu a tento přechod je spojen s vyzářením fotonů záření gama. [5]



Obr. 7 Záření  $\gamma$

[5]

Gama záření je díky své vysokoenergetické povaze využíváno jako účinný prostředek hubení bakterií při sterilizaci lékařských nástrojů nebo při ošetřování potravin pro zachování čerstvosti. [5]

## 4 RECYKLACE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

Podle kvalifikovaného odhadu tvoří odpadní plasty asi 7 % hmotnosti z celkového množství tuhého komunálního odpadu, avšak jejich objemový podíl je přibližně dvakrát vyšší. Hlavní proud odpadních plastů směřuje do komunálního odpadu z domácností, průmyslových a drobných živností. Tuto směs odpadních plastů tvoří především použité obaly a drobné užitné předměty s krátkodobou životností. [6]

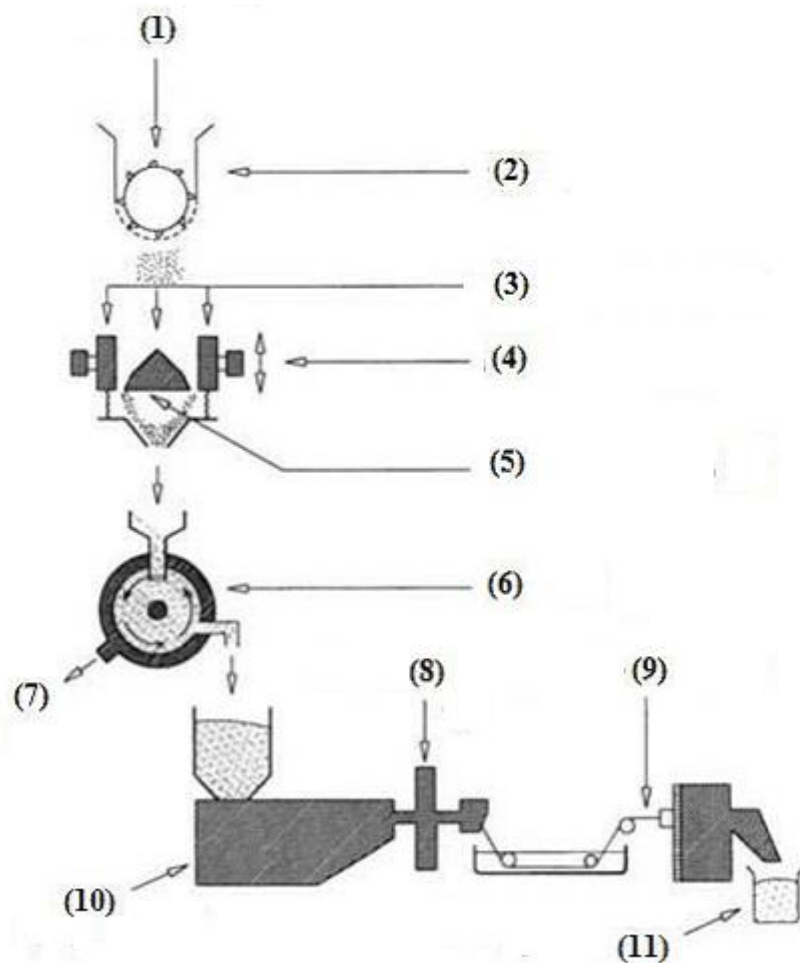
### 4.1 Recyklace polymerů

Mechanická nebo materiální recyklace polymerů zahrnuje mnoho zpracování a operací: rozdělování plastů, umývání pro odstranění špíny a nečistoty, rozmělnění a mačkání pro zmenšení velikosti plastových částic, protlačování za tepla a přepracování v novém plastovém zboží.

Navíc, většiny polymerů trpí určitou degradací během jejich používání kvůli efektu četných faktorů jako teplota, ultrafialové záření, kyslík a ozón. Tato degradace vede k progresivní redukci v délce a k částečné oxidaci polymerových řetězců.

Proto recyklované polymery obvykle vykazují nižší vlastnosti a výkonnosti než čistý materiál, a jsou vhodné pouze pro nenáročné aplikace. Recyklace plastů bez předchozího oddělení polymerů vyprodukuje materiál s mechanickými vlastnostmi podobné jako dřevo, z toho důvodu je často užíván jako náhradu dřeva v určitých aplikacích. Lepší kvalitarecyklovaných plastů je dosahována, když oddělení pryskyřic je prováděn před přetvářeným krokem. Avšak, ani v tomhle případě, recyklované plasty nemohou být použity v potravinových obalech, dokud se přímý kontakt s jídlem lze vyhnout.

Alternativa vynalezena v posledních letech pro propagaci užívání recyklovaných plastů byla příprava nádob s trojvrstevnými stěnami. Prostřední vrstva je nejsilnější a je vyrobena z recyklovaného polymeru, zatímco nejtenčí vnější a vnitřní vrstva jsou vyrobeny z přírodního materiálu. S tímto přístupem přímý kontakt mezi recyklovaným polymerem a oběma spotřebitelem a produktem v nádobě je zabráněn. [6]



Obr. 8 Proces mechanické recyklace plastů

1- odpad plastů, 2- drtič, 3- sekce vibračních sít, 4- kuželový lis, 5- pevný kužel, 6- jehlový mlýn, 7- spřádání, 8- měnič průvlastku, 9- granulování stroj, 10- vytlačovací stroj, 11- recyklovaný polymer

[6]

## 4.2 Recyklace výchozího produktu

Je založeno na dekompozici polymerů přes teplo, chemické látky a katalyzátory k vytváření variant produktů sahajících z počátečních monomerů k směsím sloučenin, hlavně hydrokarbonáty, s možnými aplikacemi jako zdroj chemikálií nebo paliv. Produkty se různěji z plastické dekompozice ukázaných vlastností a kvality podobné těm jejich protějškům připravovanými běžnými metodami.

Široká variace procedur a úprav byla zkoumána pro recyklace výchozího produktu plastových a gumových odpadů. Metody jsou klasifikovány do následujících kategorií:

[6]

- Chemická depolymerace reakcí s určitými prvky k získání počátečních monomerů.
- Zplynování kyslíkem nebo párou k produkci syntetického plynu.
- Tepelná dekompozice polymerů ohříváním v ochranném prostředí.
- Katalytické rozbíjení a přetváření. Polymerové řetězce jsou rozbíjeny efektem katalyzátorů, které podporují štěpující reakce.
- Hydrogenace. Polymer je zredukován spojenými postupy tepla, hydrogeniu a v mnohých případech katalyzátorů.

Vývoj a současný stav těchto alternativních metod recyklace výchozího produktu jsou popsány v následujících kapitolách. V současnosti, recyklace výchozího produktu je omezena procesem ekonomickým než-li technickými důvody. [6]

### 4.3 Rekuperace energie

Technologie spalování odpadů ve spalovnách jsou založeny na dvou metodách:

- spalování tuhých odpadů ve spalovnách
- spalování tuhých i kapalných odpadů v rotačních cementových pecích.

Odpady se zahřívají stykem s horkými spalinami, předeřhřátým vzduchem, sáláním ze stěn pece. Zbývající materiál se dále odplyňuje a hoří pomaleji.

Hlavními předpoklady pro spalování je dostatek:

- spalovacího vzduchu (1,5 – 2 nás. přebytek)
- tepla pro rychlé zahřátí odpadu na zápalnou teplotu 250 – 400 ° C. Při pomalém se část škodlivin nemusí spálit → odpaří se → unikne do ovzduší.
- teploty hoření. Vzhledem k zápalné teplotě sazí (700-750 ° C) je nutné, aby ve spalovací komoře neklesla teplota pod 800 ° C.

- zdržení spalin v pásmu vysokých teplot (v dohořívání komoře 1 až 2 s) ⇔ spalování látek neprobíhá okamžitě.

Spalování v pecích musí vyhovovat řadě vzájemně si odporujících požadavků. Např. papír shoří velmi rychle, ale balík časopisů nikoliv, pneumatika projde spalovacím zařízením jen ohořelá, hliník se taví a může zalepovat roštnice. [6]

Rotační pece jsou vyzděné válce s mírným sklonem, které se pomalu otáčejí a tím zajišťují míšení odpadů. Teplo je předáváno spalinami všemi třemi způsoby:

- sáláním plamene na odpady i na odkrytou část vyzdívky,
- sdílením tepla ze spalin na odpady,
- vedením tepla z horké vyzdívky do lože odpadů.

Tento typ pecí je zvláště výhodný pro směs průmyslových i komunálních odpadů, pastovité i kapalné odpady a kaly. Spalovací teploty jsou 1100 - 1200 °C. [6]

#### 4.4 Metody recyklace plastů

Při výrobě výrobků vzniká technologický odpad, což jsou například vadné výrobky, zbytky vtokových systémů při vstřikování a podobně. Tento odpad se nejčastěji zpracovává tzv. recyklací technologického odpadu, která spočívá v jeho rozdrčení, po kterém může následovat případná regranulace. Jak drť, tak regranulát se obvykle použije zpět do výroby. Uvádí se, že přídavek takového recyklátu v množství 5-15% neovlivní zásadně vlastnosti finálního výrobku. Recyklace použitých výrobků není tak jednoduchá. V samotném plastu došlo při jeho používání k mnoha změnám. Výrobek z plastu byl vystaven působení mnoha vnějších faktorů (teplo, světlo, mechanické ztížení), plast zestárl a změnily se jeho vlastnosti. Také mohlo dojít k jeho kontaminaci různými nečistotami.

U plastů z použitých výrobků existují v podstatě čtyři možnosti jejich recyklace:

- materiálová recyklace,
- chemická recyklace,
- surovinová recyklace
- energetická recyklace. [2]

#### 4.4.1 Materiálová recyklace

Pro co nejučinnější využití surovinového a energetického vkladu polymerního materiálu je předurčena materiálová (nebo též fyzikální) recyklace. Materiálová recyklace zahrnuje postupy spočívající v mletí upotřebených výrobků za vzniku drtě. Pokud se jedná o kontaminovaný odpad, je nezbytné zařadit do procesu i mytí popřípadě plavení drtě. Poté následuje sušení a případná regranulace. Drtě a regranuláty se používají podle svého složení a znečištění na výrobu méně náročných výrobků, v lepším případě lze získaný recyklát přidávat k panenskému plastu a opětovně zpracovávat na kvalitní výrobek. Tento způsob recyklace je pro termoplasty zvláště vhodný. Zahrnuje procesy od nejjednoduššího mletí upotřebených výrobků a následné tepelně mechanické zpracování meliva pro výrobu nových výrobků až po kompatibilizační postupy v tavenině sloužící k přípravě vícesložkových materiálů ze směsí odpadních plastů. Obecně je materiálová recyklace založena na dodávce tepelné a mechanické energie a aditiv (stabilizátorů, barviv případně i plniv) pro přetvoření odpadní suroviny na nový materiál s mechanickými i estetickými vlastnostmi blízkými panenskému polymeru. Může-li recyklát v dané oblasti nahradit v aplikační oblasti hodnotný panenský plast, tedy má-li požadovanou jakost, je ekonomická bilance této recyklace příznivá. Na operace čištění, separace cizích látek a zdrojů kontaminace, mletí a přetavení se spotřebuje přibližně 15% ekvivalentní energie panenského materiálu. Ekonomický efekt recyklace se však strmě snižuje s omezováním praktického uplatnění recyklátu v důsledku jeho nižší kvality. Kvalita recyklátu je silně závislá na charakteru vstupní suroviny. Pravděpodobnost získání kvalitního recyklátu klesá v řadě:

- typově tříděná vstupní surovina,
- druhově tříděná vstupní surovina,
- částečně tříděná vstupní surovina,
- netříděná surovina.

V některých případech je nutné nahradit částeční úbytek tepelných stabilizátorů polymeru po jeho prvotním zpracování, čili stabilizovat recyklovaný materiál, aby nebyla ohrožena kvalita výrobku. Odpadní plasty pocházející z komunálního sběru jsou však obvykle netříděné. Pro zpracování směsného plastového odpadu se často využívá pro tento účel zvlášť vyvinuté technologie „down-cycling“. Jedná se o míchání směsi plastů v tavenině ve



speciálním extruderu s vysokou hnětací účinností a bezprostředním vytlačováním taveniny do formy. Výhodou tohoto způsobu zpracování odpadních směsí je, že lze poměrně snadno získat i výrobky o poměrně velkém objemu. Nevýhodou jsou však nepříliš dobré mechanické vlastnosti finálního recyklátu, který tak může v aplikacích konkurovat pouze levným druhům dřeva nebo betonu. Tento způsob recyklace je vhodný pro výrobu masivních výrobků, jako jsou různé typy stavebních dílců (např. pro sloupky zpevnování svahů a břehů, zatravnovací panely pro zpevnění odstavných a parkovacích ploch, kabelové kanály), přepravních palet a dalších výrobků s podobnými (tj. nízkými) estetickými a pevnostními nároky. Ekonomická bilance tohoto způsobu recyklace plastů se často pohybuje na hranici rentability. Z dosavadních výsledků výzkumu je zřejmé, že za určitých podmínek je možné získat materiál o poměrně vysoké užitné hodnotě i ze směsi použitých plastů. Klíčovým problémem recyklace plastových směsí je účinná kompatibilizace jejich složek. Kompatibilizací se rozumí postup vedoucí ke zvýšení snášlivosti mezi nemísitelnými termoplasty ve směsi snížením mezifázového napětí, tedy postup, který vede ke zlepšení soudržnosti a tedy ke zlepšení mechanické pevnosti výsledného směsného materiálu.

Kompatibilizační postupy byly vyvíjeny pro získání vícefázových polymerních materiálů se speciálními vlastnostmi, mohou však být i použity pro recyklaci odpadních plastů. Aditivní postup kompatibilizace je založen na přidavku speciálních přísad, nazývaných kompatibilizátory složek směsi. Užití kompatibilizátorů má však i svá omezení. Je to především poměrně vysoká cena aditivních kompatibilizátorů, problematická zpracovatelnost reaktivně kompatibilizovaných směsí a také účinek kompatibilizačních systémů omezený jen na určité kombinace určitých polymerů. Univerzální kompatibilizátor libovolné směsi polymerů není (a zřejmě ani nebude) dostupný. Vzhledem ke složení směsných plastových odpadů z komunálních zdrojů je zřejmé (a praktické zkušenosti to také dokládají), že materiál o prakticky využitelných vlastnostech je možné získat pouze kompatibilizací jejich polyolefinické frakce. Separace polyolefinické ze směsi odpadních plastů je po technické stránce velice snadno proveditelná. Jedná se o tak zvanou flotační metodu neboli odplavení vodou. Polyolefiny na rozdíl od ostatních plastů ve vodě plavou. Kompatibilizací polyolefinů oběma uvedenými postupy byla v posledních dvou desetiletích věnována značná pozornost. Bylo zjištěno, že účinnými aditivními kompatibilizátory různých kombinací polyolefinů jsou blokové i statistické

ethylenpropylenové kopolymery, studovány však byly i reaktivní systémy na bázi organických peroxidů nebo záření. Všechny výše uvedené způsoby hodnocení odpadních polyolefinů jsou i prakticky využívány. Nejnovější způsob reaktivní recyklace je založen na radikálových reakcích složek polyolefinické směsi s kapalnými polybutadieny a byl úspěšně vyzkoušen na různých druzích skutečných směsí odpadních polymerů v průmyslovém měřítku. [2]

#### 4.4.2 Chemická recyklace

Materiálová recyklace není racionálně využitelná pro všechny druhy vstupní suroviny. Některé polymery jsou ze své podstaty zvláště náchylné k degradaci při opakovaném zpracování, což komplikuje jednak samotné technologické provedení recyklace a jednak významně zhoršuje kvalitu recyklátu. Dalším faktorem komplikujícím využití materiálové recyklace je požadavek na poměrně vysokou čistotu vstupní suroviny. V takových případech může být racionálním východiskem chemická recyklace. Chemická recyklace je založena na chemickém rozkladu polymeru na produkty o podstatně nižší molární hmotnosti (oligomery), nebo až na monomerní jednotky a dalším chemickým zpracování takto získané suroviny. Nejvýznamnější výhodou tohoto způsobu recyklace jsou poměrně nízké nároky na vstupní čistotu odpadních plastů. Nevýhodou jsou naopak poměrně vysoké investiční nároky na technologické zařízení a praktická uskutečnitelnost jen v podmínkách chemického průmyslu ve spojení s již existujícími procesy (např. s polymerační jednotkou). Nejjednodušším případem chemické recyklace je tepelná depolymerace. Některé polymery při vysokých teplotách podléhají degradaci tzv. zipovým mechanismem, kdy se z konců polymerních řetězců postupně odštěpují monomerní jednotky. Takový mechanismus tepelné degradace vykazuje např. polystyren (PS) nebo polymethylmethakrylát (PMMA). Získané monomery je možné po vyčištění bez zvláštních problémů opět polymerovat na panenský polymer původní kvality. V současné době je tento proces jen v omezené míře využíván pro recyklaci polymethylmethakrylátového organického skla. Produktem rozkladu je methymethakrylát, který je následně polymerován na panenský PMMA. Poměrně malá spotřeba tohoto materiálu a tedy i malý podíl v plastovém odpadu nevede k rozšiřování popsání recyklačního postupu.

Většího praktického významu doznaly procesy založené na rozkladu polykondenzátů účinkem vybraných nízkomolekulárních látek, označované jako solvolýza. Tímto

způsobem je možné recyklovat materiály na bázi polyamidů (PA), polyurethanů (PU) a zvláště pak lineárních polyesterů, např. polyethylterfthalátu (PET). Podstatou solvolytického je obrácení vratné polykondenzační reakce směrem k odbourávání monomerních jednotek z řetězců polymeru. Stále většího praktického významu pak nabývá tento postup pro recyklaci PET, hlavně v souvislosti se stále se zvyšujícím objemem odpadního PET z nápojových lahví. Společností DuPont vyvinutá technologie, označovaná jako „PETRETEC“ umožňuje zpracovávat odpadní PET znečištěný až 10% cizorodých látek. Specializovaný závod na recyklaci PET technologií „PETRETEC“ byl ve státě Tennessee uveden do plného provozu již v roce 1995. Kromě solvolýzy mohou být lineární polyestery rozkládány také na principu reesterifikace přebytkem příslušného diolu. Výsledkem takového rozkladu je směs oligomerů, vlastnosti (dané střední molární hmotností) je možné poměrně snadno řídit dávkováním diolu do reakční směsi. Prakticky je využíván tento princip při glykolýze PET na oligomerní produkty, které jsou využívány jako surovina pro výrobu polyesterových pryskyřic, nátěrových hmot nebo u polyurethanových lehčených materiálů. Na rozdíl od methanolýzy PET, která snese i poměrně masivní znečištění, je glykolýza PET poměrně citlivá na přítomnost cizorodých látek. Ekonomická bilance chemické recyklace je negativně ovlivněna hlavně velmi vysokými investičními náklady na specializovanou recyklační jednotku. Investovat do výstavby specializované recyklační jednotky je ekonomicky schůdné pouze v případě bezpečného zajištění dostatečného objemu vstupní suroviny a příslušného objemu odběru produktu (recyklátu). Praktické zkušenosti ukazují, že spodní hranicí rentabilnosti jednotky na recyklaci je kapacita cca 5 kt/rok. Za předpokladu, že odpad je dodáván do recyklačního závodu za nulovou cenu (například na náklady producentů odpadu) jsou výrobní náklady na tunu odpadu z odpadní suroviny zhruba stejné jako v případě jeho výroby z původních petrochemických surovin. [2]

#### 4.4.3 Surovinová recyklace

Ze silně znečištěných směsí různorodých plastových složek, např. z frakce komunálního plastového odpadu o hustotě vyšší než  $1 \text{ g/cm}^3$  není už prakticky možné získat recyklací hodnotnější materiál než vlastní surovinovou bázi. Principem surovinové recyklace jsou termicky destrukční procesy rozkládající polymerní složky vstupní suroviny na směs plyných a kapalných uhlovodíků. Výstupní produkty surovinové recyklace jsou tedy

energeticky využitelný plyn a směs kapalných uhlovodíků využitelných jako topné oleje, nebo

jako petrochemická surovina. Surovinové zhodnocení odpadních plastů může být provedeno chemickým postupem hydrogenace (vysokotlaký katalytický proces), nebo pyrolýzy (nízkotlaký proces, vyšší teplota). Produktem hydrogenačních procesů jsou převážně kapalně uhlovodíky, pyrolýzní procesy vedou k plynným produktům a koksu. Firma Shell pak vyvinula originální postup přeměny plastového vstupu na syntézní plyn (směs oxidu uhelnatého a vodíku). Jako hlavní výhody tohoto procesu jsou uváděny nízké nároky na kvalitu plastového vstupu a širokou využitelnost syntézního plynu v chemickém průmyslu. Technologicky i ekonomicky jsou výhodné postupy založené na společném zpracování odpadních plastů s uhlím. Při tomto způsobu zpracování se využívá schopnosti uhlí předat vodík. Společné zpracování uhlí a odpadních plastů umožňuje využít následujících postupů:

- společná pyrolýza,
- společné zplynění,
- společné zkapalnění.

Společná pyrolýza plastové odpadní suroviny s uhlím je z uvedených postupů nejméně náročná na investice do technologického zařízení a předpokládají se i nejnižší provozní náklady. Touto cestou lze získat kromě plynných produktů, které jsou zužitkovány při krytí energetických nároků procesu a poměrně nízkého podílu kapalných produktů hlavně koks, který se vyznačuje zvláště velkým specifickým povrchem. Praktickými zkouškami bylo prokázáno, že takto vyrobený koks má velmi vysoké adsorpční účinky a je zvláště vhodný pro čištění odpadních vod a vzduchu.

Za nejnadějnější se dnes považuje společné zkapalnění, i když je to investičně nejnákladnější technologie. Produkuje převahu nasycených uhlovodíků, v podstatě lehkou nasycenou ropu. Přístup k využití odpadních plastů se v různých zemích liší. V současné době se v Německu spíše preferuje společné zplynění (s kyslíkem a vodní parou), ve Spojených Státech je vývoj orientován na společné zkapalnění. Ve Francii se nepovažuje za perspektivní ani jeden druh zhodnocení odpadních plastů a preferuje se pouze jejich energetické využití společným spalováním s uhlím.

Posledním způsobem recyklace je energetické využití jinak nevyužitelného plastového odpadu. Podstatou metody je spalování (obvykle společně s uhlím) ve speciálně konstruovaných topeništích. Užitečným výstupem je tepelná energie. Vhodně navržené

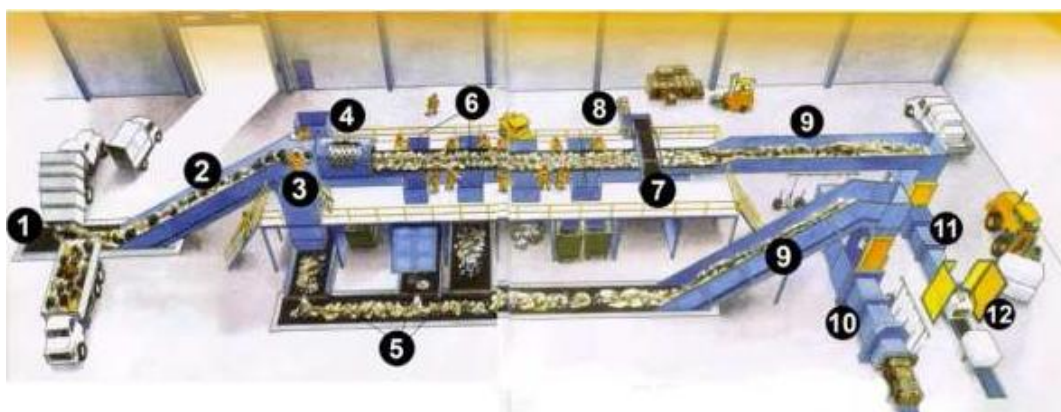
topeniště a technologické podmínky spalování vylučují možnost vzniku toxických plyných produktů při spalování plastů například dioxinů. Ekologicky závadné produkty spalování, vznikající zejména z PVC, polyamidů, polyurethanů a pryží, jsou ze směsi spalin vhodně neutralizovány především na pevnou formu. Například chlorovodík uvolněný spalováním PVC je vázán do tuhého chloridu vápenatého, síra z pryží na inertní síran vápenatý (sádra do stavebnictví) a oxidy dusíku z polyamidů jsou převedeny na nezávadné dusíkaté soli. Surovinová a chemická recyklace patří svojí povahou do pochodů chemické recyklace a nejsou příliš vhodné pro široké použití. [2]

#### 4.4.4 Energetická recyklace

Podstatou energetické recyklace je využití tepelné energie vznikající při spalování jinak nevyužitelného plastového odpadu. Plasty se spalují ve speciálně konstruovaných topeništích, obvykle společně s uhlím. [2]

#### 4.4.5 Třídící linka

O samotný proces recyklace se stará třídící linka. Na začátku linky jsou plasty vyseparovány od ostatního odpadu. Plasty je dále možno lisovat a exportovat ve formě lisovaných balíků. Druhý způsob je mletí, při kterém vznikají tzv. drtě, které je možno dále ještě různými způsoby upravovat. Nejčastěji se drtě perou (exportovány pak jsou jako prané drtě), suší (exportovány jsou jako sušené drtě) či je možné je ještě aglomerovat nebo regranulovat a výstupem pak jsou aglomeráty a regranuláty.



Obr. 9 Třídící linka

1 – přijímací dopravník, 2 – plnicí dopravník, 3 – předtříd'ovací stanoviště, 4 – bubnové síto, 5 – zásobníkový dopravník, 6 – třídící stanoviště, 7 – magnetický separátor, 8 – kovový lis, 9 – plnicí dopravník, 10 – balička netříděného odpadu, 11- balička tříděného odpadu, 12- balička fólie

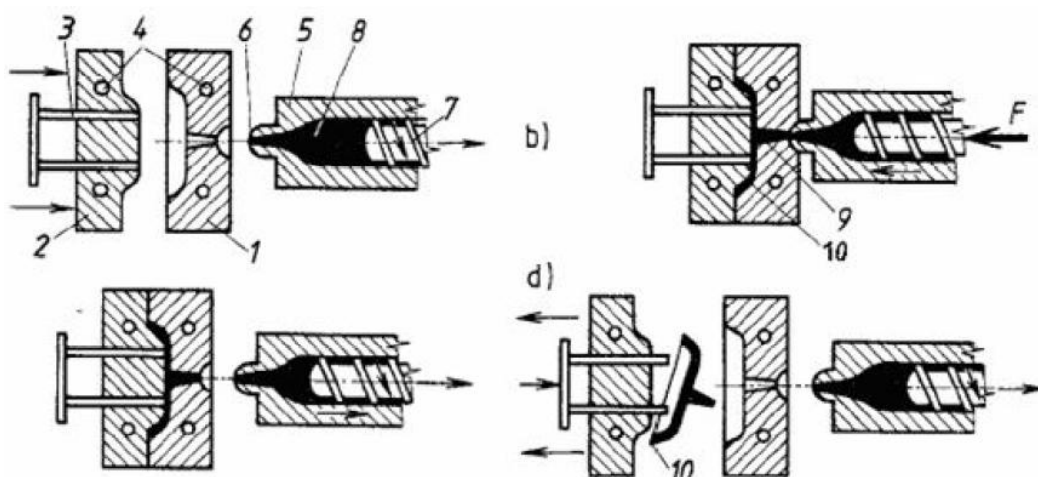
[2]

## 5 VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování plastů je poměrně složitý tepelně-mechanický proces tváření, na kterém se podílí výchozí materiál, ze kterého se vyrábí požadovaná součást, výrobní cyklus především se vstřikovacím strojem a ostatním zařízením, umožňující přípravu taveniny a její dopravu za určitých podmínek do formy; forma je nástroj pro vlastní tváření taveniny na součást. Vlastní výroba vstřikováním pak probíhá nadávkováním a plastikací polymeru ve vstřikovacím stroji, jeho dopravě za teploty a tlaku do dutiny formy.

Výstřiky mohou mít hmotnost 1g až několik kilogramů. Obvykle ocelová forma je chlazená protékajícím temperančním činidlem a má vyhazovací zařízení. Hmota ve formě ochlazením ztuhne a po jejím otevření je hotový výstřik automaticky vysunut z formy. Celý pracovní cyklus trvá jen málo desítek sekund, a proto je vstřikování termoplastů nejrozšířenější a nejlevnější technologií pro velkosériovou výrobu tvarových předmětů. Forma může být jednonásobná nebo vícenásobná, např. až pro 40 drobných výrobků na jeden vstřikovací cyklus.

Vstřikování reaktoplastů a elastomerů je podobné jako vstřikování termoplastů. Rozdíl je v tom, že ocelová forma je zde vytápěná na 120 až 200°C (dle zpracovávaného materiálu), aby v ní po vstřiknutí materiálu mohlo proběhnout zesíťování polymerních řetězců, tj. vytvrzení u reaktoplastů nebo vulkanizace u elastomerů. Tím se prodlužuje pracovní cyklus od 2 až několik minut.



Obr. 10 Princip vstřikování termoplastů

1 - pevná část formy, 2 - pohyblivá část formy, 3 - samočinné vyhazovače, 4 - kanálky pro chladičí vodu, 5 - topný válec, 6 - tryska, 7 - šnek, 8 - termoplast, 9 - vtok, 10 – výstřík

Vstříkovací cyklus:

- Plastikace: forma se zavírá, šnek se otáčí a vrací, plastikuje roztavenou hmotu a dopravuje ji k trysce.
- Vstřík: vstříkovací jednotka se přisune k formě, šnek se posune dopředu jako píst a vstříkne taveninu do formy.
- Ukončení vstříku: po dokončení vstříku následuje dotlak a po ztuhnutí vtoku se vstříkovací jednotka odsune od formy. Šnek se otáčí a vrací zpět a plastikuje další dávku taveniny.
- Otevření formy: po úplném ztuhnutí celého výstříku se forma otevře a výstřík se pomocí vyhazovacího systému vyhodí.

Celý vstříkovací cyklus realizují vstříkovací stroje. Musí tedy mít uzavírací jednotku ovládající formu (uzavírání, otevírání, vyhazování výstříku) a vstříkovací jednotku zajišťující přípravu taveniny a její vstříknutí do uzavřené formy. [1]



## 6 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ- ZKOUŠKA TAHEM

Zkoušky mechanických vlastností lze rozdělit takto:

- Mechanické vlastnosti zjišťované *krátkodobým působením statické síly nebo statického napětí*. Zjišťuje se chování materiálu za konkrétních podmínek napětí, deformace, teploty a času. Jednotlivé podmínky se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušky, s výjimkou doby trvání zkoušky, která se buď nemění vůbec, nebo jen v mezích, které nemají vliv na hodnotu zjišťované vlastnosti. Krátkodobých zkoušek se používá hlavně pro rychlou kontrolu jakosti. Hlavním požadavkem je dobrá reprodukovatelnost výsledků bez zřetele na možnost jejich širšího využití v praxi.
- Mechanické vlastnosti zjišťované *dlouhodobým působením statické síly nebo statického napětí*. Zjišťuje se chování materiálu za konkrétních zkušebních podmínek v podstatně delším časovém úseku, než je tomu u zkoušek krátkodobých. Zjišťují se závislosti hodnot zkoušených vlastností na čase. Podmínky zkoušky (napětí, teplota, event. vlhkost) se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušky. Dlouhodobé zkoušky slouží ke zjišťování inženýrských vlastností, jejichž znalost podmiňuje správnou aplikaci plastických hmot.
- Mechanické vlastnosti zjišťované *cyklicky nebo acyklicky měnícím se napětím*. Zkouší se únava materiálu za určitých podmínek časově proměnného namáhání, konstantní teploty event. vlhkosti. Doba trvání zkoušky je buď předepsána, nebo závisí na odolnosti materiálu proti únavě (zkouška do porušení). [5]

### 6.1 Tahová zkouška

Zkouška tahem je jednou z nejdůležitějších a nejfrekventovanějších statistických zkoušek v technické praxi. Princip této zkoušky spočívá v zatěžování zkušebního tělesa statickým jednoosým tahem.

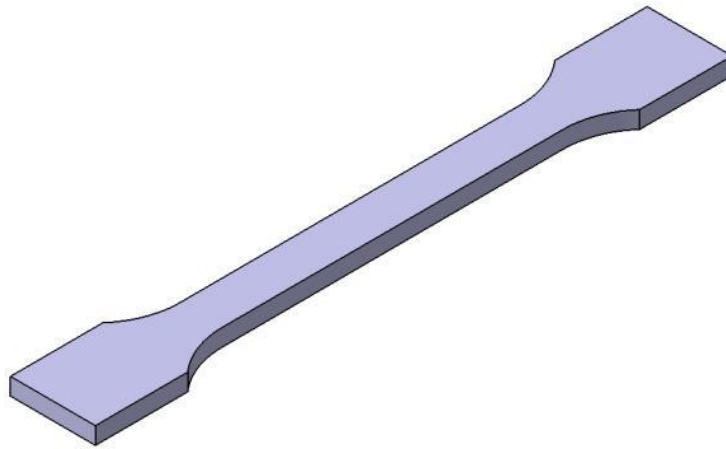
Grafickým znázorněním tahové zkoušky jsou pracovní diagramy, které poskytují informace o deformačním chování materiálů za různých podmínek zkoušení.

U plastických hmot je v důsledku anizotropie napětí v tahu rozloženo po průřezu nerovnoměrně, což je příčinou vzniku smykových napětí. [5]

### 6.1.1 Zkušební tělesa

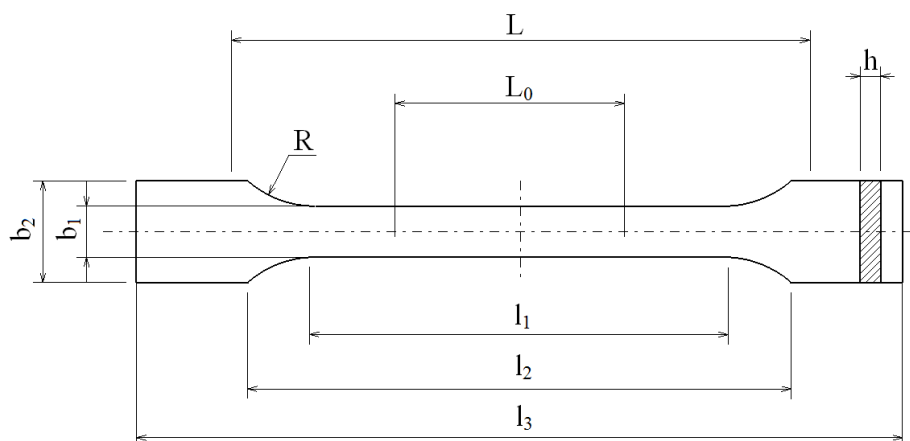
Zkušební tělesa pro tahovou zkoušku se od sebe liší nejen svými rozměry, ale i tvarem. Různý je také způsob přípravy, tělesa mohou být připravena tvářením nebo mechanickým opracováním, vysekáváním z lisovaných nebo vstříkovaných desek. Normalizovaná tělesa pro zkoušku tahem jsou uvedena v normě ČSN EN ISO 527. [5]

Tělesa mají tvar oboustranných lopatek – tzv. osmiček.



Obr. 11 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku

[5]



Obr. 12 Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku tahem

[5]

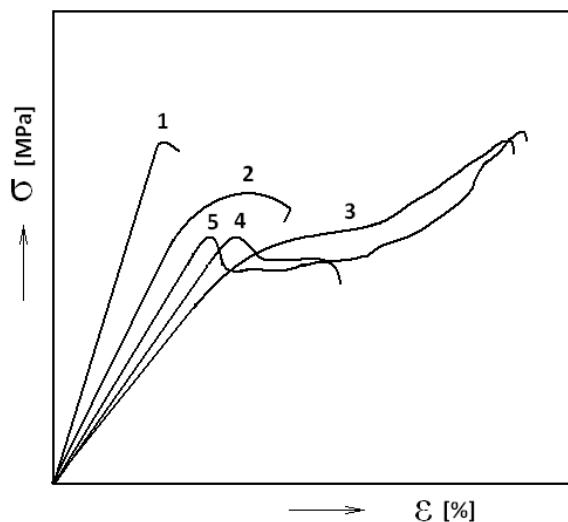
Tab. 4 Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku plastů

	Druh rozměru	Rozměry [mm]	
		Typ 1A	Typ 1B
$b_1$	Šířka pracovní části	$10 \pm 0,2$	
$b_2$	Šířka upínací části	$20 \pm 0,2$	
$l_1$	Délka pracovní části	$80 \pm 0,2$	$60 \pm 0,2$
$l_2$	Vzdálenosti mezi širokými částmi	104 -113	106 -120
$l_3$	Celková vzdálenost	$\geq 150$	
$L_0$	Počáteční měřená délka	$50 \pm 0,2$	
L	Vzdálenost čelistí na počátku	$115 \pm 1$	$l_2^{\pm 5}_0$
h	Tloušťka tělíska	$4 \pm 0,2$	
R	Poloměr	20-25	$\geq 60$

[5]

### 6.1.2 Tahová křivka

Grafické znázornění závislosti napětí  $\sigma$  na poměrném prodloužení měřené části zkušebního tělesa  $\Delta l = l - l_0$  představuje u každé plastické hmoty jiný charakteristický pracovní diagram.

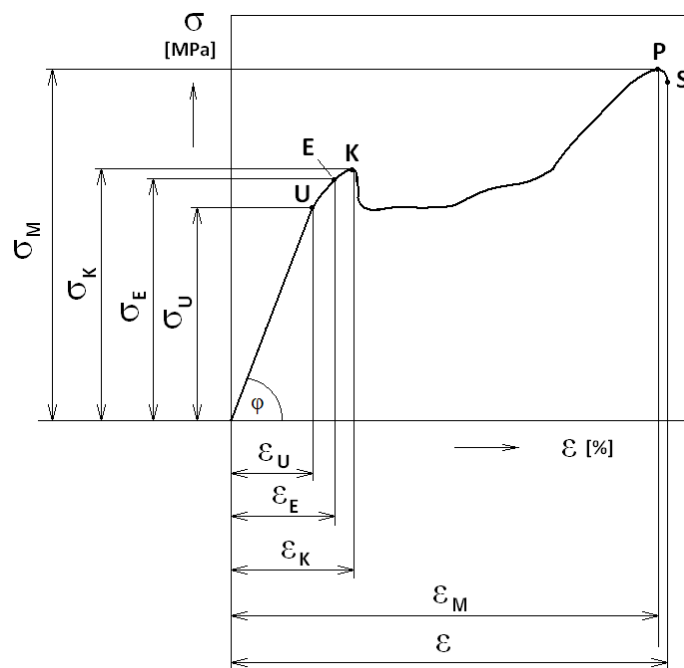


Obr. 13 Typy pracovních diagramů  
plastických hmot

[5]

1 – křehká, 2 – houževnatější, 3 – houževnatá s velkým prodloužením, 4 – vyznačující se horní a dolní mezi kluzu, avšak malou tažností, 5 – s horní a dolní mezi kluzu a velkou tažností

Na křivce pracovního diagramu lze vyznačit několik důležitých bodů: E – mez pružnosti  $\sigma_E$ , U – mez úměrnosti  $\sigma_U$ , K – mez kluzu  $\sigma_K$ , P – mez pevnosti neboli pevnost v tahu  $\sigma_M$ , S – napětí při přetržení. Bodům odpovídají hodnoty tažnosti  $\varepsilon_E$ ,  $\varepsilon_U$ ,  $\varepsilon_K$ ,  $\varepsilon_M$ .



Obr. 14 Pracovní digram tahové zkoušky

[5]

Mez úměrnosti:

Je takové mezní napětí, pro které platí úměrnost mezi napětím a celkovou deformací. Je to bod na křivce, do kterého platí hookovské chování materiálu, a vyjadřuje se smluvním napětím:

$$\sigma_U = \frac{F_U}{A_0} \quad [\text{MPa}]$$

(1)

Mez pružnosti:

Po překročení meze úměrnosti vzrůstá deformace zkušební tělesa rychleji než příslušné napětí. Přestane-li v určitém okamžiku napětí působit, deformace okamžitě zcela nevymizí.

Po okamžitém vymizení ideálně elastické deformace zůstává ještě deformace viskoelastická neboli zpožděně elastická, jejíž vymizení je časově závislé. Působí-li napětí delší dobu, dochází k částečně plastické deformaci, dokonale nevratné.

Mez pružnosti je největší napětí, při jehož odstranění prakticky úplně vymizí deformace měřené části zkušební tělesa. Označuje se  $\sigma_E$  :

$$\sigma_E = \frac{F_E}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Mez kluzu:

Pokud se napětí zvětšuje nad mez úměrnosti, hodnota modulu pružnosti (Youngova modulu) stále klesá. Zatímco napětí stoupá pomalu (nebo se jeho vzrůst zastaví), prodloužení se stále zvětšuje.

Mez kluzu  $\sigma_K$  je nejmenší napětí, při němž nastávají podstatné trvalé deformace. Lze ji vyjádřit smluvním napětím:

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

Mez pevnosti v tahu:

Při zvětšení napětí nad mez kluzu se zkušební těleso přetrhne. Jaký průběh mohou mít pracovní křivky plastických hmot je patrné na obr. 16. U křivky č. 1 pozorujeme, že k přetržení dojde prakticky okamžitě po dosažení meze kluzu. Mez kluzu je zde současně i pevností v tahu. U těchto typů plastických hmot nedochází k zúžení průřezu v místě přetržení. Lom je zpravidla rovinný, označujeme jej jako křehký. U křivky č. 2 je zkušební těleso přetrženo brzy po překročení meze kluzu. Ta je největším napětím dosaženým při zkoušce a je současně i pevností v tahu. Při přetržení dochází k vzniku krátkého zúžení. Křivka č. 3 se vyznačuje tím, že nemá mez kluzu. U těchto materiálů se za pevnost v tahu

považuje smluvní mez kluzu. Pro křivku č. 4 je charakteristická horní a dolní mez kluzu. Zkušební těleso se přetrhne brzy po překročení meze kluzu, kdy hmota ztrácí mechanickou pevnost. Křivka č. 5 se od předchozí liší chováním za dolní meze kluzu. To je způsobeno orientací molekul těchto plastických hmot.

Mez pevnosti v tahu je definována jako napětí potřebné k přetržení zkušebního tělesa vztažené na původní průřez: [5]

$$\sigma_M = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

## 7 DRCENÍ A MÍCHÁNÍ GUMÁRENSKÝCH SMĚSÍ

Drtiče a mlýny se používají k rozmělnování kusových nebo sypkých materiálů. Velikost částic je při tom nahodilá a charakterizuje se distribuční křivkou. Rozměr částic lze zmenšit působením tlaku, řezu nebo tření, případně jejich vzájemnými kombinacemi. Účinek sil může být klidný nebo nárazový. Podle toho bylo vyvinuto mnoho různých typů drtičů a mlýnů, z nichž některé budou podrobněji popsány. [9]

### 7.1 Válcové a kuželové mlýny a drtiče

K mletí se používají dvouválce s poměrně krátkými válci ( $L:D=1,4$ ). Materiál je do štěrbiny vtahován třecími silami, které vznikají mezi materiálem a povrchem válce. Válce jsou hladké nebo rýhované. Používá se také poměrně vysoký skluzový poměr. Válce se zpravidla chladí. Pro jemné mletí past a disperzí se používají třecí jednoválce a víceválce. K drcení rozsekaných ojetých pláštů, zbavených lanek, se používá kuželový drtič. Fréma přechází v horní části v komoru, která má na vnitřním povrchu žebra a je chlazená vodou. Rotor je rovněž žebrovaný. Šroubovicová žebra se směrem dolů zmenšují a také se zvětšuje jejich počet. Ze spodní strany je rotor chlazen vodou, rozstříkovanou z prstence. Rotor je poháněn od elektromotoru přes rozběhovou spojku a dva ozubené převody. Vůle mezi žebry rotoru a komory se nastavuje ručně axiálním posuvem rotoru pomocí šnekového převodu. Výstup je uspořádán tangenciálně a odvádí dří na dopravník, kde magnetický odlučovač odstraňuje kovové zbytky. Potom se drť dále zjemňuje na mlýnech. Podobnou konstrukci jako kuželový drtič má talířový mlýn. [9]

### 7.2 Nožové mlýny

Nožové mlýny rozmělnují materiál převážně řezným účinkem mlecích nástrojů. V mlecím prostoru se otáčí rotor, na kterém jsou upevněny nože. Ve skříni jsou upevněny satorové nože. Jejich počet i rozložení musí být voleny tak, aby řez proti nožům rotoru nastával současně po celé délce. Obvodová rychlost bývá 10-15 m/s a poměr  $L:D$  asi 2:1. Někdy je rotor sestaven z několika částí, které jsou na hřídeli proti sobě pootočený, aby řez nenastával v celé délce rotoru najednou. Řezné úhly na nožích se mění podle druhu zpracovávaného materiálu. Mlecí prostor ve spodní části skříně je omezen roštem nebo děrovaným plechem. Volbou světlosti otvorů se reguluje jemnost mletí. Rošt je lehce

odklopný. Materiál vstupuje do mlecího prostoru prodlouženou násypkou, která je přístupná z boku přes zpětný závěs. Před závěsem bývá magnetický odlučovač kovů. Pohon rotoru je odvozen od elektromotoru klínovými řemeny, které představují pružný článek při nárazovém přenosu kroutícího momentu.

Nožové mlýny jsou řešeny v různých konstrukčních variantách. Při vertikálním uspořádání Osy rotoru je rotor uložen letmo a materiál přichází do mlecího prostoru ve směru osy. Rozemletý materiál se z mlecího prostoru odsává přes rošt nebo děrovaný plech, podobně jako v předchozím případě.

K přípravě jemných prášků se používá speciální nožový mlýn. Nožové mnohobřité segmenty jsou upevněny jak na rotoru, tak i na víku. Metací kolo má šest ramen s noži a otáčí se v opačném smyslu než rotor. Vzdálenost mezi segmenty se nastavuje podle požadované jemnosti mletého materiálu. Víko má chladicí prostor. Na uvedeném typu mlýna se melou PA, PP, PE a případně za snížených teplot pro práškové technologie.

Na nožových mlýnech se často zpracovává odpad PVC, PE, houževnatého PS atd. Vyrábějí se různými výkony. Měrná spotřeba energie se pohybuje mezi 600 až 300 Wh/kg. Získaný produkt je polydisperzní a pro další zpracování se zpravidla musí řídit podle velikosti částic. [9]

### 7.3 Fluidní míchačky

Fluidní míchačky se používají k přípravě sypkých směsí. Sypký materiál se intenzivním mícháním provzdušní natolik, že se chová jako kapalina, a lze do něho dávkovat i kapalné složky, např. změkčovač. Při míchání se materiál zahřívá a původní práškový materiál vytváří hrubé částice, označované také jako hrudky. Zamíchaná směs je horká a může se přímo zpracovat na granulát či fólie. Má-li se však skladovat, musí se směs přiměřeně ochladit. V takovém případě je třeba zařadit za sebou dva stupně, z nichž první se označuje jako horký a druhý jako chladný stupeň. Horký stupeň tvoří válcová nebo mírně kuželová nádoba s vertikální osou. Nádoba je opatřena topným pláštěm a tepelnou izolací. Ve spodní části nádoby je umístěno míchadlo zpravidla turbínového typu, které uvádí navážku do vířivého pohybu (do vznosu). Nádoba se vyprazdňuje výpustí, která se uzavírá pneumaticky. [9]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 8 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Úkolem praktické části bylo:

- Příprava zkušebních vzorků.
- Provedení tahových zkoušek.
- Vyhodnocení výsledků.
- Stanovit možnosti využití výrobků modifikované radiacním zářením.

### 8.1 Materiály pro měření

Byly použity dva typy polymerních materiálů a to nízkohustotní polyethylen (LDPE) BRALEN VA 20- 60 firmy Slovnaft Petrochemicals a vysokohustotní polyethylen (HDPE) TIPELIN PS 380 – 30/302 taktéž firmy Slovnaft Petrochemicals.

Vlastnosti LDPE:

- Index toku taveniny: 22 g/10min,
- Hustota: 914 kg/m<sup>3</sup>,
- Mez pevnosti v tahu: 8 MPa,
- Teplota měknutí: 84 °C,
- Tvrdost Shore D: 41

Vlastnosti HDPE:

- Index toku taveniny: 0,95 g/10min,
- Hustota: 948 kg/m<sup>3</sup>,
- Pevnost při přetrhnutí: 31 MPa,
- Teplota měknutí: 118 °C,
- Tvrdost Shore D: 61

### 8.1.1 Příprava směsí LDPE a HDPE pro měření

Po dodání materiálu HDPE ve formě trubek (obr. 15), které byly ozářeny beta zářením o energii 10 MeV o dávce 165 kGy a to německou firmou BGS Beta-Gamma-Servise GmbH & Co.KG byl vyroben firmou MEL-BAX mletím jemný prášek, uvedený na obr. 16.



Obr. 15 *Trubka z HDPE*



Obr. 16 *Ozářený prášek HDPE*

Poté byly připraveny směsi v různých poměrech a to z ozářeného a neozářeného prášku. Ozářený prášek HDPE byl míchán o různých poměrech a přidáván do neozářeného prášku LDPE a HDPE. Po vstříknutí tělísek s různým množstvím plniva ozářené směsi HDPE a neozářené směsi LDPE se tato zkušební tělíska znovu ozářila a porovnávala s neozářenými zkušebními tělísky s různým množstvím plniva ozářené směsi HDPE a neozářené směsi LDPE. Měření probíhá za pokojové a zvýšené teploty 80 °C. Směsi obou materiálů jsou uvedené v následujících tabulkách.

Tab. 5 Poměry směsí ozářeného a neozářeného LDPE

Typ směsi	Množství prášku LDPE [%]	Množství ozářeného prášku HDPE [%]
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50
7	40	60

Tab. 6 Poměry směsí ozářeného a neozářeného HDPE

Typ směsi	Množství prášku HDPE [%]	Množství ozářeného prášku HDPE [%]
1	100	0
2	90	10
3	70	30
4	50	50

## 8.2 Sítová analýza

Sítová analýza je proces sloužící v mnoha odvětvích k posouzení rozložení velikosti částic zrnitého materiálu. Tato metoda patří do úzké skupiny separačních technik analýzy velikosti částic. Analýza na sítích je založena na využití sady sít se známou velikostí otvorů, která se sestavuje ve směru gravitačního transportu analyzované látky do bloku s postupně se zmenšující velikostí otvoru. Tuhé látky se můžou analyzovat v suchém stavu nebo ve formě suspenze. Po ukončení analýzy zůstává na každém sítu určitá část

z původního vzorku, která obsahuje částice v mezích určených velikostí otvorů horního a dolního síta. Zbytek na sítu se zváží a výsledek se vyhodnocuje jako hmotnost frakce s definovaným rozmezím velikosti částic. Výsledek sítové analýzy v podobě hmotnostního obsahu jednotlivých frakcí a zároveň zisk reálného vzorku s definovaným rozměrem částic patří k největším výhodám této metody. [12]



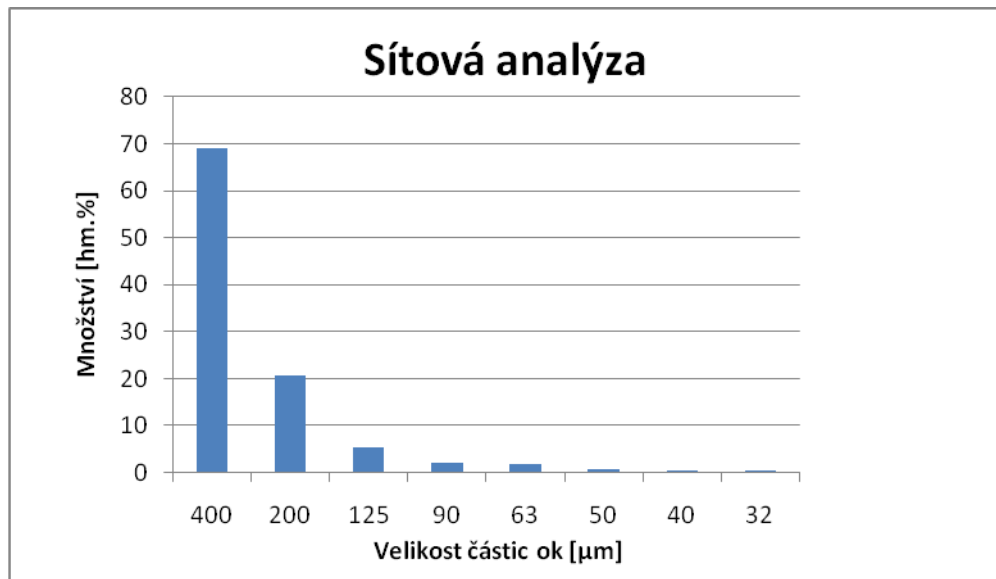
Obr. 17. Stroj pro síťovou analýzu

### 8.2.1 Výsledek sítové analýzy

Na horní síto byl nasypán vzorek ve formě prášku o hmotnosti 300 g a samotná síťová analýza probíhala 90 minut. Po skončení analýzy se váží vzorky na jednotlivých sítích.

Tab. 7 Hodnoty sítové analýzy

velikost částic ok [ $\mu\text{m}$ ]	množství [g]	množství [hm.%]
400	207	69
200	62	20,7
125	16	5,3
90	6,4	2,1
63	5	1,7
50	2,3	0,8
40	1,1	0,4
32	0,2	0,1

Obr. 18 *Sítová analýza*

### 8.3 Měřící technika

Než-li dojde k samotným tahovým zkouškám, byla potřeba si po smíchání směsí zkušební tělíska nastříkat. K tomu se využívá vstříkovací stroj ARBURG Allrounder 420 C (obr. 19).

Obr. 19 *Vstříkovací stroj ARBURG Allrounder 420 C*

### 8.3.1 Vstřikování zkušebních tělísek

Protože byly vstřikovány různé typy polymerních materiálů a to nízkohustotní polyethylen (LDPE) a vysokohustotní polyethylen (HDPE) o různých poměrech směsí ozářeného a neozářeného prášku, nastavily se parametry vstřikovacího stroje pro LDPE a HDPE a zároveň technické parametry tohoto stroje, které jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 8 *Parametry nastavení vstřikovacího stroje pro LDPE a HDPE*

Parametr	LDPE	HDPE	Jednotky
vstřikovací rychlost	60	60	mm/s
vstřikovací tlak	80	80	MPa
doba vstřikování	0,39	0,4	s
doba chlazení	35	35	s
teplota formy	40	40	<sup>0</sup> C
dráha dávkování	37,5	38	mm
tlak při přepnutí	72	72	MPa
bod přepnutí	16	16	mm
uzavírací síla	950	950	kN
doba plnění	2,46	2,46	s
celkový čas dotlaku	12	12	s
doba cyklu	58,1	58,1	s
Teploty pásem plastikační jednotky			
pásmo 2	140	150	<sup>0</sup> C
pásmo 3	150	160	<sup>0</sup> C
pásmo 4	160	180	<sup>0</sup> C
pásmo 5	180	190	<sup>0</sup> C
teplota pod násypkou	40	40	<sup>0</sup> C

Tab. 9 *Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allouder 420 C*

Vstřikovací jednotka		
Průměr šneku	30/35/40	mm
Poměr šneku	23,3/20/17,5	L/D
Objem dávky	106/144/188	max.cm <sup>3</sup>
Hmotnost vstřikovací dávky	97/132/172	max.g PS
Kapacita zpracování materiálu	17/20,5/24,5	max. kg/h PS
Vstřikovací tlak	2500/2000/1530	max.bar
Vstřikovací rychlost	102/140/182	max.cm <sup>3</sup> /s
Kroutící moment šneku	320/380/430	max.Nm
Přítlačná síla trysky	60	max.kN
Uzavírací jednotka		
Uzavírací síla	1000	max.kN
Otevření	500	max.mm

Výška formy	250	min.mm
Světlost mezi upínacími deskami	750	max.mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	420x420	mm
Velikost upínací desky	570x570	mm
Vyhazovací síla	40	max.kN
Zdvih vyhazovače	175	max.mm
Hydraulika, pohon		
Výkon čerpadla	15	kW
Doba cyklu nasucho při otevření	1,8-294	s-mm
Celkový příkon stroje	23,9	kW
Olejová náplň a hmotnost		
Množství oleje	235	L
Hmotnost stroje bez oleje	3700	kg

### 8.3.2 Zkouška tahem

Po přípravě všech zkušebních tělísek došlo k samotným tahovým zkouškám. Byl použit zkušební stroj ZWICK ROELL 1456 (obr. 20). Tento stroj je také vybaven počítačem se softwarem testXpert, kde se budou po celou dobu měření vyhodnocují výsledky. Součástí stroje je také teplotní komora či možnost použití kapalného dusíku. Díky tomu můžeme tedy měřit za zvýšené i za nízké teploty. Na obr. 21 je znázorněno upnutí tělíska na zkušebním stroji.



Obr. 20 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456





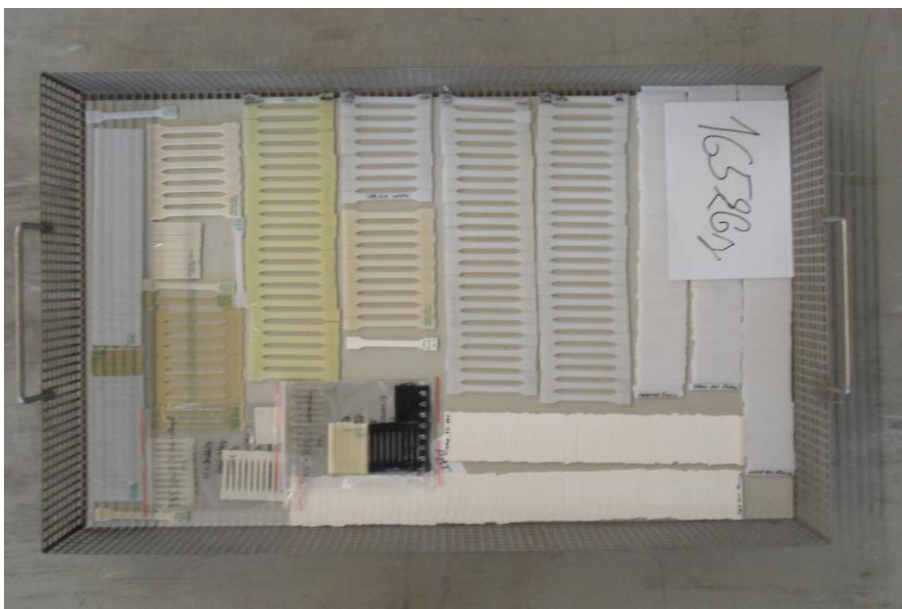
Obr. 21 Upnutí tělíska

Tab. 10 Technické parametry zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456

Rozměry stroje a hmotnost		
Celková výška	2012	mm
Celková šířka	630	mm
Šířka pracovního prostoru	420	mm
Hmotnost	150	kg
Strojová výška	1284	mm
Ostatní parametry		
Maximální posuv příčnicku	800	mm/min
Snímače síly	2,5 a 20	kN
Teplotní komora	-80 až 290	<sup>0</sup> C

## 9 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po přípravě směsí a vstříkování tělísek byly provedeny tahové zkoušky. Pro větší rozbor výsledků došlo po vystříknutí zkušebních tělísek u směsi ozářeného prášku HDPE a neozářeného prášku LDPE ke znovu ozáření dávkou 165 kGy (obr.22). Budeme tedy porovnávat výsledky znovu ozářených tělísek ze směsi ozářeného prášku HDPE a neozářeného prášku LDPE s neozářenými tělísky směsi ozářeného prášku HDPE a neozářeného prášku LDPE. Tahové zkoušky byly prováděny za pokojové teploty a za zvýšené teploty 80 °C.

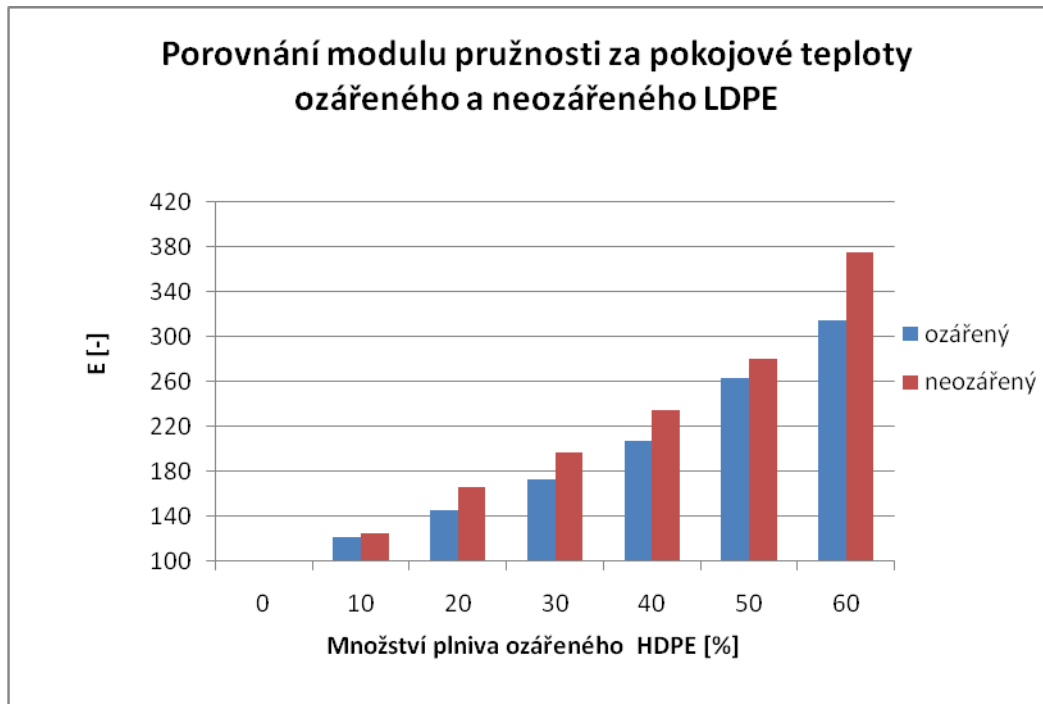


Obr. 22 Ozáření tělísek dávkou 165 kGy

### 9.1 Vyhodnocení výsledků směsi ozářeného prášku HDPE a neozářeného prášku LDPE

Po měření tahových zkoušek za pokojové a zvýšené teploty se vyhodnotí pomocí softwaru testXpert výsledky. Sledovanými veličinami byly modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a poměrné prodloužení při přetržení. Pro každý typ plniva (směsi) byly provedeny měření minimálně třiceti zkušebních těles. Pomocí sloupcových grafů byla sledována závislost množství plniva (0-60%) na sledované veličiny.

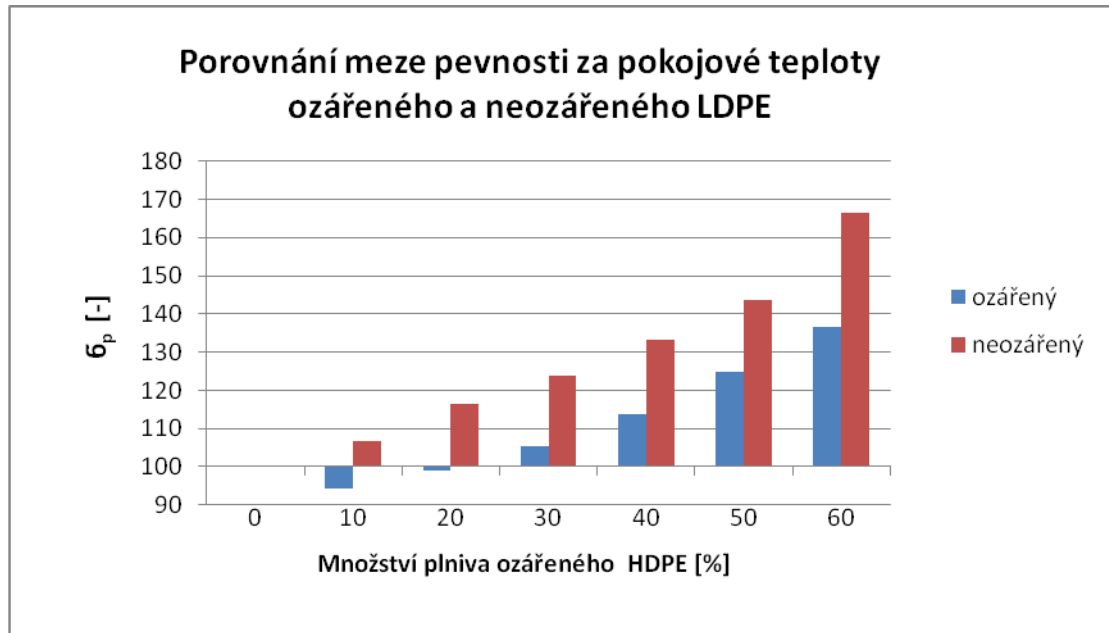
### 9.1.1 Zkouška tahem při pokojové teplotě



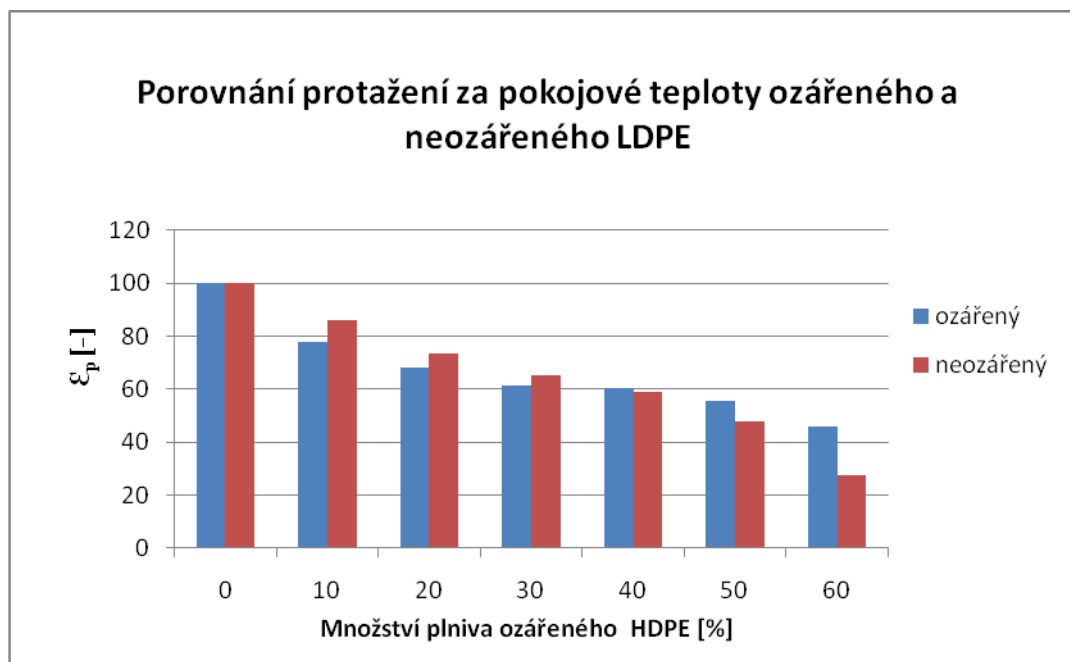
Obr. 23 Porovnání modulu pružnosti za pokojové teploty ozářeného a neozářeného LDPE

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že se zvyšujícím se množstvím plniva stoupá modul pružnosti. Při porovnání znovu ozářených tělísek s neozářenými je patrné, že znovu ozářené tělíska nedosáhly vyšší hodnoty modulu pružnosti.

Na níže uvedeném obr. 24 se opět potvrzuje, že s rostoucím množstvím plniva se zvyšuje mez pevnosti. Neozářené tělíska mají opět vyšší mez pevnosti. Nejvyšší hodnoty této meze dosahuje 60 % plniva.



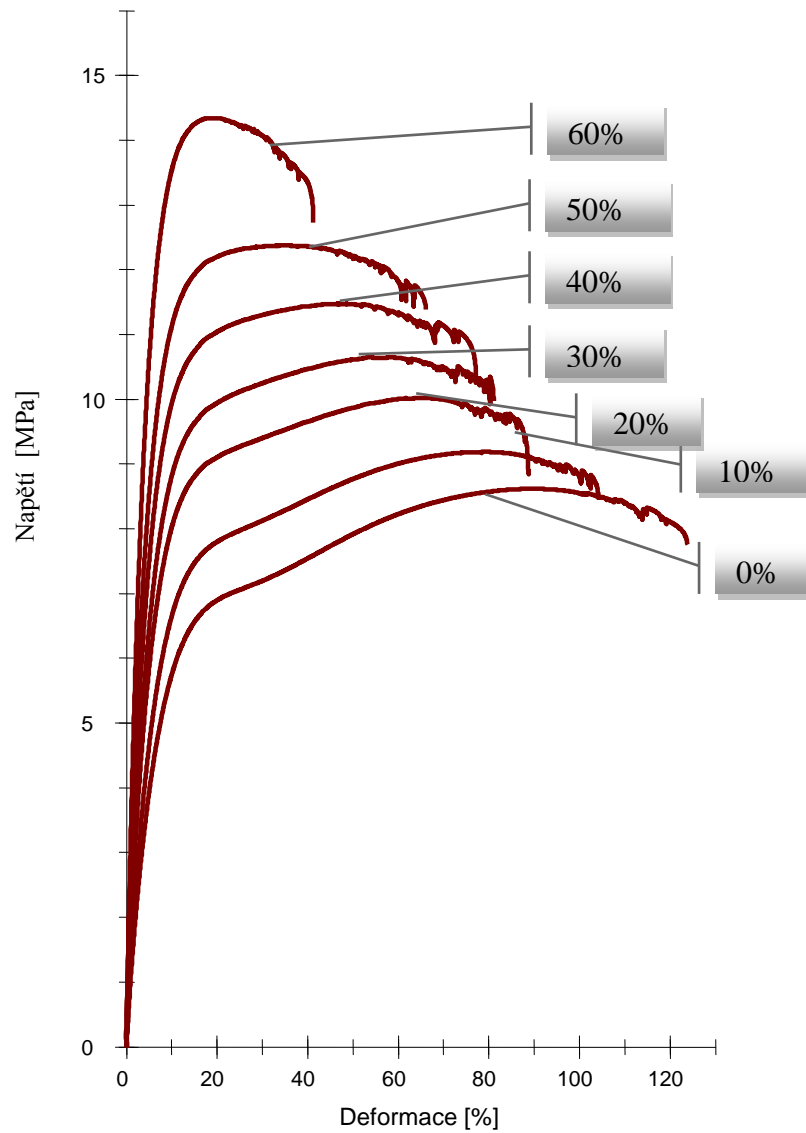
Obr. 24 Porovnání meze pevnosti za pokojové teploty ozářeného a neozářeného LDPE



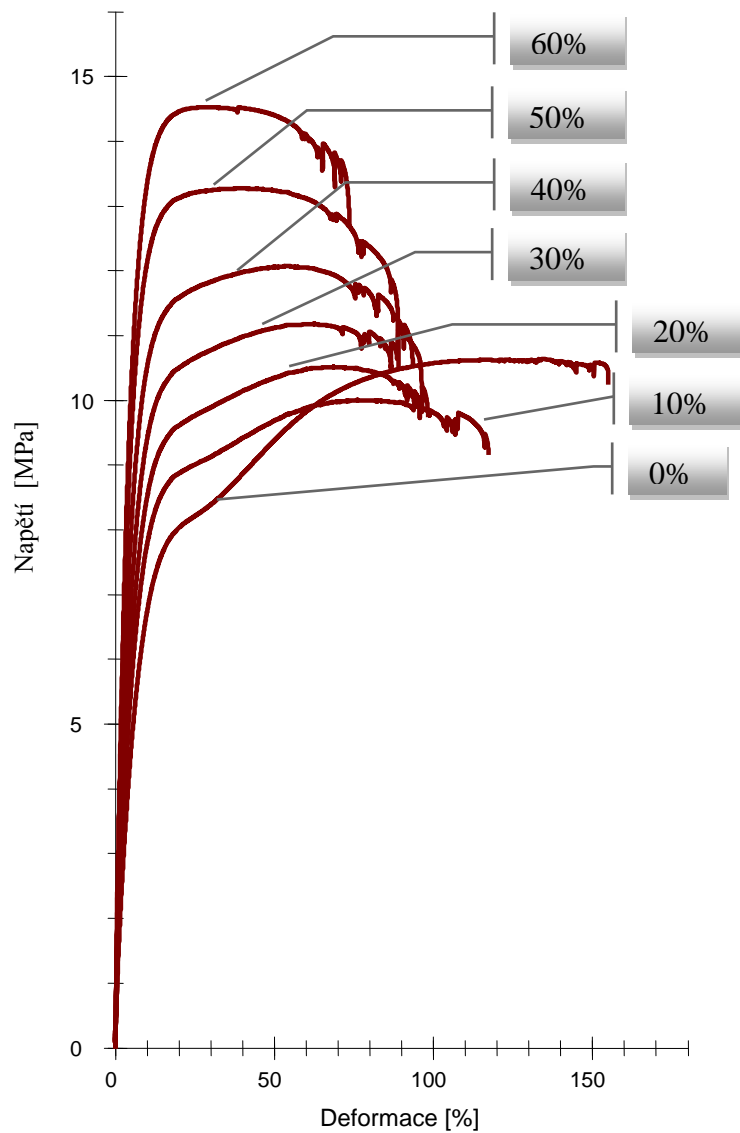
Obr. 25 Porovnání protažení za pokojové teploty ozářeného a neozářeného LDPE

Z výše uvedeného grafu (obr.25) je patrné, že se zvyšujícím se množstvím plniva se zmenšuje poměrné prodloužení. S menším přídatkem ozářeného prášku HDPE dosahují vyšších hodnot neozářené tělíska, přičemž s rostoucím množstvím přídatku ozářeného HDPE dosahují vyšších hodnot ozářené tělíska.

Na níže uvedeném obr. 26 sledujeme závislost množství plniva na napětí za pokojové teploty. Z grafu je patrné, že největšího napětí dosahuje 60 % plniva a nejmenšího napětí dosahuje LDPE bez plniva.



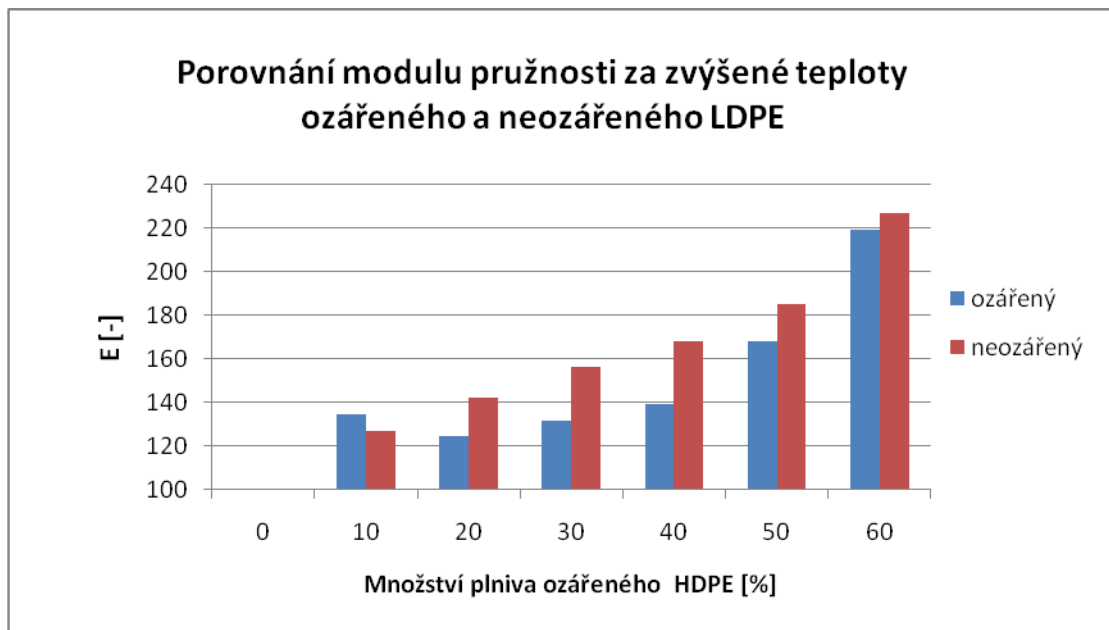
Obr. 26 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých množství plniva pro neozářené tělíska za pokojové teploty



Obr. 27 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých množství plniva pro ozářené tělíska za pokojové teploty

Na výše uvedeném obr. 27 sledujeme opět závislost množství plniva na napětí za pokojové teploty, nyní ale u ozářených tělísek. Z grafu je patrné, že největšího napětí opět dosahuje 60 % plniva. Napětí se zvyšuje s rostoucím množstvím plniva.

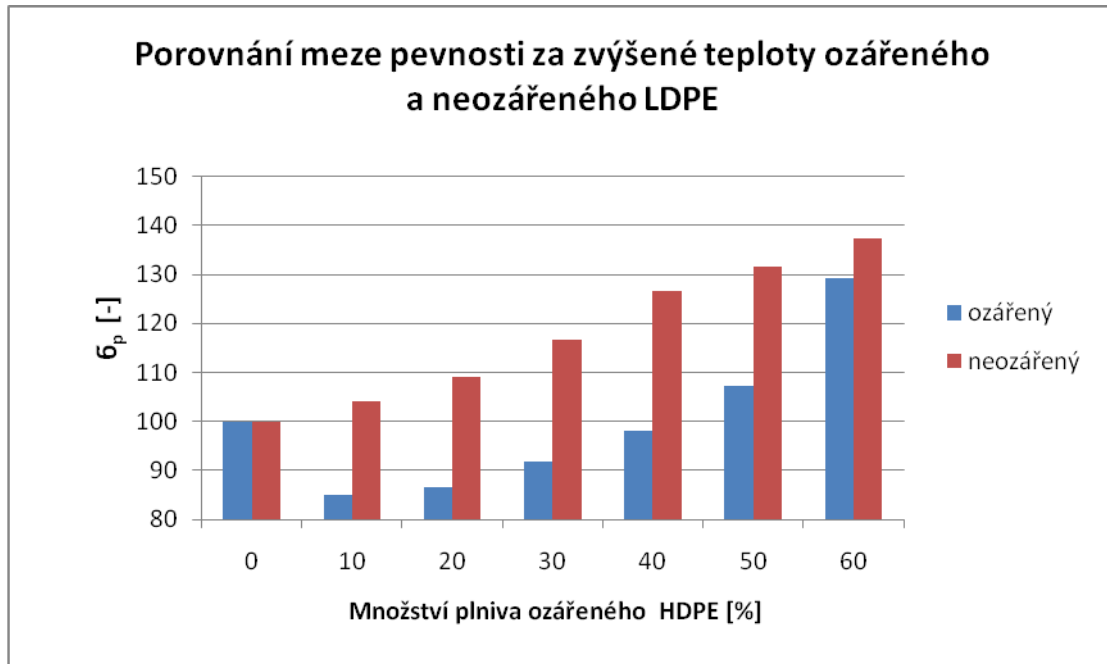
### 9.1.2 Zkouška tahem za zvýšené teploty 80 °C



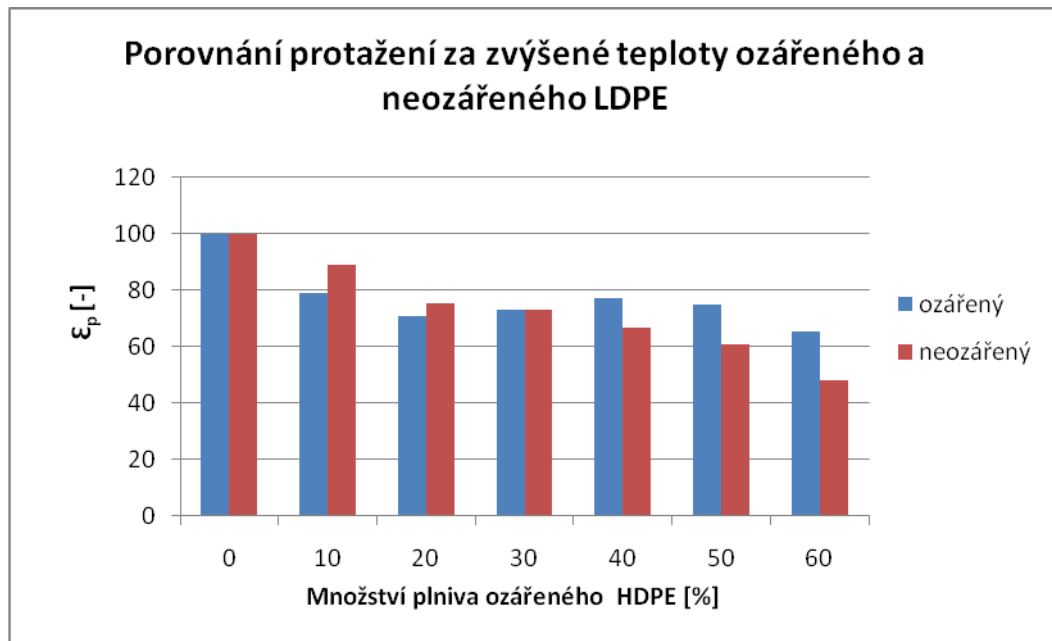
Obr. 28 Porovnání modulu pružnosti za zvýšené teploty ozářeného a neozářeného LDPE

Na obr. 28 můžeme sledovat nepatrnou změnu při měření za zvýšené teploty. U 10 % plniva vykazují ozářené tělíska vyšší hodnotu modulu pružnosti než-li neozářené. U vyšších hodnot množství plniva tomu už tak není a neozářené tělíska mají opět vyšší hodnotu, stejně tomu tak bylo při měření za normální teploty.

Na níže uvedeném obr. 29 je zřejmé, že mez pevnosti vykazuje menší hodnoty při měření za zvýšené teploty, než-li tomu bylo při měření za pokojové teploty. Neozářené tělíska přitom dosahují vyšších hodnot než ozářené.



Obr. 29 Porovnání meze pevnosti za zvýšené teploty ozářeného a neozářeného LDPE

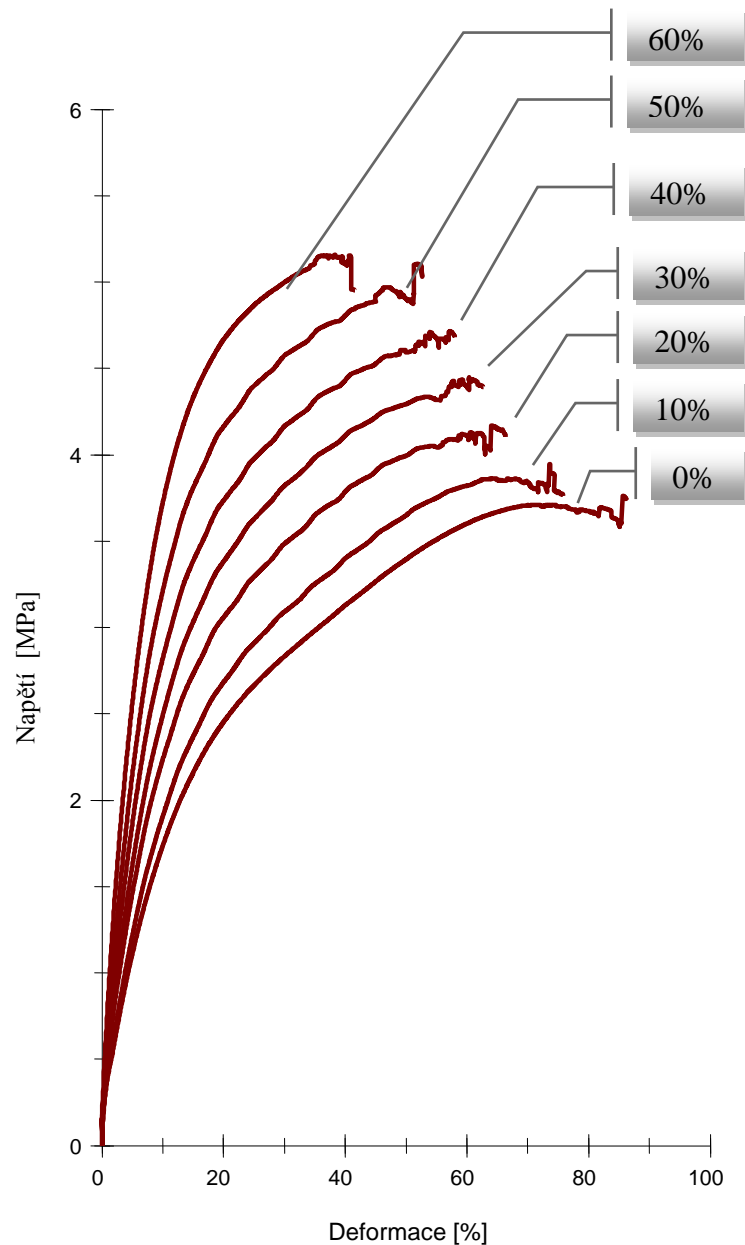


Obr. 30 Porovnání protažení za zvýšené teploty ozářeného a neozářeného LDPE

Z výše uvedeného grafu (obr. 30) je zřejmé, že se zvyšujícím se množstvím plniva se zmenšuje procentuální poměrné prodloužení. Ozářené tělíska se přitom v porovnání s neozářeným protahuje více.



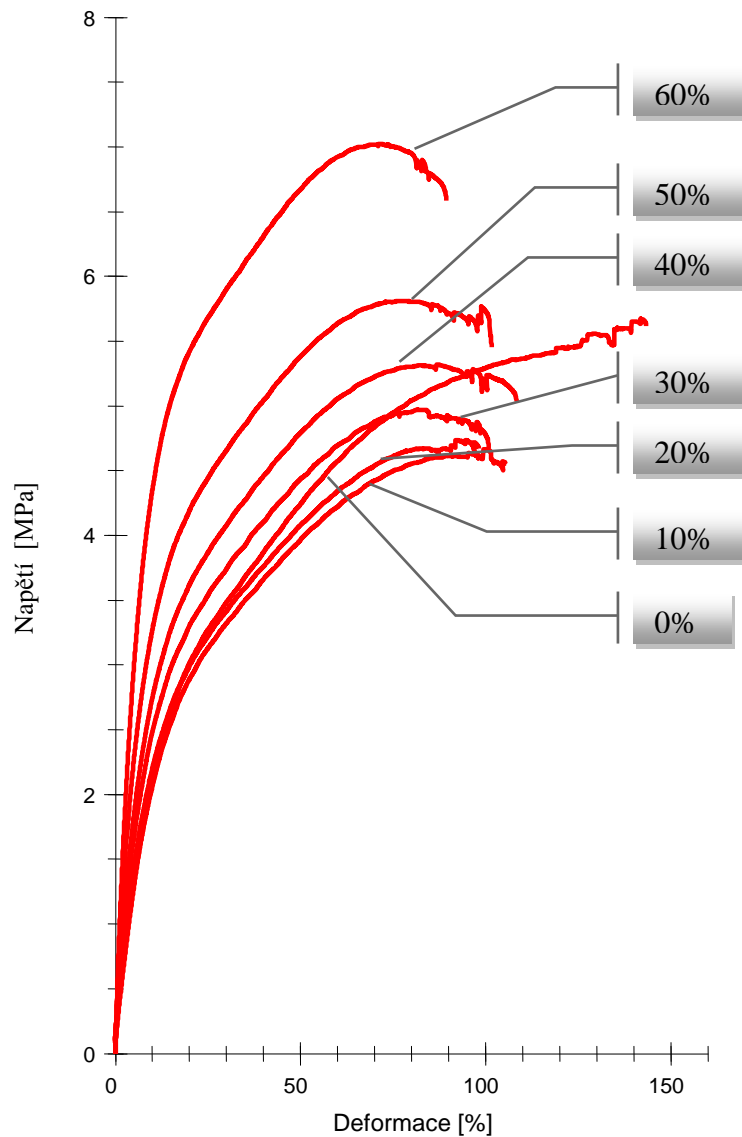
Na níže uvedeném obr. 31 sledujeme závislost množství plniva na napětí za zvýšené teploty. Z grafu je patrné, že největšího napětí dosahuje 60 % plniva a nejmenšího napětí dosahuje LDPE bez plniva. Při porovnání s pokojovou teplotou jsou hodnoty napětí nižší.



Obr. 31 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých množství plniva pro neozářené tělíska za zvýšené teploty

Na níže uvedeném obr. 32 sledujeme opět závislost množství plniva na napětí za zvýšené teploty, nyní ale u ozářených tělísek. Z grafu je patrné, že největšího napětí opět dosahuje

60 % plniva. Napětí se opět zvyšuje s rostoucím množstvím plniva. Za zvýšené teploty dosahujeme nižších hodnot napětí než-li za pokojové teploty.



Obr. 32 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých množství plniva pro ozářené tělíska za zvýšené teploty

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty tahové zkoušky ozářené i neozářené směsi z neozářeného prášku LDPE a ozářeného prášku HDPE za pokojové a zvýšené teploty.

Tab. 11 Naměřené hodnoty tahové zkoušky neozářených tělísek ze směsi neozářeného prášku LDPE a ozářeného prášku HDPE

		Množství ozářeného prášku HDPE						
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Sledované veličiny		Měření za pokojové teploty 23 <sup>0</sup> C						
$\sigma_p$ [MPa]	$\bar{x}$	8,62	9,19	10,03	10,66	11,48	12,38	14,35
	s	0,1	0,05	0,09	0,17	0,15	0,16	0,21
	$\sigma$	1,19	0,51	0,92	1,58	1,3	1,32	1,49
$\Delta L_{sp}$ [mm]	$\bar{x}$	31,19	27,29	22,65	19,77	16,93	12,63	6,74
	s	0,43	0,61	0,84	1,06	1,08	1,14	0,29
	$\sigma$	1,37	2,23	3,71	5,38	6,4	8,99	4,33
E [MPa]	$\bar{x}$	106,63	132,9	177,01	209,53	249,9	298,62	400,33
	s	3,72	3,97	5,21	8,34	8,82	9,59	20,38
	$\sigma$	3,49	2,99	2,95	3,98	3,53	3,21	5,09
$\epsilon_{sp}$ [%]	$\bar{x}$	89,03	77,91	64,68	56,44	48,35	36,07	19,24
	s	1,22	1,74	2,4	3,04	3,09	3,25	0,83
	$\sigma$	1,37	2,23	3,71	5,38	6,4	9	4,33
$\epsilon_{Fp}$ [%]	$\bar{x}$	110,54	95,12	81,09	72,23	65,05	53,03	30,32
	s	5,33	4,97	4,51	5,13	6,31	6,46	4,8
	$\sigma$	4,82	5,22	5,56	7,11	9,7	12,19	15,82
		Měření za zvýšené teploty 80 <sup>0</sup> C						
$\sigma_p$ [MPa]	$\bar{x}$	3,73	3,88	4,07	4,35	4,61	4,91	5,12
	s	0,11	0,15	0,15	0,19	0,16	0,18	0,18
	$\sigma$	2,92	3,91	3,73	4,43	3,56	3,61	3,53
$\Delta L_{sp}$ [mm]	$\bar{x}$	25,88	23,33	19,88	19,18	17,82	16,28	12,9
	s	1,16	1,01	1,01	0,86	0,77	1,09	0,73
	$\sigma$	4,5	4,35	5,08	4,49	4,32	6,72	5,67
E [MPa]	$\bar{x}$	30,3	38,46	43,06	47,4	50,87	56,06	68,69
	s	3,31	3,44	4,23	3,41	3,88	4,95	5,77
	$\sigma$	10,92	8,95	9,81	7,19	7,62	8,83	8,4
$\epsilon_{sp}$ [%]	$\bar{x}$	73,51	66,32	56,51	54,56	50,71	46,34	36,68
	s	3,31	2,89	2,88	2,46	2,2	3,13	2,09
	$\sigma$	4,5	4,36	5,09	4,51	4,34	6,76	5,69
$\epsilon_{Fp}$ [%]	$\bar{x}$	78,45	69,76	59,05	57,29	52,38	47,83	37,59
	s	4,79	3,12	3,26	2,94	2,6	3,36	2,3
	$\sigma$	6,1	4,48	5,52	5,13	4,96	7,03	6,12

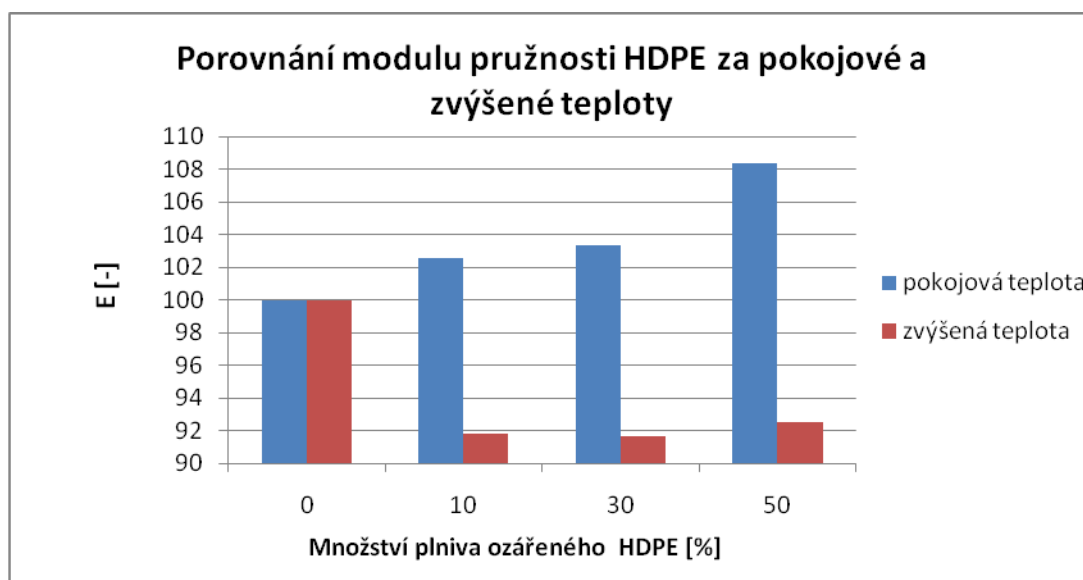
Tab. 12 Naměřené hodnoty tahové zkoušky ozářených tělísek ze směsi neozářeného prášku LDPE a ozářeného prášku HDPE

		Množství ozářeného prášku HDPE						
		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%
Sledované veličiny		Měření za pokojové teploty 23 <sup>0</sup> C						
$\sigma_p$ [MPa]	$\bar{x}$	10,63	10,01	10,52	11,19	12,08	13,28	14,53
	s	0,09	0,08	0,08	0,21	0,12	0,22	0,24
	$\sigma$	0,81	0,82	0,78	1,84	1,03	1,65	1,63
$\Delta L_{\sigma p}$ [mm]	$\bar{x}$	41,99	27,22	24,13	21,3	18,9	14,14	9,95
	s	2,83	1,03	0,51	0,89	0,19	1,57	0,7
	$\sigma$	6,75	3,78	2,1	4,19	1,02	11,1	7,02
E [MPa]	$\bar{x}$	128,71	156,19	187,34	222,1	265,99	338,49	404,96
	s	6,6	4,47	6,25	9,42	3,68	10,97	8,95
	$\sigma$	5,13	2,86	3,33	4,24	1,38	3,24	2,21
$\epsilon_{\sigma p}$ [%]	$\bar{x}$	119,9	77,71	68,91	60,82	53,96	40,38	28,42
	s	8,1	2,94	1,45	2,55	0,55	4,48	1,99
	$\sigma$	6,75	3,79	2,11	4,19	1,02	11,1	7,02
$\epsilon_{Fp}$ [%]	$\bar{x}$	135,93	105,89	92,93	83,4	82,12	75,85	62,32
	s	8,39	7,11	3,35	7	6,87	7,61	8,93
	$\sigma$	6,17	6,72	3,61	8,39	8,37	10,04	14,32
		Měření za zvýšené teploty 80 <sup>0</sup> C						
$\sigma_p$ [MPa]	$\bar{x}$	5,43	4,62	4,7	4,99	5,32	5,82	7,02
	s	0,25	0,16	0,07	0,16	0,13	0,14	0,19
	$\sigma$	4,65	3,48	1,59	3,2	2,42	2,34	2,72
$\Delta L_{\sigma p}$ [mm]	$\bar{x}$	42,74	32,3	30,03	29,39	28,92	27,45	24,94
	s	2,78	1,03	1,67	1,72	0,55	1,05	0,6
	$\sigma$	6,5	3,2	5,57	5,84	1,9	3,84	2,4
E [MPa]	$\bar{x}$	28,92	38,87	36,06	37,99	40,36	48,68	63,44
	s	3,65	4,72	2,54	2,83	2,92	2,36	3,02
	$\sigma$	12,61	12,14	7,03	7,46	7,23	4,84	4,77
$\epsilon_{\sigma p}$ [%]	$\bar{x}$	121,69	91,96	85,48	83,71	82,41	78,28	71,1
	s	7,93	2,95	4,78	4,9	1,56	3,01	1,71
	$\sigma$	6,51	3,21	5,59	5,85	1,9	3,85	2,4
$\epsilon_{Fp}$ [%]	$\bar{x}$	126,32	99,65	89,52	92,15	97,46	94,71	82,54
	s	8,55	4,36	5,72	7,2	5,58	5,67	5,77
	$\sigma$	6,77	4,37	6,39	7,81	5,73	5,98	6,99

## 9.2 Vyhodnocení výsledků směsi ozářeného a neozářeného prášku HDPE

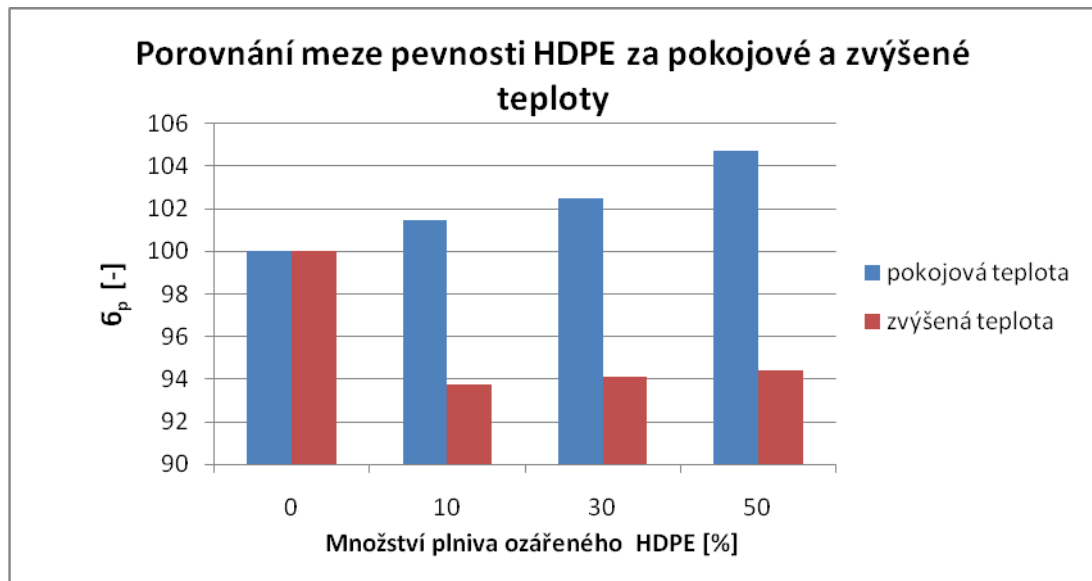
Sledovanými veličinami pro měření zkušebních tělísek ze směsi ozářeného a neozářeného prášku HDPE byly modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a poměrné prodloužení při přetržení. Opět byla sledována závislost množství plniva, tedy množství ozářeného směsi HDPE v neozářené směsi HDPE. Měření probíhalo za pokojové a zvýšené teploty.

### 9.2.1 Zkouška tahem za pokojové a zvýšené teploty



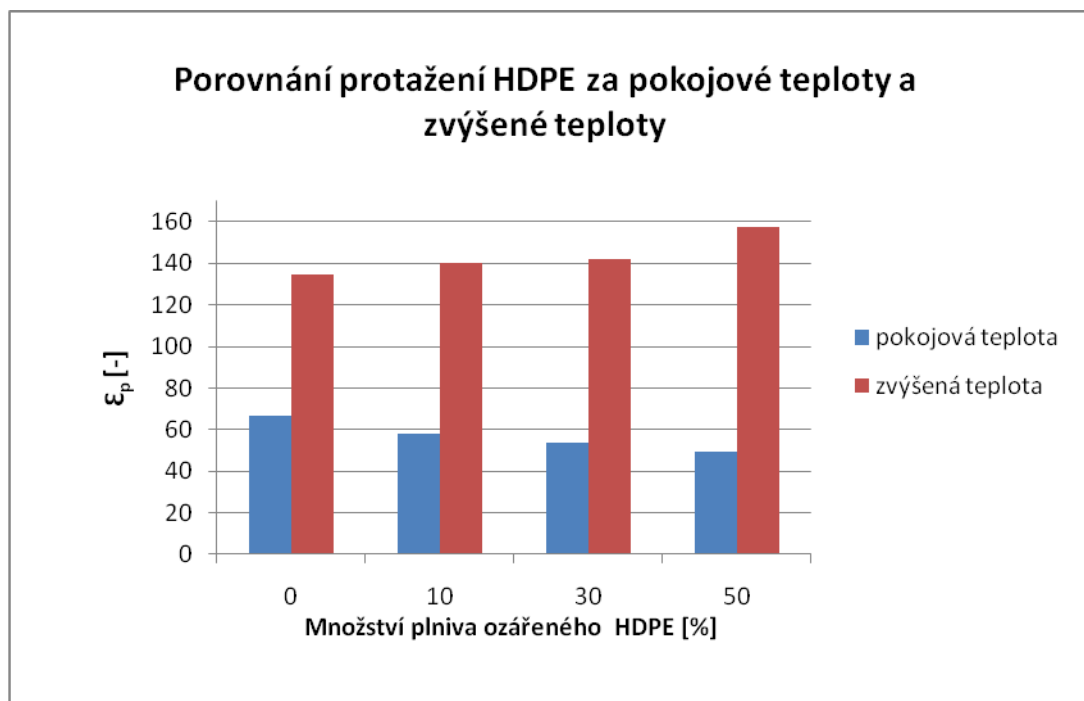
Obr. 33 Porovnání modulu pružnosti HDPE za pokojové a zvýšené teploty

Jak je z obr. 33 patrné, se vzrůstajícím se množstvím plniva za pokojové teploty stoupá modul pružnosti. Za pokojové teploty je modul pružnosti při 10 % plniva přibližně vyšší o 11 % než za zvýšené teploty, při 50 % plniva dokonce o 16%. Za zvýšené teploty se modul pružnosti v rozmezí 10-50 % plniva příliš nemění.



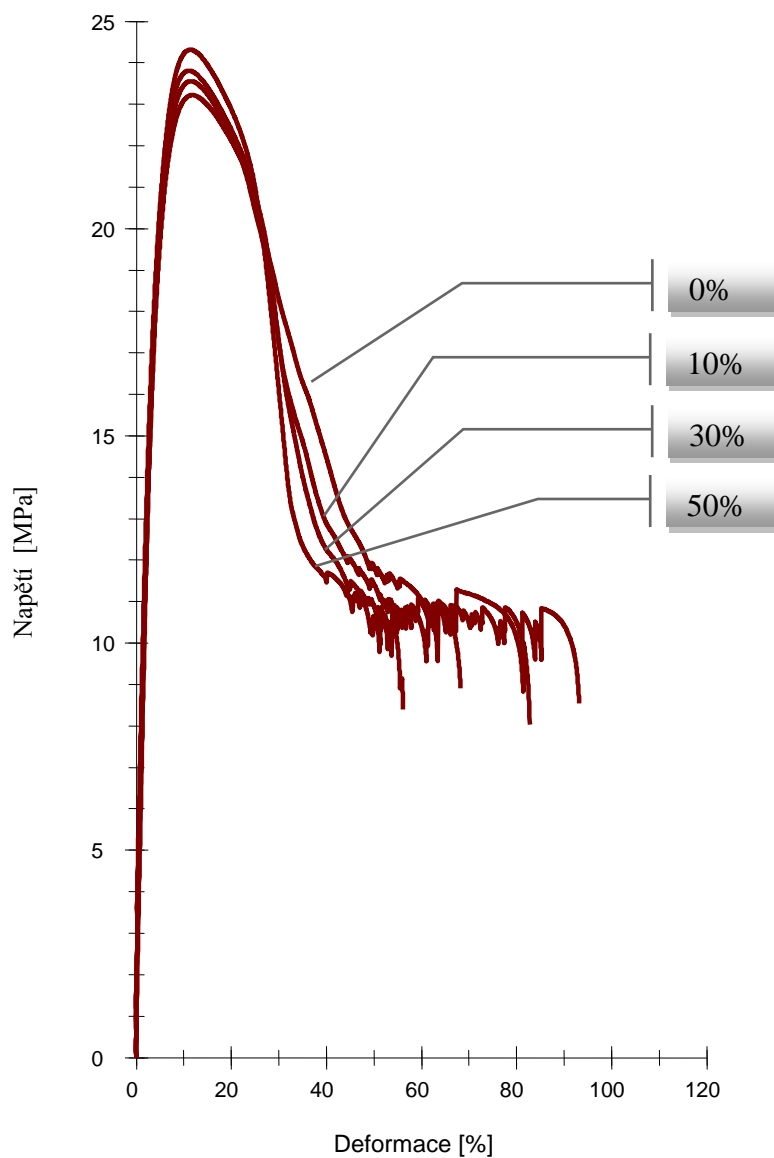
Obr. 34 Porovnání meze pevnosti HDPE za pokojové a zvýšené teploty

Stejně jako tomu bylo u modulu pružnosti, mez pevnosti s vyšším přídatkem plniva stoupá jak za pokojové tak za zvýšené teploty. Za zvýšené teploty se ale mez pevnosti liší nepatrně. Za pokojové teploty je mez pevnosti při 10 % plniva přibližně vyšší o 7 % než za zvýšené teploty, při 50 % plniva mez pevnosti stoupl o 10%.



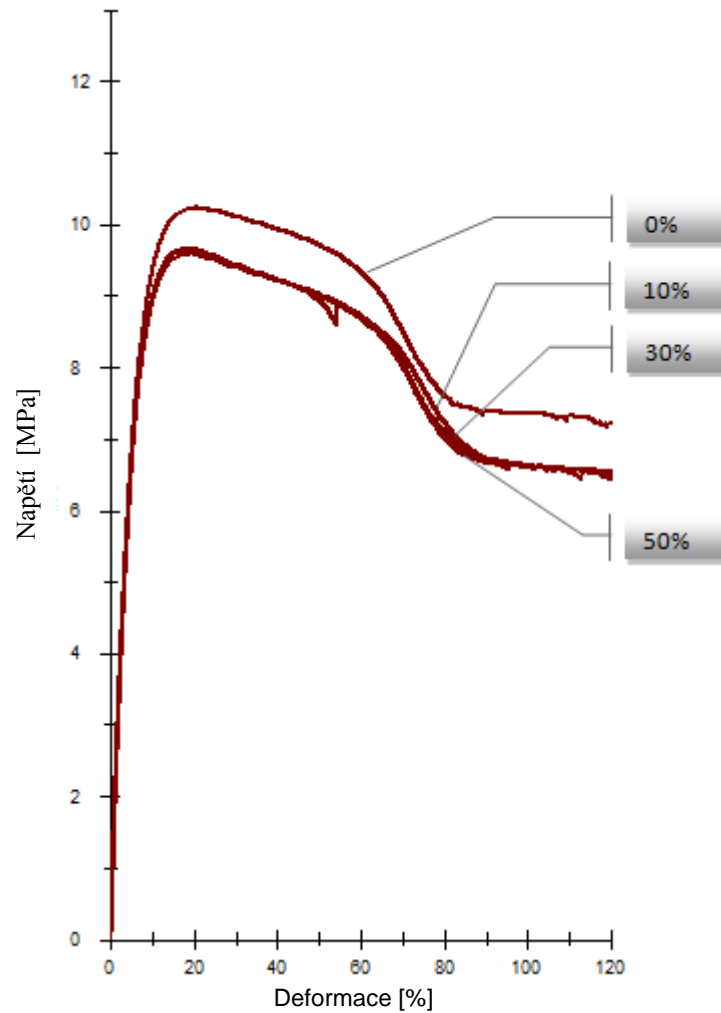
Obr. 35 Porovnání protažení HDPE za pokojové a zvýšené teploty

Z obr. 35 můžeme sledovat, že za pokojové teploty při vyšším přidavku plniva hodnoty protažení klesají, přičemž za zvýšené teploty jsou tyto hodnoty vyšší a stoupají. Za zvýšené teploty je poměrné prodloužení při 50 % plniva vyšší o 40 % než za pokojové teploty.



Obr. 36 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých množství plniva HDPE za pokojové teploty

Na obr. 36 sledujeme závislost množství plniva na napětí za pokojové teploty. Z grafu je patrné, že největšího napětí dosahuje čistý HDPE, tedy bez přidavku plniva. S větším množstvím plniva napětí klesá.



Obr. 37 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci  
různých množstvích plniva HDPE za zvýšené teploty

Na obr. 37 sledujeme závislost množství plniva na napětí za zvýšené teploty. Z grafu je patrné, že největšího napětí opět dosahuje čisté HDPE. U plniva 10-50 % se závislost příliš nemění.



V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty tahové zkoušky zkušebních tělísek různé množství směsi ozářeného a neozářeného prášku HDPE za pokojové a zvýšené teploty.

Tab. 13 Naměřené hodnoty tahové zkoušky směsi ozářeného a neozářeného prášku HDPE

		Množství ozářeného prášku HDPE			
		0%	10%	30%	50%
Sledované veličiny		Měření za pokojové teploty 23 <sup>0</sup> C			
$\sigma_p$ [MPa]	$\bar{X}$	23,23	23,57	23,81	24,32
	s	0,44	0,3	0,2	0,16
	$\sigma$	1,88	1,29	0,83	0,67
$\Delta L_{sp}$ [mm]	$\bar{X}$	4,12	4,06	4,03	3,98
	s	0,06	0,06	0,05	0,04
	$\sigma$	1,48	1,44	1,21	1,01
E [MPa]	$\bar{X}$	844,8	866,58	872,68	915,43
	s	27,56	18,01	15,93	10,36
	$\sigma$	3,26	2,08	1,83	1,13
$\epsilon_{sp}$ [%]	$\bar{X}$	11,76	11,6	11,5	11,37
	s	0,18	0,17	0,14	0,11
	$\sigma$	1,5	1,42	1,19	1,01
$\epsilon_{Fp}$ [%]	$\bar{X}$	66,86	57,87	53,51	49,18
	s	11,57	8,61	5,33	3,77
	$\sigma$	17,3	14,87	9,95	7,67
		Měření za zvýšené teploty 80 <sup>0</sup> C			
$\sigma_p$ [MPa]	$\bar{X}$	10,24	9,6	9,64	9,67
	s	0,7	0,22	0,34	0,21
	$\sigma$	6,81	2,31	3,51	2,14
$\Delta L_{sp}$ [mm]	$\bar{X}$	7,06	6,77	6,69	6,71
	s	0,22	0,07	0,25	0,1
	$\sigma$	3,14	1,01	3,71	1,5
E [MPa]	$\bar{X}$	182,16	167,18	166,94	168,58
	s	19,96	9,72	7,44	10,75
	$\sigma$	10,96	5,81	4,46	6,38
$\epsilon_{sp}$ [%]	$\bar{X}$	20,02	19,32	19,09	19,15
	s	0,62	0,19	0,71	0,28
	$\sigma$	3,11	0,97	3,71	1,45
$\epsilon_{Fp}$ [%]	$\bar{X}$	134,53	140,06	141,99	157,43
	s	27,06	35,67	28,43	48,27
	$\sigma$	20,12	25,47	20,02	30,66

## 10 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo stanovit možnosti využití výrobků z ozářených polymerů po skončení jejich životnosti. Pro tuto práci byly použity trubky z HDPE, které byly ozářeny dávkou 165 kGy a poté namlety na jemný prášek, který byl smíchán v určených poměrech s čistým práškem LDPE a HDPE. Po vystříknutí zkušebních tělísek ze směsi ozářeného prášku HDPE a čistého prášku LDPE došlo ke znovu ozáření těchto tělísek dávkou 165 kGy, aby mohlo dojít k porovnání s neozářenými tělísky stejného typu směsi. Byla také sledována závislost množství plniva, tedy množství ozářeného prášku HDPE v čistém prášku HDPE a LDPE. Po přípravě všech zkušebních tělísek byly provedeny tahové zkoušky a to při pokojové teplotě a při zvýšené teplotě 80 °C.

Z výsledků je patrné, že při porovnání znovu ozářených tělísek připravených ze směsi ozářeného prášku HDPE a neozářeného prášku LDPE s neozářenými tělísky stejného typu směsi, že znovu ozářená tělíška nedosáhla zvýšení a zlepšení sledovaných mechanických vlastností. Není tedy výhodné tyto zkušební tělíška znovu ozařovat. Naopak je zřejmé, že s použitím vyššího přídavku plniva, tedy množstvím ozářeného prášku HDPE, dochází ke zlepšení mechanických vlastností a to modulu pružnosti i meze pevnosti.

U směsi z ozářeného prášku HDPE a neozářeného prášku HDPE došlo k porovnání sledovaných vlastností při měření za pokojové teploty a za zvýšené teploty 80 °C. Při měření za pokojové teploty s rostoucím přídavkem plniva stoupá modul pružnosti i mez pevnosti, přičemž za zvýšené teploty se výsledky modulu pružnosti i meze pevnosti lišily nepatrně. Dále s rostoucím přídavkem plniva poměrné prodloužení za pokojové teploty klesalo a za zvýšené teploty naopak stoupalo. S použitím přídavku plniva tedy opět došlo ke zlepšení mechanických vlastností a to modulu pružnosti i meze pevnosti, ale jen při měření za pokojové teploty.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Gregor, O. Diplomová práce - *Konstrukce vstřikovací formy pro vícekomponentní vstřikování*. Zlín: UTB, 2008. 94 s.
- [2] Recyklace plastů ve strojírenské výrobě . [cit. 2011-04-30]. Dostupný z WWW:  
< <http://www.isstechn.cz/objekty/plasty.pdf>>
- [3] Mleziva, J., Kálal, J.: *Základy makromolekulární chemie*. Praha, SNTL / Bratislava, n. p. Alfa, 1986.
- [4] Macourek, J. Diplomová práce - *Vliv ozáření na mechanické a termomechanické vlastnosti LDPE a HDPE*. Zlín: UTB, 2010. 150 s.
- [5] Vaculík, J. Diplomová práce – *Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů*. Zlín: UTB, 2010. 126 s.
- [6] Phạm Thị Thu Thủy. Bakalářská práce - *Možnosti recyklace směsí termoplastických polymerů*. Zlín: UTB, 2008. 39 s.
- [7] Vítková, E. Diplomová práce - *Studium možností matematického popisu vlivu nanoplniva v polyolefinické matrici*. Zlín: UTB, 2007. 89 s.
- [8] Polymerní sítě . [cit. 2010-11-20]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/05%20KAPITOLA%203.pdf>>
- [9] MAŇAS, Miroslav; STANĚK, Michal; MAŇAS, David. Výrobní stroje a zařízení I: Stroje gumárenské a plastikářské I . 1. vyd. Zlín : UTB, 2007.
- [10] MLEZIVA, J.; ŠŇUPÁREK, J. Polymery-výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha: Nakladatelství Sobotáles, 2000. 544 s. ISBN 80-859220-72-7.
- [11] RYBNIKÁŘ, F. et al. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 420 s.
- [12] Sítová analýza. [cit. 2011-04-30]. Dostupný z WWW:  
< <http://www.fns.uniba.sk/fileadmin/knihy/jesenak/2008/cast3.pdf>>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$T_g$	Teplota skelného přechodu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_m$	Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_f$	Teplota tečení [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení [-]
TPE	Termoplastický elastomer
PE	Polyetylen
PVC	Polyvinylchlorid
PUR	Polyuretan
TPU	Termoplastický polyuretan
PET	Polyetyléntereftalát
$\sigma$	Napětí [MPa]
$A_0$	Průřez hranolu [mm]
$\sigma_E$	Mez pružnosti [MPa]
$\sigma_U$	Mez úměrnosti [MPa]
$\sigma_K$	Mez kluzu [MPa]
$\sigma_M$	Mez pevnosti v tahu [MPa]
$F_{\max}$	Maximální síla působící v tahu [N]
$\varepsilon_U$	Poměrná deformace na mezi úměrnosti [%]
$\varepsilon_E$	Poměrná deformace na mezi pružnosti [%]
$\varepsilon_K$	Poměrná deformace na mezi kluzu [%]
$\varepsilon_M$	Poměrná deformace při maximálním napětí [%]
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
LLDPE	Lineární nízkohustotní polyetylen
$\text{H}_2\text{SO}_4$	Kyselina sírová

---

HCL	Kyselina chlorovodíková
HF	Kyselina fluorovodíková
HNO <sub>3</sub>	Kyselina dusičná
$\bar{x}$	aritmetický průměr
s	směrodatná odchylka
$\epsilon_{Fp}$	deformace při maximální síle [%]
$\epsilon\sigma_p$	poměrné prodloužení při maximálním napětí [%]
$\sigma_p$	mez pevnosti v tahu [MPa]
$\Delta L\sigma_p$	Protažení při maximálním napětí [mm]
$\sigma_E$	mez kluzu v tahu [MPa]
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Termomechanická křivka amorfního (a) a krystalického (b) polymeru.....	12
Obr. 2 Nízko-hustotní polyethylen .....	17
Obr. 3 Vysoko-hustotní polyethylen .....	18
Obr. 4. Schéma radiačního síťování .....	20
Obr. 5 Záření $\alpha$ .....	24
Obr. 6 Záření $\beta$ .....	25
Obr. 7 Záření $\gamma$ .....	26
Obr. 8 Proces mechanické recyklace plastů .....	28
Obr. 9 Třídící linka .....	36
Obr. 10 Princip vstřikování termoplastů .....	38
Obr. 11 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku .....	41
Obr. 12 Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku tahem .....	41
Obr. 13 Typy pracovních diagramů .....	42
Obr. 14 Pracovní digram tahové zkoušky .....	43
Obr. 15 Trubka z HDPE .....	50
Obr. 16 Ozářený prášek HDPE .....	50
Obr. 17. Stroj pro síťovou analýzu .....	52
Obr. 18 Síťová analýza .....	53
Obr. 19 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420 C .....	53
Obr. 20 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456 .....	55
Obr. 21 Upnutí tělíska.....	56
Obr. 22 Ozáření tělísek dávkou 165 kGy .....	57
Obr. 23 Porovnání modulu pružnosti za pokojové teploty ozářeného a neozářeného.....	58
Obr. 24 Porovnání meze pevnosti za pokojové teploty ozářeného a neozářeného LDPE .....	59
Obr. 25 Porovnání protažení za pokojové teploty ozářeného a neozářeného LDPE .....	59
Obr. 26 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých množství .....	60
Obr. 27 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých .....	61
Obr. 28 Porovnání modulu pružnosti za zvýšené teploty ozářeného a neozářeného .....	62
Obr. 29 Porovnání meze pevnosti za zvýšené teploty ozářeného a neozářeného LDPE .....	63
Obr. 30 Porovnání protažení za zvýšené teploty ozářeného a neozářeného LDPE.....	63

---

Obr. 31 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých .....	64
Obr. 32 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci různých .....	65
Obr. 33 Porovnání modulu pružnosti HDPE za pokojové a zvýšené teploty.....	68
Obr. 34 Porovnání meze pevnosti HDPE za pokojové a zvýšené teploty .....	69
Obr. 35 Porovnání protažení HDPE za pokojové a zvýšené teploty.....	69
Obr. 36 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci.....	70
Obr. 37 Porovnání grafů závislosti napětí na deformaci.....	71

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Třídění PE podle hustoty .....	15
Tab. 2 Radiačně sířovatelné polymery.....	21
Tab. 3 Přehled možných aplikací v průmyslu a vlastností po ozáření.....	23
Tab. 4 Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku plastů.....	42
Tab. 5 Poměry směsí ozářeného a neozářeného LDPE .....	51
Tab. 6 Poměry směsí ozářeného a neozářeného HDPE .....	51
Tab. 7 Hodnoty síťové analýzy .....	52
Tab. 8 Parametry nastavení vstřikovacího stroje pro LDPE a HDPE .....	54
Tab. 9 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG Allouder 420 C.....	54
Tab. 10 Technické parametry zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456 .....	56
Tab. 11 Naměřené hodnoty tahové zkoušky neozářených tělísek ze směsi neozářeného .....	66
Tab. 12 Naměřené hodnoty tahové zkoušky ozářených tělísek ze směsi neozářeného .....	67
Tab. 13 Naměřené hodnoty tahové zkoušky směsi ozářeného .....	72



## SEZNAM PŘÍLOH

## **PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY**