

Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů

Pavla Auffahrtová

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavla AUFFAHRTOVÁ**
Osobní číslo: **T080094**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma
2. Srovnajte výsledky naměřených dat
3. Proveďte jejich vyhodnocení

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Daněk**
BGS

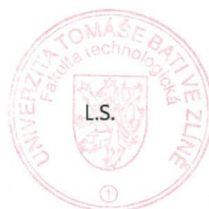
Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**

Ve Zlíně dne 11. 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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ 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: 18. 8. 2011

.....

¹⁾ 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 nevýdělečně 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.

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

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

³⁾ 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

Naplní této bakalářské práce je porovnat změny mechanických vlastností komerčně dostupných síťovatelných polymerních materiálů, které byly vystaveny vlivu širokého spektra dávek intenzity záření (Dosis) ionizačního beta záření.

V teoretické části je vypracována rešerše na dané téma. Udává základní informace o polymerech, ionizačním záření, síťování a mechanických zkouškách materiálů.

Praktická část popisuje použité zařízení, mechanické vlastnosti materiálů, přípravu zkušebních těles a zhodnocení naměřených výsledků.

Klíčová slova: plasty, ionizační záření, síťování, vstřikování, tahová zkouška, zkouška rázové houževnatosti, zkouška vrubové houževnatosti.

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is evaluate of mechanical characteristics of commercial polymers which were irradiated by ionizing beta radiation with wide spectrum of Dosis.

Theoretical part contains basic information's about polymers, ionizing radiation, cross-linking process and mechanical tests on materials.

Practical parts describe used equipment, mechanical characteristic of materials and preparation of test specimens. At the conclusion of the bachelor thesis are summary and evaluating of measured results.

Keywords: plastics, ionizing radiation, cross-linking, molding, tensile test, impact strength test, notched test.

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Daňkovi za odborné rady a připomínky, které mi poskytl při vypracování této bakalářské práce. Dále velké dík patří Ing. Zdeňkovi Holíkovi za ochotu a odbornou konzultaci. Zvláštní poděkování patří mé mamince Ludmile Auffahrtové za pomoc s hlídáním mého syna Toníčka.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 DĚLENÍ POLYMERŮ.....	13
1.1 ELASTOMERY.....	13
1.2 PLASTY	13
1.3 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	14
1.3.1 Podle původu.....	14
1.3.2 Podle chování za zvýšené teploty	15
1.3.3 Podle aplikace.....	15
1.3.4 Podle tvaru makromolekul	16
1.4 ZÁKLADNÍ ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE A PŘÍSADY DO POLYMERNÍCH SMĚSÍ.....	17
1.4.1 Přísady (aditiva) do polymerů.....	17
1.4.2 Antidegradanty	18
1.4.3 Síťovací prostředky.....	18
1.4.4 Přísady ovlivňující další fyzikální vlastnosti.....	19
2 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ.....	20
2.1 ZÁKLADNÍ DRUHY ZÁŘENÍ.....	20
2.1.1 Záření alfa α	20
2.1.2 Záření beta β	21
2.1.3 Záření gama γ	22
2.1.4 Neutronové záření.....	23
2.2 ROZDÍLY MEZI ELEKTRONOVÝM BETA ZÁŘENÍM A ZÁŘENÍM GAMA	23
3 SÍŤOVÁNÍ.....	24
3.1 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	25
3.1.1 Materiály pro radiační síťování.....	26
3.1.2 Zlepšení vlastností radiačně síťovaných plastů	27
4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU	30
4.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	30
4.2 STATICKÉ TAHOVÉ ZKOUŠKY	31
4.2.1 Podstata zkoušek	31
4.2.2 Zkušební tělesa	31
4.2.3 Zkušební zařízení	31
4.2.4 Provedení zkoušek	32
4.2.5 Vyhodnocení zkoušek	32
4.3 RÁZOVÁ ZKOUŠKA	32
4.3.1 Rázová houževnatost	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
5 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	35

6	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ.....	36
6.1	VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER C420	36
6.1.1	Technické parametry vstřikovacího stroje Arburg.....	37
6.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ DEMAG ERGOTECH 50 – 200 SYSTEM.....	37
6.2.1	Technické parametry vstřikovacího stroje Demag.....	38
6.3	ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 1456.....	39
6.3.1	Technické parametry zkušebního stroje	39
6.4	CHARPYHO KLADIVO ZWICK ROELL B5113.....	40
6.4.1	Technické parametry zkušebního stroje	40
6.5	ZKUŠEBNÍ STROJ CAEST RESIL IMPACTOR JUNIOR	41
6.5.1	Technické parametry zkušebního stroje	41
7	POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI.....	42
7.1	POLYESTER	42
7.1.1	PBT	42
7.1.2	Použití	42
7.2	POLYAMIDY.....	43
7.2.1	Použití	44
7.3	POLYETYLEN.....	44
7.3.1	LDPE, HDPE	44
7.3.2	Použití	45
7.4	POLYPROPYLEN.....	45
7.4.1	Použití	46
8	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	47
8.1	HODNOTY NASTAVENÍ VSTŘIKOVACÍHO STROJE ARBURG ALLROUNDER 420C	47
8.1.1	Polyamidy.....	47
	Parametry nastavení vstřikovacího stroje.....	48
8.1.2	Polyetylen.....	49
	Parametry nastavení vstřikovacího stroje.....	49
8.1.3	Polyester.....	49
	Parametry nastavení vstřikovacího stroje.....	49
8.2	HODNOTY NASTAVENÍ VSTŘIK. STROJE DEMAG ERGOTECH 50 – 200 SYSTEM.....	50
8.2.1	Polypropylen.....	50
	Parametry nastavení vstřikovacího stroje.....	50
9	TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	52
III	POLYAMIDY	53
IV	POLYAMIDY	56
V	POLYAMIDY	59
VI	POLYAMIDY	62
VII	POLYESTERY	65

VIII	POLYOLEFÍNY.....	69
IX	POLYOLEFÍNY.....	73
10	ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	77
X	POLYAMIDY.....	78
XI	POLYOLEFÍNY.....	82
11	VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST.....	85
XII	POLYOLEFÍNY.....	86
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	90
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	91
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	92
	SEZNAM TABULEK.....	94

ÚVOD

Polymery stále více nahrazují ostatní materiály. S rozvíjející se výrobou, klademe větší důraz na jakost a kvalitu výrobků. Především v technické praxi se zvyšují požadavky na mechanické vlastnosti materiálu.

Jednou s metod jak docílit u polymerních materiálů požadovaných vlastností je využití síťovacího ozařování. V současné době se používá několik druhů záření a každé má jiné přednosti a uplatnění. V posledním desetiletí se v průmyslu zvýšilo síťování vlivem ozařování, což vede ke zlepšení vlastností plastů (mechanické, chemické a tepelné). Ozařování plastů se využívá i z hlediska ekonomického.

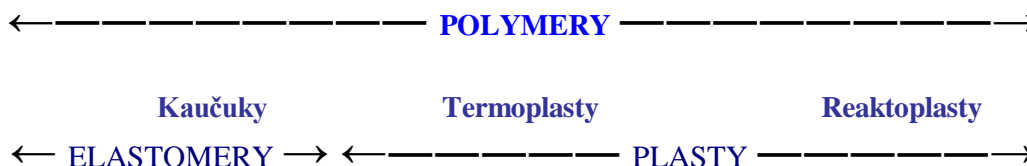
Hlavním náplní této bakalářské práce je zpracovat naměřená data s diplomových prací a vytvořit matici změn mechanických vlastností polymerních materiálů modifikovaných ozářením a nalézt optimální dávku intenzity záření pro konkrétní aplikaci (pro zkoušky v tahu, rázové houževnatosti a vrubové houževnatosti). Pro tyto účely byly použity zkušební tělíska z materiálů PBT, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken), PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček), PA 12 od výrobce PTS, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 30% skelných vláken) od výrobce Frisetta, LDPE, HDPE od výrobce Dow Chemical Company a zkušební vzorky z PP (neplněný a plněný 25% skelných vláken) od výrobce PTS zpracované na vstřikovacích strojích.

Zkušební tělíska byla ozářena vybranými dávkami záření ve firmě BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG. Ozářené i neozářené vzorky byly podrobeny tahovým zkouškám, zkouškám vrubové houževnatosti a zkouška rázové houževnatosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DĚLENÍ POLYMERŮ

Polymery jsou chemické látky, které vznikají díky svým obrovským molekulám neobvykle širokou škálou vlastností. Polymery se dělí na elastomery a plasty. [1]



Obr. 1: Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1]

1.1 Elastomery

Jsou vysoce elastické polymery, které lze za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Tato deformace je převážně vratná. Dominantní skupinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryže.

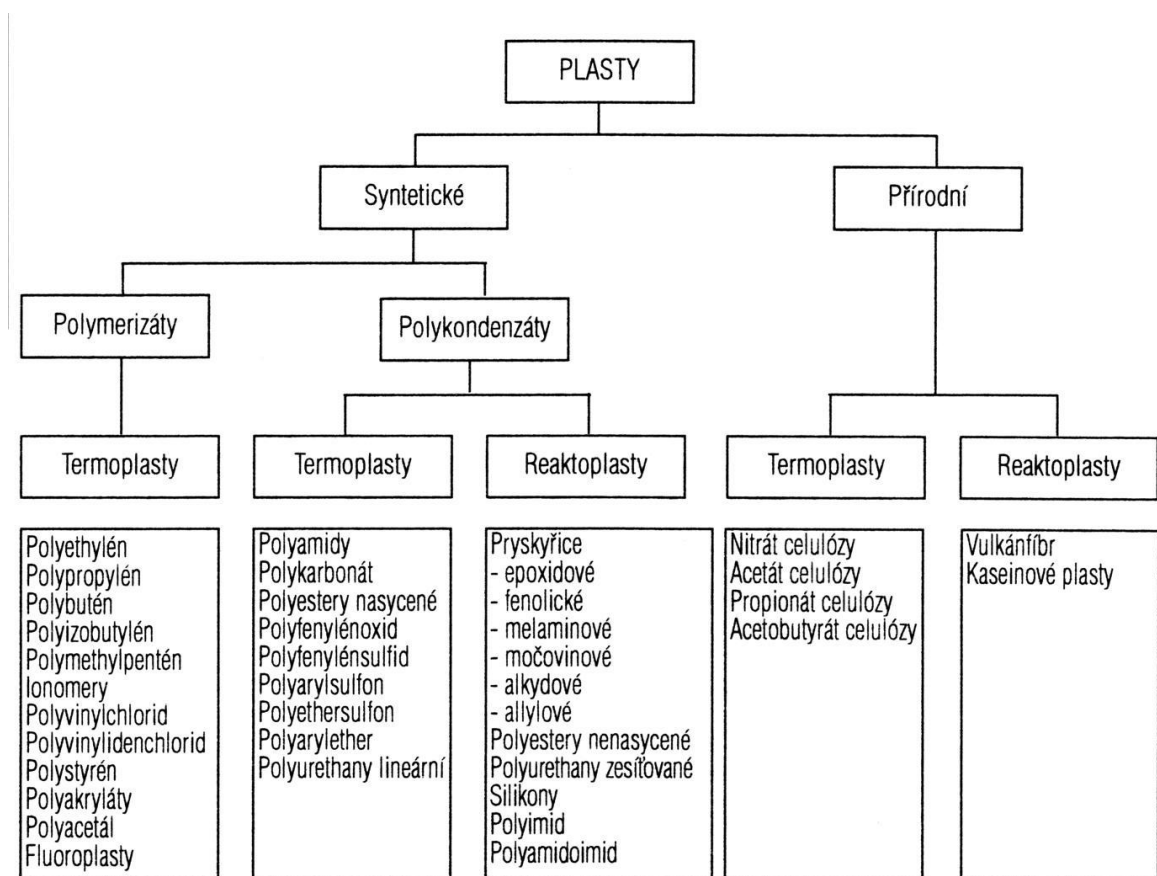
1.2 Plasty

Plasty jsou obecně makromolekulární látky o molekulové hmotnosti vyšší jak 10^4 a z chemického hlediska jsou to látky organické. Podstatou polymerů je makromolekulární látka přírodního nebo syntetického původu, která je tvárně schopná za působení teploty T a tlaku p , v jejichž makromolekule se jako článek řetězu mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Základním prvkem řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet dlouhé řetězce. [2]

1.3 Rozdělení polymerů

1.3.1 Podle původu

- **Přírodní** – jsou často označovány též jako biopolymery, založeny na přírodních látkách na bázi celulózy, kaseinu, latexu atd.
- **Syntetické** – výroba chemickou cestou (polymerace, polykondenzace, polyadice) [2]



Obr. 2: Schéma rozdělení přírodních a syntetických polymerů [3]

1.3.2 Podle chování za zvýšené teploty

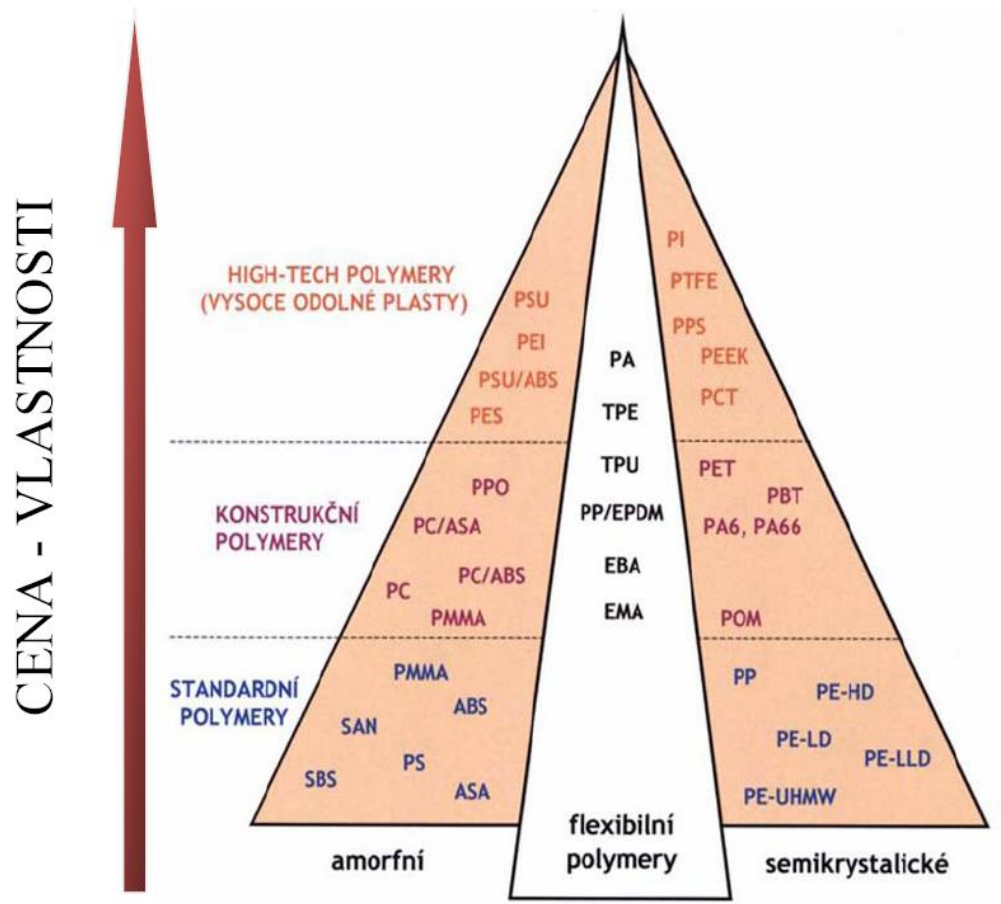
Podle chování za zvýšené teploty se plasty dělí na:

- **Reaktoplasty** – plasty, které na rozdíl od termoplastů tuhnou a nelze je opětovným náhřevem roztavit. Tímto náhřevem se urychluje tvorba struktury jejich makromolekuly – trojrozměrnou síť tvořící téměř nekonečnou makromolekulu, kterou už nelze roztavit a přivést do fáze taveniny. Jsou to velice tvrdé polymery, neboť vytvářejí velmi husté prostorové sítě monomerů. Například syntetické polyesterové, formaldehydové a epoxidové pryskyřice.
- **Termoplasty** - zahříváním měknou postupně až na taveninu. V tomto stavu se dají tvářet a různými technologiemi zpracovávat. Po ochlazení ztuhnou do formy konečného výrobku, který lze opět náhřevem přeměnit na taveninu a tu znovu zpracovat. Tento postup lze opakovat mnohokrát.
 - **Amorfní termoplasty** – makromolekuly v těchto polymerech jsou uspořádány náhodně a stáčí se jedním směrem do rotačního tvaru klubíčka. Amorfní plasty jsou opticky čiré.
 - **Semikrystalické** – v tavenině i v tuhém stavu některých termoplastů se makromolekuly polymeru otáčejí v pravidelných zákrutech a polymer má pak strukturu tvořenou částečně krystalickou a amorfní složku. Tyto polymery mohou být maximálně částečně průsvitné, nikoliv čiré. [4]

1.3.3 Podle aplikace

- **Základní plasty** – nejdéle a v největších objemech zpracovávané plasty pro velmi široké spektrum výrobků. Horší mechanické vlastnosti, teplotní a chemická odolnost jsou neustálým vývojem (kompozity, směsi s jinými materiály atd.) postupně eliminovány tyto inovované materiály pak přesahují do skupin konstrukčních materiálů.
- **Konstrukční plasty** – plasty více specializované požadovanými mechanickými i jinými vlastnostmi na určité skupiny technických výrobků. Zpracovávají se ve velkých objemech.
- **Vysoce odolné plasty** – často vyvinuté na požadavky zákazníků pro většinou úzce specializované aplikace. Dle typů jsou to materiály s výbornými mechanickými vlast-

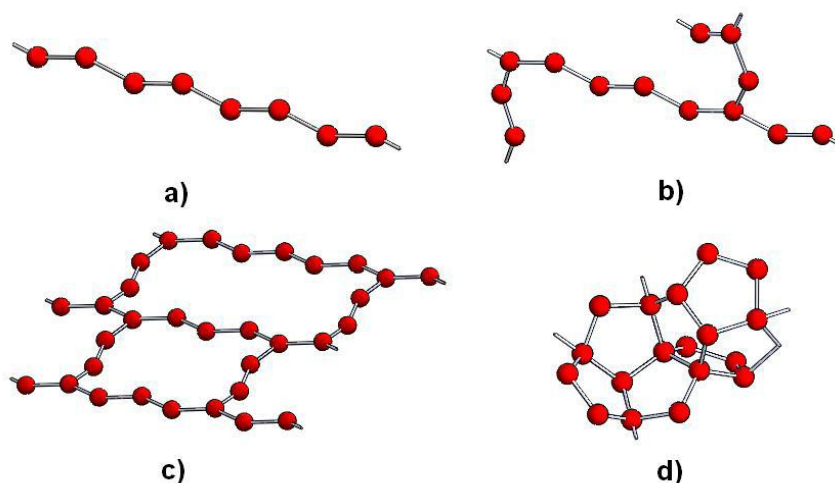
nostmi a vysokou tepelnou odolností. Relativně menší zpracovaná množství se s rozšiřováním aplikací budou neustále zvyšovat. Zpracování není složitější, jako u všech plastů má svá specifika. [4]



Obr. 3: Druhy a rozdělení plastů dle zpracovaných objemů [4]

1.3.4 Podle tvaru makromolekul

- Lineární
- Rozvětvené
- Zesíťované,
- Prostorově zesíťované [2]



Obr. 4: Tvar makromolekulárních řetězců [7]

a) lineární polymer, b) rozvětvený polymer,
c) zesíťovaný polymer, d) postorově zesíťovaný polymer

1.4 Základní zpracovatelské technologie a přísady do polymerních směsí

Postupy, při kterých se získávají výrobky z polymerních materiálů. Zahrnují také několik základních přípravných operací, které jsou nutné před zpracováním výrobku do konečného tvaru a vlastností. Polymery se obvykle nezpracovávají samostatně, ale za přídavku různých pomocných látek, které dodávají výrobku speciální vlastnosti, které původní polymer neměl. Některé látky pouze zlepšují vzhled výrobku nebo snižují jeho cenu, někdy je nutné přidat látky usnadňující nebo vůbec umožňující zpracování a užívání polymeru. [1]

1.4.1 Přísady (aditiva) do polymerů

Odstraňují jejich nedostatky nebo zlepšují jejich zpracovatelnost. Mezi tyto nedostatky patří zejména jejich malá odolnost vůči degradaci, značná hořlavost, vznik elektrostatického náboje na povrchu, malá houževnatost a tvrdost, omezená odolnost vůči chemikáliím, malá tvrdost za tepla, atd. Aditiva musí zajišťovat stabilitu plastu při provozních podmínkách, musí být dostatečně účinná, nesmí mít nežádoucí účinky na vlastnosti polymerů, mohou přinést i ekonomickou úsporu. [1]

Základní přísady do polymerů:

- **Plastikační činidla** – zvětšují rychlost a účinnost plastikace. [2]
- **Maziva** – usnadňují zpracování obtížně zpracovatelných plastů, např. PVC, PS, PTFE, vzhled povrchu, tepelnou a světelnou stabilitu. Dělíme je na maziva s vnějším a vnitřním účinkem.
- **Separační činidla** – usnadňují vyjímání výrobku z forem.
- **Změkčovadla** – poskytují polymerům ohebnost, tvárnost, vláčnost, dále snižují teplotu skelného přechodu a viskozitu taveniny.
- **Tepelné stabilizátory** – jsou látky, které umožňují zpracování polymerů za tepla a tváření polymerů, jejichž teplota měknutí a rozkladu leží v úzkém rozmezí. K těmto polymerům patří především PVC. [1]

1.4.2 Antidegradanty

Jako antidegradanty se označují přísady, které dlouhodobě chrání výrobky před vnějšími vlivy prostředí během jejich používání. Rozdělují se na:

- **Světelné stabilizátory** – jsou přísady, které absorbují ultrafialové záření, tzn. nejenergičtější složku slunečního světla, která způsobuje degradaci polymerů.
- **Antioxidanty** – zabraňují tepelně oxidačnímu stárnutí.
- **Antiozonanty** – zabraňují praskání pryže ozonem. [1]

1.4.3 Síťovací prostředky

Látky, které se účastní síťovacích reakcí, t.j. spojování lineárních nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců příčnými vazbami do struktury prostorové sítě. přísady, které se účastní síťovacích reakcí, t.j. vytváření příčných vazeb mezi lineárními nebo rozvětvenými makromolekulami.

- **Síťovací činidla** – umožňuje samostatné síťování polymerů
- **Aktivátory síťování** – přísady aktivující síťovací reakci
- **Urychlovače síťování** – látky urychlující reakci síťovacího činidla s polymerem. [2]

1.4.4 Přísady ovlivňující další fyzikální vlastnosti

- **Plniva** – jsou přísady, které ovlivňují vlastnosti směsí i výrobků. Plnivy lze zlepšit mechanické vlastnosti výrobků (např. pevnost, odolnost vůči otěru, houževnatost), jeho odolnost vůči teple, ohni, korozi, stárnutí, ovlivnit jeho vzhled a snížit cenu. Jsou to většinou tuhé látky používané ve formě prášků, tuhých vláken nebo granulí.
- **Nadouvadla** – se uplatňují při zpracování polymerů lehčené hmoty. Nadouvadla se při zpracování za zvýšené teploty rozkládají za vzniku plynných produktů, které ve výrobku vytvoří uzavřené nebo otevřené póry.
- **Pigmenty (práškové barvy)** – jsou barvené prášky nerozpustné v polymerech, kterým propůjčují příslušný barevný odstín. [1]

2 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ

Záření neboli radiace je proces, při kterém dochází k přenosu energie prostorem. Tento přenos energie může být uskutečňován dvěma druhy mechanismů:

- **Časově proměnné pole** – šíří se prostorem ve formě vln, ty se odpoutávají od zdroje a přenášejí do prostoru část energie z tohoto zdroje (např. elektromagnetické vlny). Rovnice těchto polí mají vlnové šíření. [5]
- **Pohybující se částice** - jsou eliminovány zdrojem, velkou rychlostí letí prostorem a přenášejí tak kinetickou energii, hybnost a popřípadě i elektrický náboj, ze zdroje do okolního prostoru. Příkladem je záření β (proud rychle letících elektronů) nebo α (proud heliových jader). [5]

Ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony s atomového obalu a tím látku ionizovat. Toto záření je ve formě záření korpuskulárního a elektromagnetického.

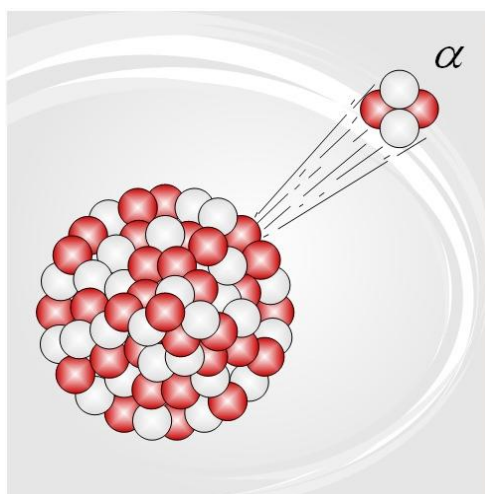
- **Korpuskulární záření** – je druh částicového záření představující proud částic o uspořádaném pohybu s nenulovou klidovou hmotností, pohybující se rychlostí menší než rychlost světla. Zachovává si svou existenci i po zastavení pohybu. Mezi tato záření se řadí záření α , β^- (elektrony), β^+ (pozitrony), protonové záření p^+ , neutronové záření n^0 , atd. [5]
- **Elektromagnetické záření** - je záření ve tvaru příčné vlny charakterizované dvěma na sebe navzájem kolmými vektory (intenzitou elektrického pole a magnetickou indukcí). Kvanta tohoto záření nemají klidovou hmotnost, jsou to kvanta vlnění, pohybující se rychlostí světla (fotony – záření γ). [5]

2.1 Základní druhy záření

2.1.1 Záření alfa α

Jako částice alfa se v částicové fyzice označuje jádro helia. Jde vlastně o atom helia, z něhož byl odstraněn elektronový obal. Tato částice se označuje symbolem α nebo He^{2+} . Tvoří ji dva protony a dva neutrony (je tedy kladně nabitá s elektrickým nábojem $+2e$). Proud α částic se označuje jako záření alfa. Vzhledem k velikosti části alfa záření jde

o nejslabší druh jaderného záření, který může být odstíněn i listem papíru. Alfa částice se pohybují poměrně pomalu a mají malou prolínavost. Protonové i neutronové číslo α částice je rovno 2. Radioaktivní přeměně, při které je uvolňována alfa částice, tzv. alfa rozpad, podléhá např. uran ^{238}U . Při alfa rozpadu se z jádra atomu uvolní dva neutrony a dva protony. Tato alfa částice se začne pohybovat od mateřského jádra. Částice alfa jsou vyzařovány některými radioaktivními jádry atomů, tzv. alfa.zářiči. Počáteční rychlost (a teda i energie) uvolňovaných částic alfa je charakteristická pro každý izotop. Pokud na částice záření působí elektrické nebo magnetické pole, lze tuto rychlost určit a tak konkrétní izotop detektovat. [5]



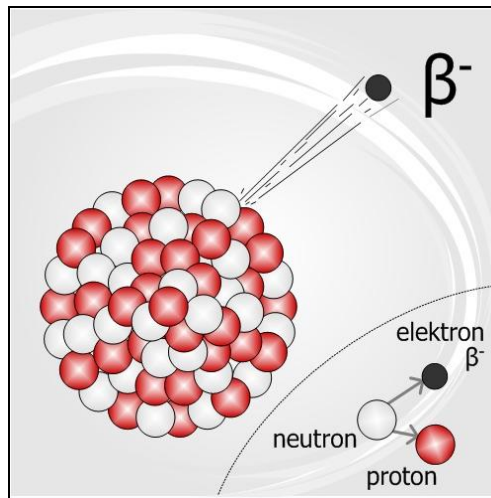
Obr. 5: Záření alfa [5]

2.1.2 Záření beta β

Záření beta přirozených radioaktivních prvků je složeno ze záporných elektronů, proto je přesněji označujeme jako β^- , abychom je odlišili od záření beta některých umělých radioaktivních nuklidů, složených z kladných pozitronů β^+ . Tyto částice jsou vysílány radioaktivními jádry prvků při beta-rozpadu. Pohybují se velmi rychle, rychlostí dosahující 99% rychlosti světla. 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.

Jednomu typu přeměny beta podléhá bismut ^{212}Bi . Při ní se v jádře atomu přemění neutron na proton, elektron a antineutrino. Proton zůstane v jádře a elektron s antineutrinem jádro

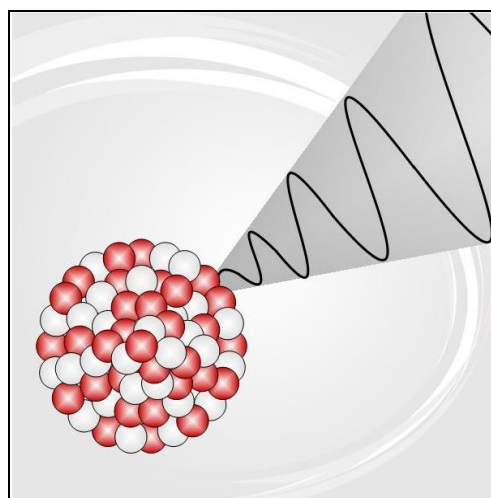
opustí. Pohybující se elektron se stane beta zářením. Nové jádro má o jeden proton více. Beta rozpadem bismutu pak vzniká polonium ^{212}Po . [5]



Obr. 6: Záření beta [5]

2.1.3 Záření gama γ

Záření gama je vysoce energetické elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních a jiných jaderných a subjaderných dějích. Patří mezi záření s velmi krátkou vlnovou délkou, která vzniká v jádrech některých radioaktivních prvků jako cesium, thorium, iridium či kobalt. Často je definováno jako záření o energii fotonů nad 10 keV. To souvisí se skutečností, že hranice není stanovena uměle, ale tyto druhy záření se rozlišují dle svého zdroje, přičemž se samo záření jinak fyzikálně neliší. Do materiálů proniká lépe než záření alfa nebo záření beta, ale je méně ionizující. [5]



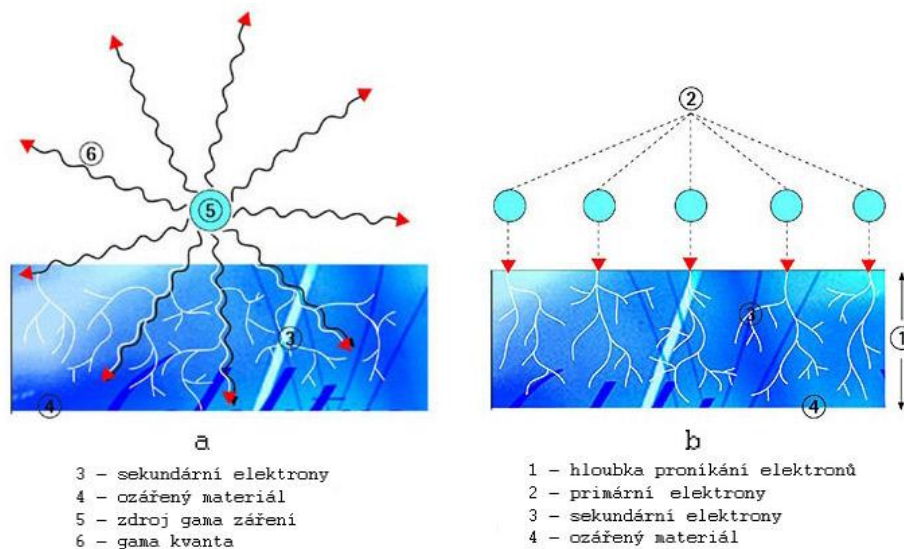
Obr. 7: Záření gama [5]

2.1.4 Neutronové záření

Vedle tří hlavních druhů záření existuje také záření neutronové. Lze jej vyvolat uměle v jaderných reaktorech nebo při jaderné explozi. Proud rychle letících neutronů má vysokou pronikavost díky tomu, že nesnese elektrický náboj, a nemůže tak ztrácet energii přímou ionizací. [2]

2.2 Rozdíly mezi elektronovým beta zářením a zářením gama

Hlavní rozdíl mezi oběma druhy záření je především v intenzitě dávky ozáření a ve schopnosti pronikat materiálem. [5]



Obr. 8: Schéma pronikání gama a beta záření do materiálu [7]

Při ozařování beta zářením se pracuje s vysokými intenzitami dávek ozáření, ale omezenou hloubkou vniknutí závislou na energii. Gama záření má naopak vysokou schopnost penetrace při relativně nízké intenzitě dávky ozáření. Výkon dávky je závislý na instalované celkové aktivitě zdroje záření. Z hlediska technického použití těchto záření to znamená, že při ozařování beta zářením je v průběhu několika sekund dodána dávka, na kterou by záření gama potřebovalo několik hodin. Proto je v praxi gama záření využíváno pro ozařování více m³ současně. [2]

3 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 sesíťování 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. Sesíťováním ztrácejí polymery rozpustnost a termoplasticitu a naopak získávají tvarovou stálost za zvýšených teplot někdy i vyšší odolnost vůči chemikáliím.[2]

Prostorově sesíťované struktury vznikají různými způsoby, zejména:

- Postupnými reakcemi nízkomolekulárních látek. Polyadičními či polykondenzačními reakcemi vznikají např. epoxidové a fenolové pryskyřice. Jejich síť se dokončuje ve vytvrzovacím kroku.
- Polymerační řetězovou reakcí, síťovací polymerací. Například kopolymerací styrenu s divinylbenzenem vznikají hmoty použitelné pro měniče iontů, kopolymerací hydroxyethylmetharylátu s glykoldimethakrylátem hydrofilní gely používané v lékařství.
- Spojováním reaktivních konců nízkomolekulárních polymerů o molární hmotnosti řádu 10 g mol^{-1} . Proces vzniku sítě je formálně podobný jako v případě 1. Například ze směsi polyetherdiolu, polyethertriolu a diisokyanátu mohou vzniknout polyurethanové materiály buď kaučukovité, nebo tvrdé.
- Zavedením příčných vazeb do vysokomolekulárních polymerů. Vulkanizací kaučuků vzniká pryž, ozářením zesíťovaný polyethylen apod.

Ve všech čtyřech případech probíhají při síťování tyto děje:

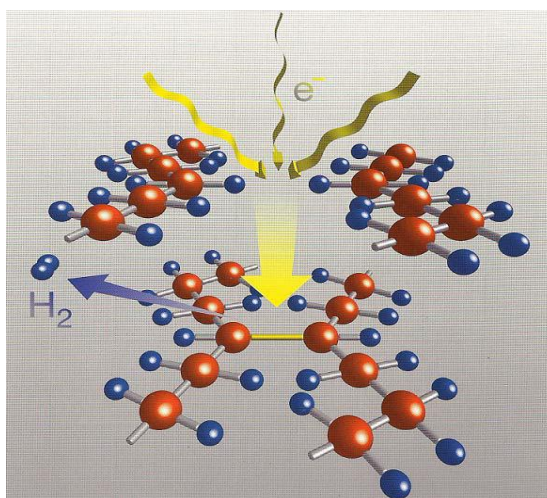
- v první fázi vzrůstají rozměry molekul i polydisperzita systému,
- při určitém stupni reakce dospěje systém do bodu gelace, ve kterém molární hmotnost vzroste nad všechny meze a v systému se objeví první stopy nekonečné struktury gelu,

- po překročení bodu gelace se systém skládá ze dvou částic: z nekonečné struktury, gelu a z molekul konečné velikosti, soli, který lze od gelu oddělit extrakcí, gel je nerozpustný, v rozpouštědle botná,
 - v dalším průběhu reakce obsah solu klesá a jeho molární hmotnost i polydispersita se zmenšují,
 - v gelu, vznikají tzv. elasticky aktivní řetězce sítě, které při deformaci nesou napětí a určují velikost modulu pružnosti gelu a jeho rovnovážný stupeň nabotnění.
- [6]

3.1 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 vstříkovaní, vytlačování nebo vyfukování). Variací ozařovacích parametrů lze měnit stupeň zesíťení, čímž ovlivníme vlastnosti materiálu tak, jak je požadováno. [2]

Základním předpokladem je, aby materiál po dobu ionizačního záření síťoval, a ne degradoval. U některých polymerů je poté nutné přidavku pomocného síťovacího činidla. Interakci 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 C-C. [2]



Obr. 9: Schéma radiačního síťování elektronovým zářením [2]

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. [2]

3.1.1 Materiály pro radiační síťování

Pro výběr vhodné materiálu jsou rozhodující požadované užité vlastnosti výrobků. Využitím technologie radiačního síťování mohou být realizovány výrobky s mimořádnými technickými výhodami a efektem ekonomického zisku. Tab. č. 1 ukazuje některé vhodné materiály k zesíťování. [2]

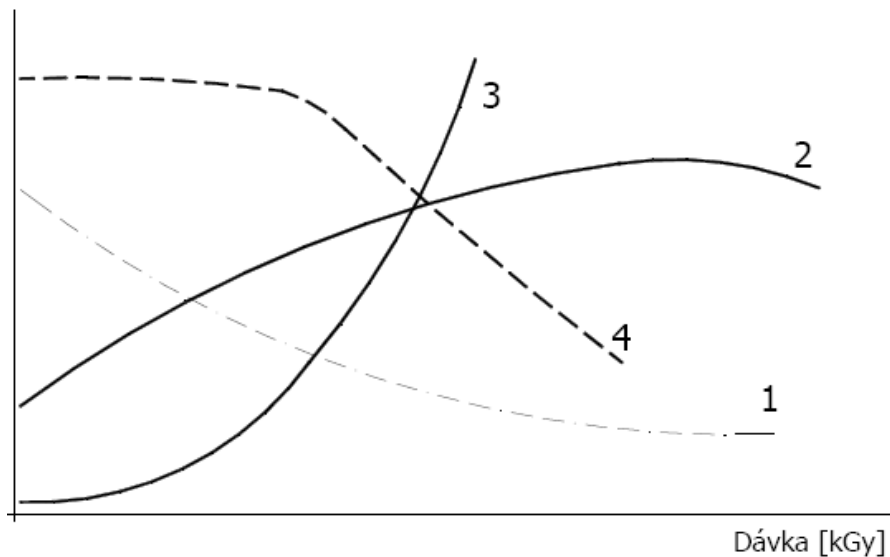
Tab. 1: Radiačně síťované polymery [2]

Termoplasty	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, polybutylen tereftalát UP, nenasycená polyesterová pryskyřice
	Halogenované 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, styren-butadien-styrenový kopolymer SI, silikon
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 TPE-V, zesíťovaný polyolefinický termoplastický el.

3.1.2 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 ke změnám mechanických, teplotních a chemických vlastností materiálu.



Obr. 10: Některé vlastnosti plastů v závislosti na dávce ozáření [2]

1) tažnost, 2) pevnost v tahu, 3) tvarová stálost, 4) botnání

Radiačním síťováním dochází ke změnám následujících vlastností plastů:

1) 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

2) Tepelné vlastnosti:

- Zlepšené 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 odolnost proti stárnutí

3) Chemických vlastností

- Snížení rozpustnosti
- Zlepšení odolnosti proti bobtnání
- Zvýšení odolnosti proto trhlinám způsobených pnutí
- Zlepšení odolnosti proti hydrolyze
- Zvýšená olejuvzdornost [2]

4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU

Celá řada mechanických zkoušek spočívá v tom, že se zkušební tělesa pod určitým napětím nějakým způsobem deformují. Všechny potřebné veličiny t.j. síla, průřez, rychlost a velikost deformace, musí být s dostatečnou přesností a citlivostí měřitelné a ve vzájemní závislosti převoditelné na grafický záznam. Tomuto požadavku vyhovují v současnosti univerzální digitální zkušební systémy (přístroje) s automatickým provedením zkoušky, vyhodnocením, zpracováním výsledků a reprodukovatelností zkoušek, které plně odpovídají nárokům a požadavkům norem pro kontrolu jakosti. Kromě standardního vybavení pro základní zkoušky, včetně záznamu jejich celého průběhu, jsou přístroje uzpůsobeny i pro předem programované zkoušky s postupným nebo cyklickým namáháním nebo deformací.

Matematický popis mechanického chování plastů je v podstatě kombinace čtyř proměnných:

- napětí
- deformace
- času (často vyjadřovaného rychlostí deformace)
- teploty [3]

4.1 Příprava zkušebních těles

Výsledky všech zkoušek jsou závislé na tvaru zkušebních těles, technologii jejich přípravy, opracování a úpravě. Zkušební tělesa z termoplastů se připravují převážně přímo ze zkušebních materiálů jejich vstřikováním do příslušných forem a lisováním. Vlastnosti těchto vzorků jsou závislé hlavně na rychlosti ochlazování taveniny. Druhým způsobem je příprava z hotových výrobků či polotovarů (z desek, tyčí, trubek apod.) řezáním, vysekáváním nebo mechanickým obráběním. Provádí se tak, aby se povrch nepřehříval a nevznikalo vnitřní pnutí. Všechna zkušební tělesa se před zkouškou podrobují vnější prohlídce. Zjišťují se vzduchové bubliny, povrchové trhlinky, vrásky, cizí tělesa zalisovaná v povrchu, mechanické poškození, nedolisky, vrstevnatost, homogennost v barvě apod. Tvar zkušebních těles, daných normou, musí být přesně dodržen, musí mít podélnou přímkovou osu, ostré, rovnoběžné hrany a rovné stěny. Válcová tělesa musí být kruhového průřezu, tělesa tvaru destiček musí mít v celé délce stejnou tloušťku, ostré, přímé rovnoběžné hrany. Tělesa s vadami se vyřazují. [3]

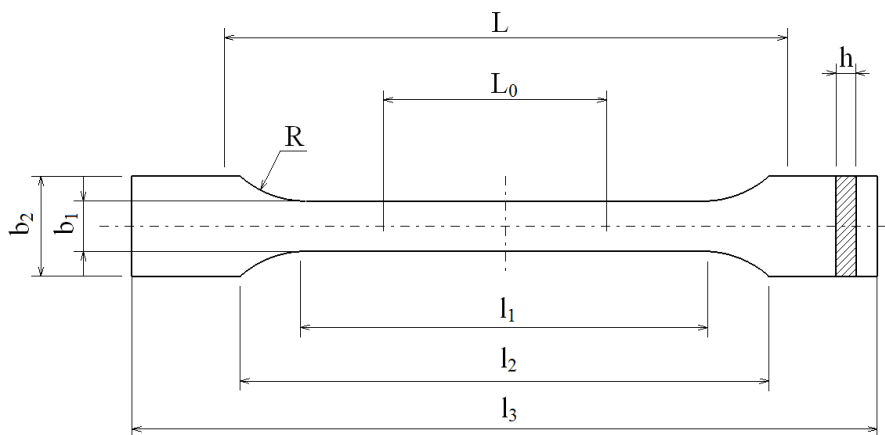
4.2 Statické tahové zkoušky

4.2.1 Podstata zkoušek

Na zkušební těleso působí ve směru jeho podélné osy stále se zatěžující síla až do okamžiku, při kterém dojde po určité deformaci k jeho přetržení, tj. destrukci nebo kdy měřené parametry (zatížení, prodloužení) dosáhnou zvolených hodnot. [3]

4.2.2 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa musí vyhovovat specifickým požadavkům příslušné materiálové normy, případně všeobecným podmínkám ze souboru norem pro jejich přípravu. Pro tahové zkoušky se používají standardní zkušební tělesa z termoplastů ve tvaru oboustranných lopatek, jejichž vlastnosti jsou dobře reprodukovatelné. Jejich tvar a přesné rozměry (mm) udává příslušná materiálová norma. [3]



Obr. 11: Zkušební těleso pro zkoušku tahem [2]

4.2.3 Zkušební zařízení

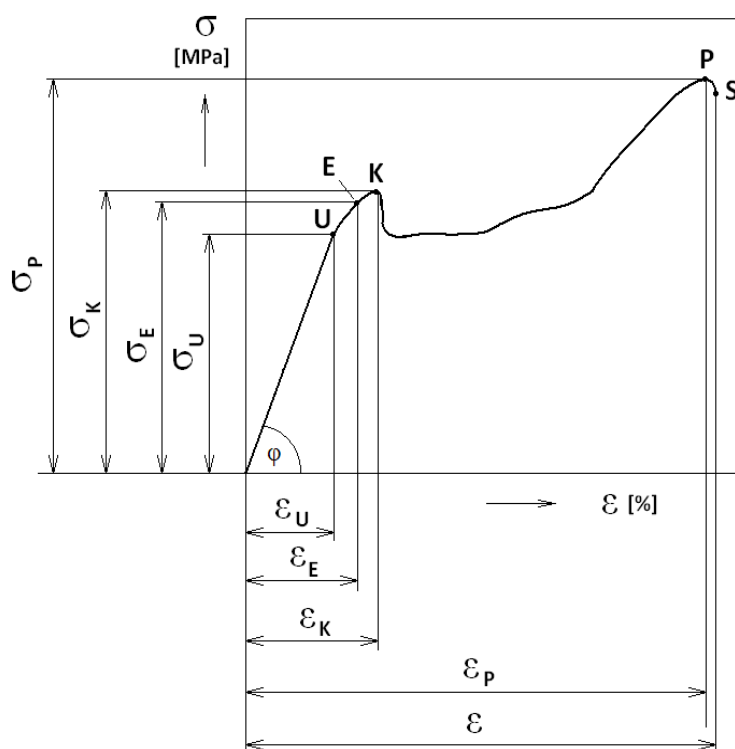
Při tahových zkouškách je většina typů univerzálních zkušebních přístrojů (trhacích strojů) konstruována tak, že jedna z čelistí je spojena s mechanickým posuvem a druhá s měřením síly. Ideální stav je takový, při němž čelist spojená s měřením síly je naprosto nepohyblivá, zatímco druhá se pohybuje konstantní rychlostí nezávislou na napětí. Nové elektronické zkušební přístroje se siloměrnými snímači a průtahoměry již graficky zaznamenávají takové křivky se skutečnými deformacemi a se současnou kontrolou skutečné rychlosti deformace. [3]

4.2.4 Provedení zkoušek

Zkušební tělesa se upínají do čelisti tak, aby jejich podélná osa byla shodná s osou stroje. Rychlost oddalování posuvné čelisti je měnitelná v požadovaném rozmezí od 1 mm/min do 500 mm/min a nastavuje se podle příslušné normy, která se týká zkoušeného materiálu. Zatížení se zvětšuje rovnoměrně až do přetržení vzorku. [3]

4.2.5 Vyhodnocení zkoušek

V průběhu zkoušky se trvale zaznamenává síla a prodloužení zkušebního tělesa. Při použití moderních elektronických zkušebních přístrojů s automatickým záznamovým systémem získáme kompletní tahové křivky efektivní napětí – poměrné prodloužení. Všechny charakteristické hodnoty ze zkoušky tahem se vyhodnocují z těchto křivek. [3]



Obr. 12: Pracovní diagram tahové zkoušky [2]

E – mez pružnosti σ_E , U – mez úměrnosti σ_U , K – mez průtažnosti σ_K , P – mez pevnosti σ_P , S – napětí při přetržení. Bodům odpovídají hodnoty tažnosti ϵ_E , ϵ_U , ϵ_K , ϵ_P .

4.3 Rázová zkouška

Rázové zkoušky se provádí proto, aby se zajistila schopnost polymeru odolávat působení napětí ve velmi krátkém časovém úseku, nejčastěji ohybu rázem. Pomalým zvyšováním na-

pětí, např. v ohybu, dochází u houževnatého materiálu e značným deformacím a zkušební těleso se nezlomí buď vůbec nebo se zlomí až při velkém průhybu. Čím více se bude zvyšovat rychlost ohybu, tím více se bude namáhaný materiál jevit jako křehký. Při rázovém namáhání různých materiálů může dojít k porušení vzorku buď křehkým, nebo houževnatým lomem, kterému vždy předchází větší nebo menší plastická deformace. Houževnatý lom, je před deformací vždy spojen s tokem. Je rovněž charakterizován s molekulárním procesem skluzu s částečným rozbalením molekulárních klube. K těmto jevům je zapotřebí velké části z vynaložené rázové energie. Křehký lom není spojen s tokem, poněvadž značná část energie se spotřebuje k roztržení hlavních a vedlejších vazeb. Při měření energie lomu se zjišťují velké rozptyly ve výsledcích, poněvadž křehký lom začíná vždy v místech mikroskopických trhlinek, které jsou velmi nerovnoměrně rozptýleny. Za rázové namáhání se považuje namáhání s rychlostí od 1 do 10 m·s⁻¹.

Rázové zkoušky poskytují určité informace o chování plastů, jejichž výsledky nelze přenášet všeobecně na různé tvary výrobků. Nejčastěji používanou zkouškou je rázová zkouška v ohybu, i když se provádí také rázové zkoušky v tahu, tlaku a krutu. [5]

4.3.1 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost závisí na druhu plastu, jeho složení a na teplotě. Polymery, je jichž teplota skelného přechodu je vyšší než normální teplota, jsou při běžné teplotě křehké a při zkoušce snadno prasknou. Jsou to amorfnní plasty jak s lineární tak s rozvětvenou strukturou. Naopak krystalické plasty, u nichž je T_g (teplota skelného přechodu) nižší než 20°C, vykazují často takovou houževnatost, že při zkoušce vůbec neprasknou. Houževnatost však u nich klesá se stoupající stupněm krystalinity. Zkoušky rázové houževnatosti se provádí dle ČSN EN ISO 179. Rázová houževnatost je kinetická energie kyvadlového rázového kladi-va, spotřebovaná na přeražení zkušebního tělesa bez vrubu, roztažená na původní plochu jeho příčného průřezu. [5]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem této bakalářské práce je zpracovat naměřená data z diplomových prací a vytvořit matici změn mechanických vlastností polymerních materiálů modifikovaných ozářením a nalézt optimální dávku intenzity záření pro konkrétní aplikaci (pro zkoušky v tahu, rázové a vrubové houževnatosti).

Pro tyto účely byly použity zkušební tělíska z materiálů PBT, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken), PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček, PA 12 od výrobce PTS Plastic Technologie Service, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 30% skelných vláken) od výrobce FRISSETTA Polymer GmbH & CO. KG., LDPE, HDPE od výrobce Dow Chemical Company zpracované na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420C a zkušební vzorky z PP (neplněný a plněný 25% skelných vláken) od výrobce Polymer Technology Systems zpracované na vstřikovacím stroji DEMAG Ergotech 50 – 200 system.

Zkušební tělíska byla ozářena vybranými dávkami záření ve firmě BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG. Ozářené i neozářené vzorky byly podrobeny tahovým zkouškám na stroji ZWICK ROELL 1456, zkouškám vrubové houževnatosti na stroji CAEST Resil Impactor Junior a zkouška rázové houževnatosti na stroji ZWICK ROELL B5113.

6 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

K realizaci diplomových prací bylo zapotřebí využít několik druhů strojů a zařízení. Použity byly vstřikovací stroj ARBURG Allrounder C420 a pro polypropyleny DEMAG Ergotech 50–200 system a následně zařízení pro samotné provedení zkoušek. Zkušební trhací stroj ZWICK ROELL 1456 a u vybraných druhů polymerů Charpyho kladivo ZWICK ROEL B5113.

6.1 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder C420

Tento vstřikovací stroj byl využit pro výrobu zkušebních tělísek z:

- PBT, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken), PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček), PA 12 od výrobce PTS,
- PA 12 od výrobce PTS, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 30% skelných vláken) od výrobce Frisetta,
- LDPE, HDPE od výrobce Dow Chemical Company



Obr. 13: Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder C420 [8]

6.1.1 Technické parametry vstřikovacího stroje Arburg

Tab. 2: Technické parametry vstřikovacího stroje Arburg

Typ stroje	ALLROUNDER 420C	
Uzavírací jednotka		
uzavírací síla	1000	max. kN
otevírací síla / zvýšená otevírací síla	35 / 250	max. kN
otevření	500	max. mm
vzdálenost mezi vodícími sloupy	420x420	mm
velikost upínací desky (šířka x výška)	570x570	mm
vyhazovací síla	40	max. kN
zdvih vyhazovače	175	max. mm
Hydraulika, pohon		
výkon čerpadla	22	kW
celkový příkon stroje	33,9	kW
Vstřikovací jednotka		
průměr šneku	40	mm
poměr šneku	20	L / D
zdvih šneku	145	max. mm
objem dávky	182	max. cm ³
vstřikovací tlak	2120	max. bar
vstřikovací rychlost (objemová)	168	max. cm ³ . s ⁻¹
zpětný tlak pozitivní / negativní	350 / 160	max. bar
kroučící moment šneku	700	max. Nm
přítláčná síla trysky	70	max. kN
objem násypky	50	l
Olejová náplň		
množství oleje	235	l
hmotnost stroje, bez oleje	3700	kg

6.2 Vstřikovací stroj DEMAG Ergotech 50 – 200 system

Tento vstřikovací stroj byl využit pro výrobu zkušebních tělísek z:

- PP (neplněný a plněný 25% skelných vláken) od výrobce PTS



Obr. 14: Vstřikovací stroj DEMAG Ergotech 50 – 200 system

6.2.1 Technické parametry vstřikovacího stroje Demag

Tab. 3: Technické parametry vstřikovacího stroje Demag

Typ stroje	ERGOTECH 50 - 200	
Uzavírací jednotka		
uzavírací síla	500	kN
dráha otevření formy	400	max. mm
výška formy	210	mm
světlost mezi deskami	610x660x710	mm
rozměry upínacích desek	540x530	mm
Vstřikovací jednotka		
průměr šneku	30	mm
poměr šneku	20	L / D
vstřikovací tlak	1900	bar
vstřikovací objem	106	max. cm ³
hmotnost vstřiku	94	max. g
vstřikovací rychlost	98/197	cm ³ . s ⁻¹
plastifikační výkon	14/21	g . s ⁻¹
přesah trysky	40	mm
přítlačná síla trysky	60	kN
Stroj celkově		
příkon čerpadla	11	kW
topení plastifikačního válce	8,3	kW
množství oleje	180	l
hmotnost stroje bez oleje	3300	kg

6.3 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Zkoušky v tahu byly provedeny na zkušebním stroji ZWICK ROELL 1456.



Obr. 15: Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

6.3.1 Technické parametry zkušebního stroje

Tab. 4: Technické parametry zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456

Typ stroje	ZWICK ROELL 1456	
Rozměry stroje a hmotnost		
strojová výška	1284	mm
celková výška	2012	mm
celková šířka	630	mm
šířka pracovního prostoru	420	mm
hmotnost	150	kg
Dynamika stroje		
maximální zkušební síla	20	kN
maximální rychlost posuvu příčnicku	750	mm. min ⁻¹
Ostatní parametry		
extenzometry pro měření protažení	macro	
	přídavný	
vyhodnocovací software	master - tah	
	standart – ohyb a tlak	
	standardní hysterezní zkoušky	

6.4 Charpyho kladivo ZWICK ROELL B5113

Zkoušky rázové houževnatosti byly provedeny na zkušebním stroji ZWICK ROELL B5113.



Obr. 16: Charpyho kladivo ZWICK ROELL B5113

6.4.1 Technické parametry zkušebního stroje

Tab. 5: Technické parametry Charpyho kladiva ZWICK ROELL B5113

Typ stroje	ZWICK ROELL B5113	
Rozměry stroje		
Úhel břitu kyvadla	30±1	°
Délka kyvadla	225	mm
Rozpětí podpěry	0-100	mm
Úhel vychýlení kyvadla	160	°
Dynamika stroje		
Energie	5-15	J
Rychlost rázu	2,63	mm/s
Ostatní parametry		
Vyhodnocovací software	Test Xpert Standart	

6.5 Zkušební stroj CAEST Resil Impactor Junior

Rázové zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji CAEST Resil Impactor Junior.



Obr. 17: Zkušební stroj CAEST Resil Impactor Junior

6.5.1 Technické parametry zkušebního stroje

Tab. 6: Technické parametry zkušebního stroje CAEST Resil Impactor Junior

Typ stroje	CEAST RESIL IMPACTOR JUNIOR	
Rozměry stroje		
Úhel břitu kyvadla	30±1	°
Délka kyvadla	225	mm
Rozpětí podpěry	40-62-70	mm
Úhel vychýlení kyvadla	160	°
Dynamika stroje		
Energie	1-25	J
Rychlost rázu	2,9	mm/s

7 POUŽITÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI

7.1 Polyester

7.1.1 PBT

Je semikrystalický polymerní materiál patřící do skupiny polyesterů. V hlavních řetězcích obsahuje esterové vazby. Má výborné elektrické a mechanické vlastnosti. Je odolný vůči olejům, rozpouštědlům a chemikáliím. [8]

Tab. 7: Vybrané vlastnosti polymeru PBT

Vlastnosti	PBT	Jednotky
hustota	1,3	g/cm ³
Mechanické vlastnosti		
napětí na mezi kluzu	60	MPa
tažnost	200	%
E-modul pružnosti v tahu	2500	MPa
tvrdost podle Brinella	130	-
Teplotní vlastnosti		
tepelná vodivost	0,27	W/K m
teplota tavení popř.zesklovatění	225	°C
Jiné vlastnosti		
nasákavost při normál. podmín-	0,25	%
nasákavost při vlhkosti	0,5	%

7.1.2 Použití

Neplněné PBT se zpravidla zpracovává vstřikováním, vytlačováním a vyfukováním. PBT vyztužené skelnými vlákny se díky svým výborným elektrickým vlastnostem využívá při výrobě elektrických a elektrostatických konektorů a zásuvek, motorových skříní a cívek, spínačů apod. [8]

7.2 Polyamidy

Polyamidy jsou převážně krystalické polymery. Obsah krystalického podílu může dosáhnout až 60%, který významně ovlivňuje fyzikální a chemické vlastnosti, chemickou odolnost, elektrické, mechanické a optické vlastnosti polyamidu. [8]

Tab. 8: Vybrané vlastnosti polymeru PA 6

Vlastnosti	PA 6	Jednotky
hustota	1,14	g/cm ³
Mechanické vlastnosti		
napětí na mezi kluzu	80	MPa
tažnost	70	%
E-modul pružnosti v tahu	3000	MPa
tvrdost podle Brinella	150	-
Teplotní vlastnosti		
tepelná vodivost	0,23	W/K m
teplota tavení popř.zesklovatění	220	°C
Jiné vlastnosti		
nasákavost při normál. podmín-	3	%
nasákavost při vlhkosti	9,5	%

Tab. 9: Vybrané vlastnosti polymeru PA 6 (neplněný a plněný 25% sk. vláken)

Vlastnosti	PA 6.6 neplněný	PA 6.6 plněný	Jednotky
hustota	1,14	1,32	g/cm ³
Mechanické vlastnosti			
napětí na mezi kluzu	85	-	MPa
tažnost	40	-	%
E-modul pružnosti v tahu	3100	8000	MPa
tvrdost podle Brinella	160	240	-
Teplotní vlastnosti			
tepelná vodivost	0,23	0,27	W/K m
teplota tavení popř.zesklovatění	260	260	°C
Jiné vlastnosti			
nasákavost při normál. podmín-	2,8	1,9	%
nasákavost při vlhkosti	8,5	6	%

Tab. 10: Vybrané vlastnosti polymeru PA 12

Vlastnosti	PA 12	Jednotky
hustota	1,01	g/cm ³
Mechanické vlastnosti		
napětí na mezi kluzu	46	MPa
tažnost	280	%
E-modul pružnosti v tahu	1500	MPa
tvrdost podle Brinella	95	-
Teplotní vlastnosti		
tepelná vodivost	0,23	W/K m
teplota tavení popř.zesklovatění	180	°C
Jiné vlastnosti		
nasákavost při normál. podmín-	0,8	%
nasákavost při vlhkosti	1,5	%

7.2.1 Použití

Z PA 6 a PA 6.6 se vyrábí textilní a technická vlákna, rybářské vlasce, výplety tenisových raket. Dále se využívají jako pro výrobu technický dílů (pastorky, šrouby). Rovněž se v automobilovém průmyslu používají pro výrobu součástí karburátorů, ventilátory, vnitřní kryty blatníků. PA 11 a PA 12 se využívají na armatury pro rozvod vody, pohonné součástky pro provoz pod vodou, hnací řemeny apod. [8]

7.3 Polyetylen

7.3.1 LDPE, HDPE

Je materiálem patřící do skupiny polyolefinů. Je to plast, jehož vlastnosti jsou mimořádně citlivé na strukturu. Polyetylen je prakticky bez zápachu a chuti. Při normální i velmi nízké teplotě má dobré mechanické vlastnosti, především vysokou ohebnost a rázovou houževnatost. Je odolný proti vodě, vodním roztokům i chemikáliím. Propustnost pro vodní páry je nízká. [8]

Tab. 11: Vybrané vlastnosti polymeru HDPE

Vlastnosti	HDPE	Jednotky
hustota	0,963	g/cm ³
Mechanické vlastnosti		
napětí na mezi kluzu	30	MPa
tažnost	200	%
E-modul pružnosti v tahu	1350	MPa
tvrdost podle Brinella	57	-
Teplotní vlastnosti		
tepelná vodivost	0,42	W/K m
teplota tavení popř.zesklovatění	135	°C

Tab. 12: Vybrané vlastnosti polymeru LDPE

Vlastnosti	LDPE	Jednotky
hustota	0,919	g/cm ³
Mechanické vlastnosti		
napětí na mezi kluzu	9	MPa
tažnost	700	%
E-modul pružnosti v tahu	200	MPa
tvrdost podle Brinella	15	-
Teplotní vlastnosti		
tepelná vodivost	0,3	W/K m
teplota tavení popř.zesklovatění	110	°C

7.3.2 Použití

LDPE se používá především na výrobu folií. HDPE se používá především na výrobu dutých předmětů ve formách např. nádoby na čisticí prostředky v domácnosti, velkoobjemové nádoby do 1000 litrů aj. [8]

7.4 Polypropylen

Je dalším materiálem, který patří do skupiny polyolefinů, t.j. materiálů, které jsou tvořené řadou uhlovodíků s jednou dvojnou vazbou umístěnou na prvním uhlíku. Polypropylen

lze podrobit různým chemickým reakcím. Lze ho chlorovat, chlorsulfovat nebo roubovat jinými monomery. Takto je možné ovlivnit některé zpracovatelské a užité vlastnosti. [8]

Tab. 13: Vybrané vlastnosti polymeru PP

Vlastnosti	PP	Jednotky
hustota	0,91	g/cm ³
Mechanické vlastnosti		
napětí na mezi kluzu	23	MPa
tažnost	630	%
E-modul pružnosti v tahu	1100	MPa
tvrdost podle Brinella	44	-
Teplotní vlastnosti		
tepelná vodivost	0,22	W/K m
teplota tavení popř.zesklovatění	163	°C

7.4.1 Použití

Poměrně velké množství se používá na výrobu vláken nebo folií. Díky svým dobrým elektroizolačním vlastnostem se polypropylen využívá i na elektrotechnické výstřiky a na izolaci vodičů. Velké množství se také používá k výrobě nádob, různých druhů nábytku a hraček atd. [8]

8 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Zkušební vzorky byly zhotoveny v jednonásobné formě s dutinou ve tvaru lopatky na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420C. Vstřikovaly se tyto materiály:

- PBT, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken), PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček), PA 12 od výrobce PTS,
- PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 30% skelných vláken) od výrobce Frisetta,
- LDPE, HDPE od výrobce Dow Chemical Company.

Zkušební vzorky byly zhotoveny v jednonásobné formě s dutinou ve tvaru lopatky na vstřikovacím stroji DEMAG Ergotech 50 – 200 system. Vstřikovaly se tyto materiály:

- PP (neplněný a plněný 25% skelných vláken) od výrobce PTS.

8.1 Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje ARBURG Allrounder 420C

8.1.1 Polyamidy

Tab. 14: Přehled polyamidů

Typ	Název	Výrobce
PA 6 neplněný	V-PTS-CREAMID-B3H2	PTS
PA 6.6 neplněný	V-PTS-CREAMID-A3H2	PTS
PA 6.6 plněný	V-PTS-CREAMID-A3H2G5FR	PTS
PA 11 neplněný	V-PTS-CREAMID-11T	PTS
PA 11 plněný	V-PTS-CREAMID 11-BUM25 0	PTS
PA 12	V-PTS-CREAMID-12-AMN 0 TLD	PTS
PA 6 neplněný	PA6 FRIANYL B63 VN	Frisetta
PA 6 plněný	PA6 FRIANYL B63 VN GV 30	Frisetta
PA 6.6 neplněný	PA6 FRIANYL A63 VN	Frisetta
PA 6.6 plněný	PA6 FRIANYL A63 VN GV 30	Frisetta

Parametry nastavení vstřikovacího stroje

V tabulce jsou uvedeny hodnoty vstřikovacího stroje a teploty pásem plastikační jednotky.

Tab. 15: Parametry nastavení vstřikovacího stroje pro materiál PTS

Parametry	PA 6 neplněný	PA 6.6 neplněný	PA 6.6 plněný	PA 11 neplněný	PA 11 neplněný	PA 12	Jednotky
Vstřikovací tlak	80	80	80	150	150	80	MPa
Dráha dávkování	26	26	26	33	26	28	mm
Doba chlazení	20	20	20	20	20	20	s
Teplota formy	90	90	85	60	50	60	°C
Teploty pásem plastikační jednotky							
T. pod násypkou	70	70	70	60	70	60	°C
Teplotní pásmo 1	220	245	245	210	240	210	°C
Teplotní pásmo 2	230	260	265	230	20	225	°C
Teplotní pásmo 3	245	275	275	250	260	235	°C
Teplotní pásmo 4	255	285	285	265	265	245	°C
Teplota trysky	265	290	290	270	270	250	°C

Tab. 16: Parametry nastavení vstřikovacího stroje pro materiál Frisetta

Parametry	PA 6 nepl- něný	PA 6 plněný	PA 6.6 nepl- něný	PA 6.6 nepl- něný	Jednotky
Vstřikovací tlak	65	65	80	65	MPa
Dráha dávkování	20	25	38,5	25	mm
Doba chlazení	17	17	17	17	s
Teplota formy	70	70	70	70	°C
Teploty pásem plastikační jednotky					
T. pod násypkou	40	40	40	40	°C
Teplotní pásmo 1	220	220	220	220	°C
Teplotní pásmo 2	250	250	250	250	°C
Teplotní pásmo 3	270	270	270	270	°C
Teplotní pásmo 4	280	280	280	280	°C
Teplota trysky	310	310	310	310	°C

8.1.2 Polyetylen

Tab. 17: Přehled polyetylenů

Typ	Název	Výrobce
LDPE	DOW LDPE 780 E	Dow Chemical Company
HDPE	DOW HDPE 25055 E	Dow Chemical Company

Parametry nastavení vstřikovacího stroje

V tabulce jsou uvedeny hodnoty vstřikovacího stroje a teploty pásem plastikační jednotky.

Tab. 18: Parametry nastavení vstřikovacího stroje

Parametry	LDPE	HDPE	Jednotky
Vstřikovací tlak	60	60	MPa
Dráha dávkování	37,5	38	mm
Doba chlazení	35	35	s
Teplota formy	40	40	°C
Teploty pásem plastikační jednotky			
T. pod násypkou	40	40	°C
Teplotní pásmo 1	140	150	°C
Teplotní pásmo 2	150	160	°C
Teplotní pásmo 3	160	180	°C
Teplotní pásmo 4	180	190	°C
Teplota trysky	190	200	°C

8.1.3 Polyester

Tab. 19: Přehled polyesteru

Typ	Název	Výrobce
PBT	V-PTS-CREATEC-B3HZC	PTS

Parametry nastavení vstřikovacího stroje

V tabulce jsou uvedeny hodnoty vstřikovacího stroje a teploty pásem plastikační jednotky.

Tab. 20: Parametry nastavení vstřikovacího stroje

Parametry	PBT	Jednotky
Vstřikovací tlak	80	MPa
Dráha dávkování	26	mm
Doba chlazení	20	s
Teplota formy	70	°C
Teploty pásem plastikační jednotky		
T. pod násypkou	70	°C
Teplotní pásmo 1	220	°C
Teplotní pásmo 2	250	°C
Teplotní pásmo 3	230	°C
Teplotní pásmo 4	240	°C
Teplota trysky	250	°C

8.2 Hodnoty nastavení vstřik. stroje DEMAG Ergotech 50 – 200 system

8.2.1 Polypropylen

Tab. 21: Přehled polypropylenů

Typ	Název	Výrobce
PP neplněný	V-PTS CREALEN-EP-2300L1	PTS
PP plněný	V-PTS-CREALEN-EP8G5HS	PTS

Parametry nastavení vstřikovacího stroje

V tabulce jsou uvedeny hodnoty vstřikovacího stroje

Tab. 22: Parametry nastavení vstřikovacího stroje

Parametry	PP neplněný	PP plněný	Jednotky
Vstřikovací tlak	80	80	MPa
Rychlost vstřikování	50	50	mm. s ⁻¹
Doba chlazení	40	50	s
Teplota formy	50	50	°C
Plnicí oblast	30	30	°C
Vstupní oblast	210	210	°C
Přechodová oblast	220	220	°C
Výstupní oblast	230	230	°C
Teplota trysky	240	240	°C

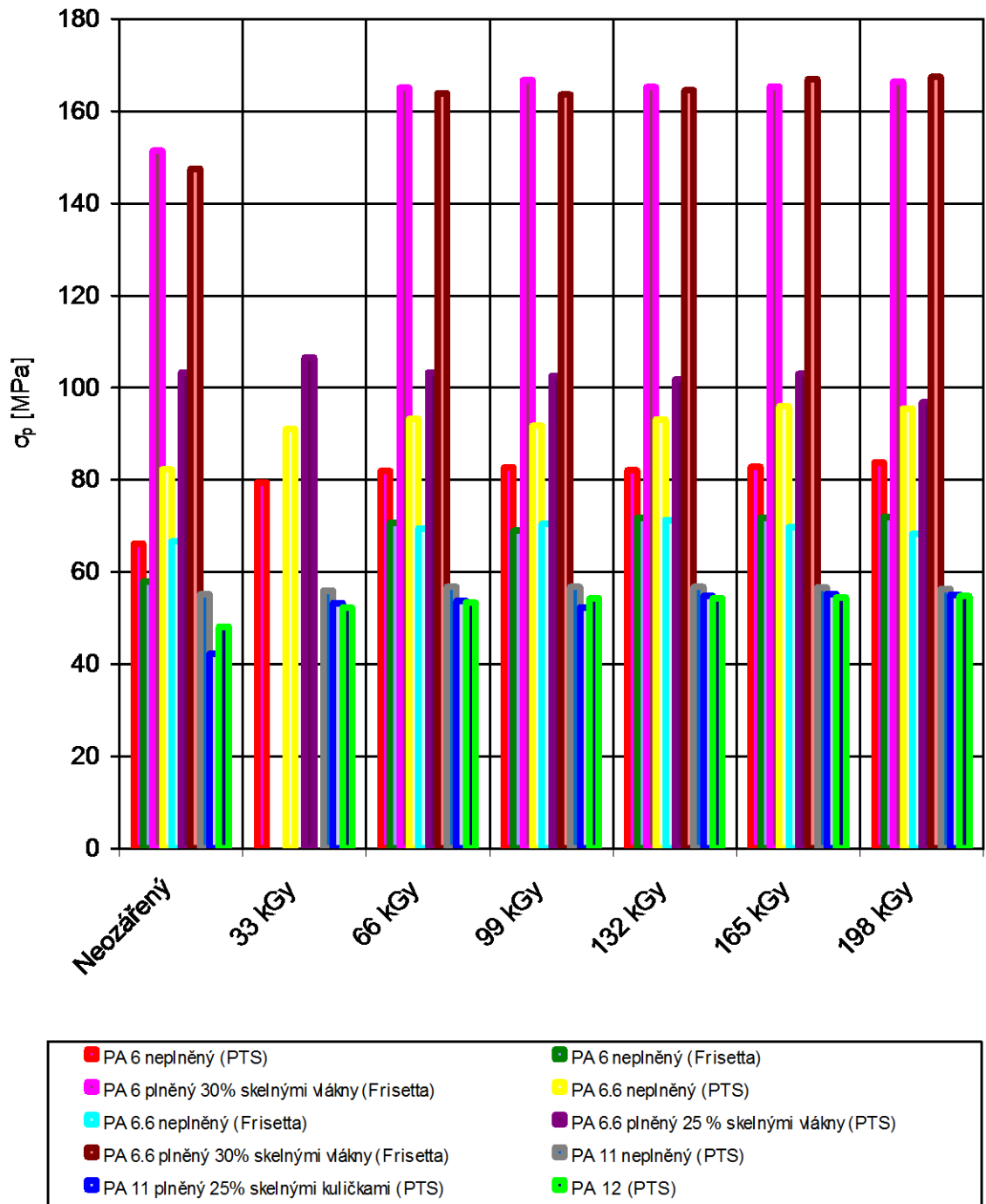
9 TAHOVÉ ZKOUŠKY

Zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji ZWICK ROELL 1456. Měření probíhalo při pokojové teplotě 23°C. U zvýšené teploty na 80°C u materiálu PBT, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken), PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček, PA 12, PP (neplněný a plněný 25% skelných vláken) od výrobce PTS, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 30% skelných vláken) od výrobce Frisetta, na 100°C u materiálu LDPE a HDPE od výrobce Dow Chemical Company. Zkušební vzorky byly namáhány jednoosým tahem. Pro každou dávku ozáření bylo použito 10 zkušebních vzorků.

Tab. 23: Mez pevnosti při 23°C

POLYAMIDY											
MEZ PEVNOSTI σ_p [MPa] PŘI 23°C											
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]								
			0	33	66	99	132	165	198		
PA 6 neplněný	V-PTS-CREAMID-B3H2	PTS	66,2	79,5 (20%)	81,9 (22%)	82,7 (25%)	82,1 (24%)	82,8 (25%)	83,8 (27%)		
PA 6 neplněný	PA 6 Frianyl B63 VN	Frisetta	57,9	-	70,6 (22%)	69,0 (19%)	71,7 (24%)	71,7 (24%)	72,0 (24%)		
PA 6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6 Frianyl B63 VN GV30	Frisetta	151,4	-	165,1 (9%)	166,7 (10%)	165,2 (9%)	165,3 (9%)	166,4 (10%)		
PA 6.6 neplněný	V-PTS-CREAMID-A3H2	PTS	82,3	91,0 (11%)	93,2 (13%)	91,7 (11%)	93,1 (13%)	96,0 (17%)	95,5 (16%)		
PA 6.6 neplněný	PA 6.6 Frianyl A63 VN	Frisetta	66,7	-	69,5 (4%)	70,5 (6%)	71,3 (7%)	69,8 (5%)	68,3 (2%)		
PA 6.6 plněný 25% skelnými vlákny	V-PTS-CREAMID A3H2G5FR	PTS	103,3	106,5 (3%)	103,3 (0%)	102,6 (-1%)	101,8 (-2%)	103 (0%)	96,8 (-6%)		
PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6.6 Frianyl A63 VN GV25	Frisetta	147,5	-	163,9 (11%)	163,6 (11%)	164,5 (12%)	166,9 (13%)	167,4 (14%)		
PA 11 neplněný	V-PTS-CREAMID 11T	PTS	55,2	56,0 (2%)	56,8 (3%)	56,8 (3%)	56,8 (3%)	56,7 (3%)	56,4 (2%)		
PA 11 plněný 25% skelnými kulíčkami	V-PTS-CREAMID 11-BUM25	PTS	42,3	53,3 (26%)	53,8 (27%)	52,4 (24%)	54,8 (30%)	55,3 (31%)	55,1 (30%)		
PA 12	V-PTS-CREAMID-12-AMN 0 TLD	PTS	48,2	52,3 (9%)	53,4 (11%)	54,3 (13%)	54,3 (13%)	54,5 (13%)	54,8 (14%)		

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 18: Porovnání meze pevnosti pro polyamidy při 23°C

Zhodnocení naměřených výsledků

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je zřejmé, že již při nejnižším ozáření materiálu mez pevnosti vzrůstá. Jak je patrné z tabulky č. 23 ze skupiny polyamidů dosáhl nejlepšího zlepšení z hlediska meze pevnosti při 23°C materiál **PA 11 plněný 25% skelnými kuličkami** od výrobce **PTS**. Z původní hodnoty 42,3 MPa neozářeného materiálu vzrostla hodnota meze pevnosti na 55,3 MPa při ozáření dávkou 165 kGy. Ozáření touto dávkou značí nárůst meze pevnosti o cca **31%**.

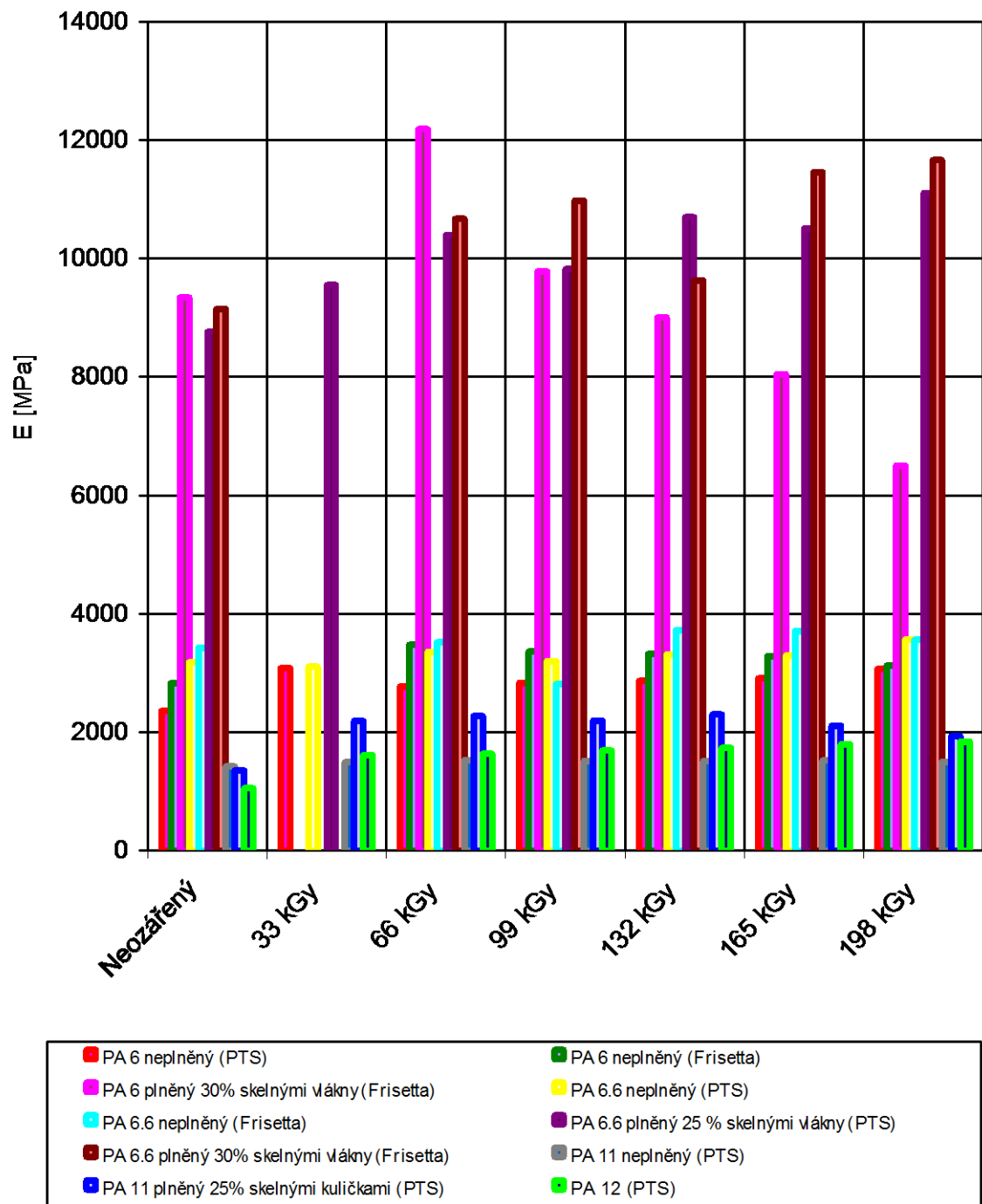
Z hlediska meze pevnosti při 23°C dosáhly ostatní polyamidy následujících hodnot:

- PA 6 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 27% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6 neplněný od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 24% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6.6 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 17% při dávce ozáření 165 kGy.
- PA 12 od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 14% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 10% při dávce ozáření 99 kGy,
- PA 6.6 neplněný od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 7% při dávce ozáření 132 kGy.
- PA 6.6 plněný 25% skelnými vlákny od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 3% při dávce ozáření 33 kGy. Při vyšším ozáření se mez pevnosti snižuje až pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu.
- PA 11 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 3% při dávce ozáření 66 kGy, 99 kGy, 132 kGy.

Tab. 24: Modul pružnosti při 23 °C

POLYAMIDY											
MODUL PRUŽNOSTI E [MPa] PŘI 23 °C											
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]								
			0	33	66	99	132	165	198		
PA 6 neplněný	V-PTS-CREAMID-B3H2	PTS	2355	3080 (31%)	2772 (18%)	2833 (20%)	2864 (22%)	2907 (23%)	3069 (30%)		
PA 6 neplněný	PA 6 Frianyl B63 VN	Frisetta	2825	-	3474 (23%)	3359 (19%)	3325 (18%)	3286 (16%)	3126 (11%)		
PA 6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6 Frianyl B63 VN GV30	Frisetta	9342	-	12185 (30%)	9778 (5%)	8999 (-4%)	8043 (-14%)	6500 (-30%)		
PA 6.6 neplněný	V-PTS-CREAMID-A3H2	PTS	3180	3106 (-2%)	3357 (6%)	3202 (1%)	3313 (4%)	3294 (4%)	3562 (12%)		
PA 6.6 neplněný	PA 6.6 Frianyl A63 VN	Frisetta	3429	-	3516 (3%)	2815 (-18%)	3723 (9%)	3711 (8%)	3558 (4%)		
PA 6.6 plněný 25% skelnými vlákny	V-PTS-CREAMID A3H2G5FR	PTS	8756	9551 (9%)	10393 (19%)	9819 (12%)	10696 (22%)	10506 (20%)	11104 (27%)		
PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6.6 Frianyl A63 VN GV25	Frisetta	9148	-	10669 (17%)	10974 (20%)	9627 (5%)	11458 (25%)	11660 (27%)		
PA 11 neplněný	V-PTS-CREAMID 11T	PTS	1419	1491 (5%)	1530 (8%)	1515 (7%)	1510 (6%)	1518 (7%)	1500 (6%)		
PA 11 plněný 25% skelnými kuličkami	V-PTS-CREAMID 11-BUM25	PTS	1357	2192 (62%)	2271 (67%)	2195 (62%)	2300 (70%)	2110 (56%)	1932 (35%)		
PA 12	V-PTS-CREAMID-12-AMN 0 TLD	PTS	1054	1615 (53%)	1635 (55%)	1692 (61%)	1731 (64%)	1795 (70%)	1839 (75%)		

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 19: Porovnání modulu pružnosti pro polyamidy při 23°C

Zhodnocení naměřených výsledků

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je zřejmé, že u většiny polyamidů modul pružnosti vzrůstá již při nejnižším ozáření. Ze skupiny polyamidů dosáhl nejlepšího zlepšení z hlediska modulu pružnosti při 23°C materiál **PA 12** od výrobce **PTS**. Z původní hodnoty 1054 MPa neozářeného materiálu, vzrostla hodnota modulu pružnosti na 1839 MPa při ozáření dávkou 198 kGy. Ozáření touto dávkou značí nárůst modulu pružnosti o **75%**.

Z hlediska modulu pružnosti při 23°C dosáhly ostatní polyamidy následujících hodnot:

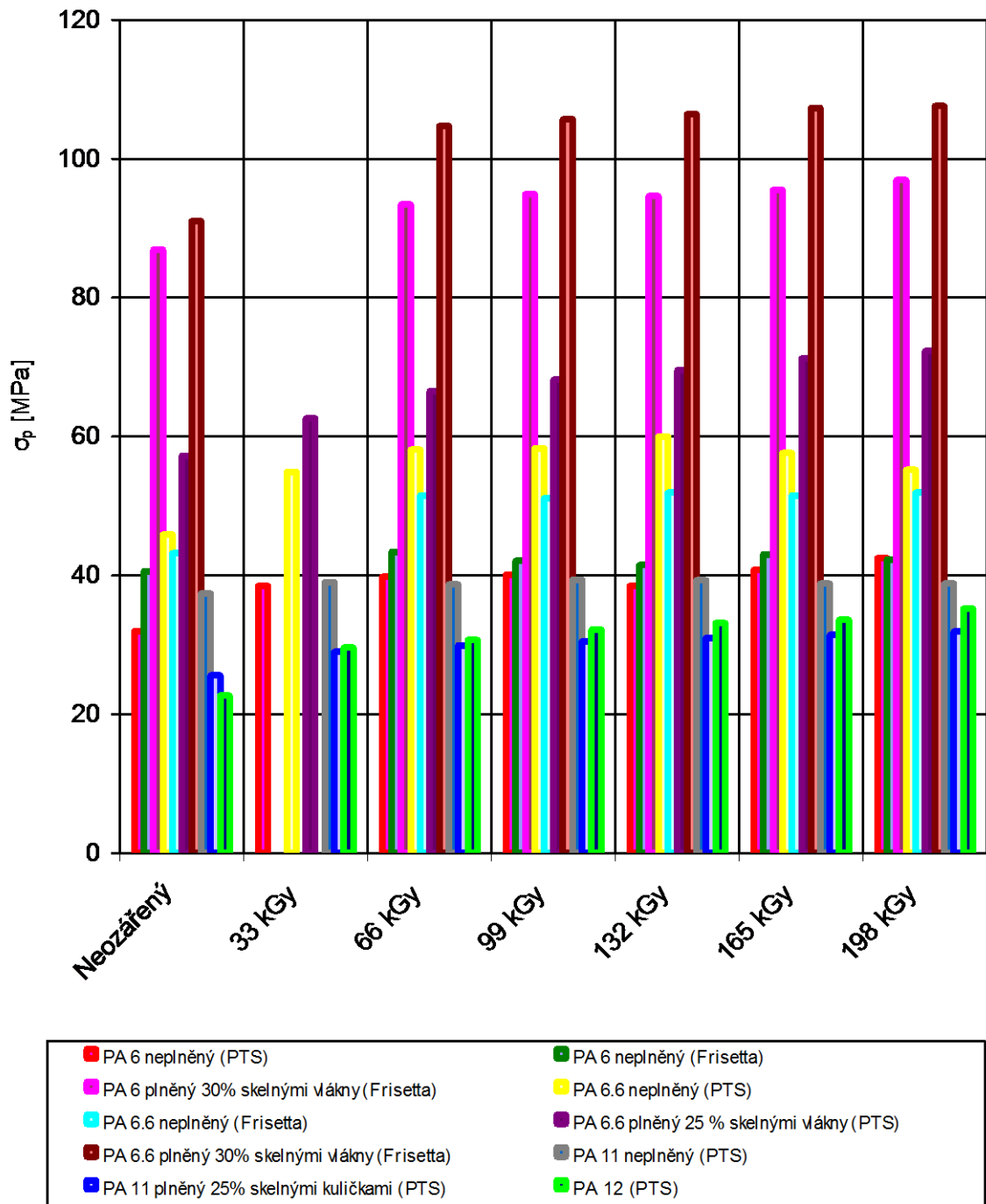
- PA 11 plněný 25% skelnými kuličkami od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 70% při dávce ozáření 132 kGy.
- PA 6 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 31% při dávce ozáření 33 kGy.
- PA 6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 30% při dávce ozáření 66 kGy. Při vyšším ozáření se modul pružnosti snižuje až pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu.
- PA 6.6 plněný 25% skelnými vlákny od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 27% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 27% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6 neplněný od výrobce Frisetta dosáhl největšího zvýšení o 23 % při dávce ozáření 66 kGy.
- PA 6.6 neplněný od výrobce PTS při ozáření nejnižší dávkou tj. 33 kGy se modul pružnosti mírně snižuje až pod hodnotu výchozího materiálu. Největšího zlepšení dochází při ozáření dávkou 198 kGy a to o 12%.
- PA 6.6 neplněný od výrobce Frisetta při ozáření dávkou 99 kGy dochází ke snížení modulu pružnosti o 18% pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu. Největšího zlepšení o 9 % dochází při ozáření dávkou 132 kGy.
- PA 11 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 8% při dávce ozáření 66 kG.

Tab. 25: Mez pevnosti při 80°C

POLYAMIDY										
MEZ PEVNOSTI σ_p [MPa] PŘI 80°C										
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]							
			0	33	66	99	132	165	198	
PA 6 neplněný	V-PTS-CREAMID-B3H2	PTS	32,0*	38,5* (20%)	39,8* (24%)	40,1* (25%)	38,5* (20%)	40,8* (28%)	42,5* (33%)	198
PA 6 neplněný	PA 6 Frianyl B63 VN	Frisetta	40,6	-	43,4 (7%)	42,1 (4%)	41,5 (2%)	43,0 (6%)	42,3 (4%)	
PA 6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6 Frianyl B63 VN GV30	Frisetta	86,9	-	93,4 (7%)	94,9 (9%)	94,6 (9%)	95,5 (10%)	96,9 (12%)	
PA 6.6 neplněný	V-PTS-CREAMID-A3H2	PTS	45,9	54,9 (20%)	58,1 (27%)	58,3 (27%)	60,0 (31%)	57,6 (25%)	55,2 (20%)	
PA 6.6 neplněný	PA 6.6 Frianyl A63 VN	Frisetta	43,2	-	51,5 (19%)	51,1 (18%)	51,9 (20%)	51,5 (19%)	51,9 (20%)	
PA 6.6 plněný 25% skelnými vlákny	V-PTS-CREAMID A3H2G5FR	PTS	57,2	62,6 (9%)	66,5 (16%)	68,2 (19%)	69,6 (22%)	71,2 (24%)	72,3 (26%)	
PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6.6 Frianyl A63 VN GV25	Frisetta	91,0	-	104,7 (15%)	105,7 (16%)	106,4 (17%)	107,3 (18%)	107,6 (18%)	
PA 11 neplněný	V-PTS-CREAMID 11T	PTS	37,4	39,0 (4%)	38,7 (3%)	39,4 (5%)	39,3 (5%)	38,8 (4%)	38,8 (4%)	
PA 11 plněný 25% skelnými kulíčkami	V-PTS-CREAMID 11-BUM25	PTS	25,6	29,0 (13%)	29,9 (17%)	30,5 (19%)	31,0 (21%)	31,4 (23%)	31,9 (25%)	
PA 12	V-PTS-CREAMID-12-AMN 0 TLD	PTS	22,7**	29,6** (30%)	30,7** (35%)	32,2** (42%)	33,1** (46%)	33,6** (48%)	35,2** (55%)	

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.

* Hodnota vyjadřuje mez pevnosti při protažení 100%, ** Hodnota vyjadřuje mez pevnosti při protažení 200%



Obr. 20: Porovnání meze pevnosti pro polyamidy při 80°C

Zhodnocení naměřených výsledků

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je zřejmé, že již při nejmenší dávce ozáření mez pevnosti vzrůstá. Jak je patrné z tabulky č. 25 ze skupiny polyamidů dosáhl nejlepšího zlepšení z hlediska meze pevnosti při 80°C materiál **PA 12** od výrobce **PTS**. Z původní hodnoty 22,7 MPa neozářeného materiálu, vzrostla hodnota modulu pružnosti na 35,2 MPa při ozáření dávkou 198 kGy. Ozáření touto dávkou značí nárůst meze pevnosti o cca **55%**.

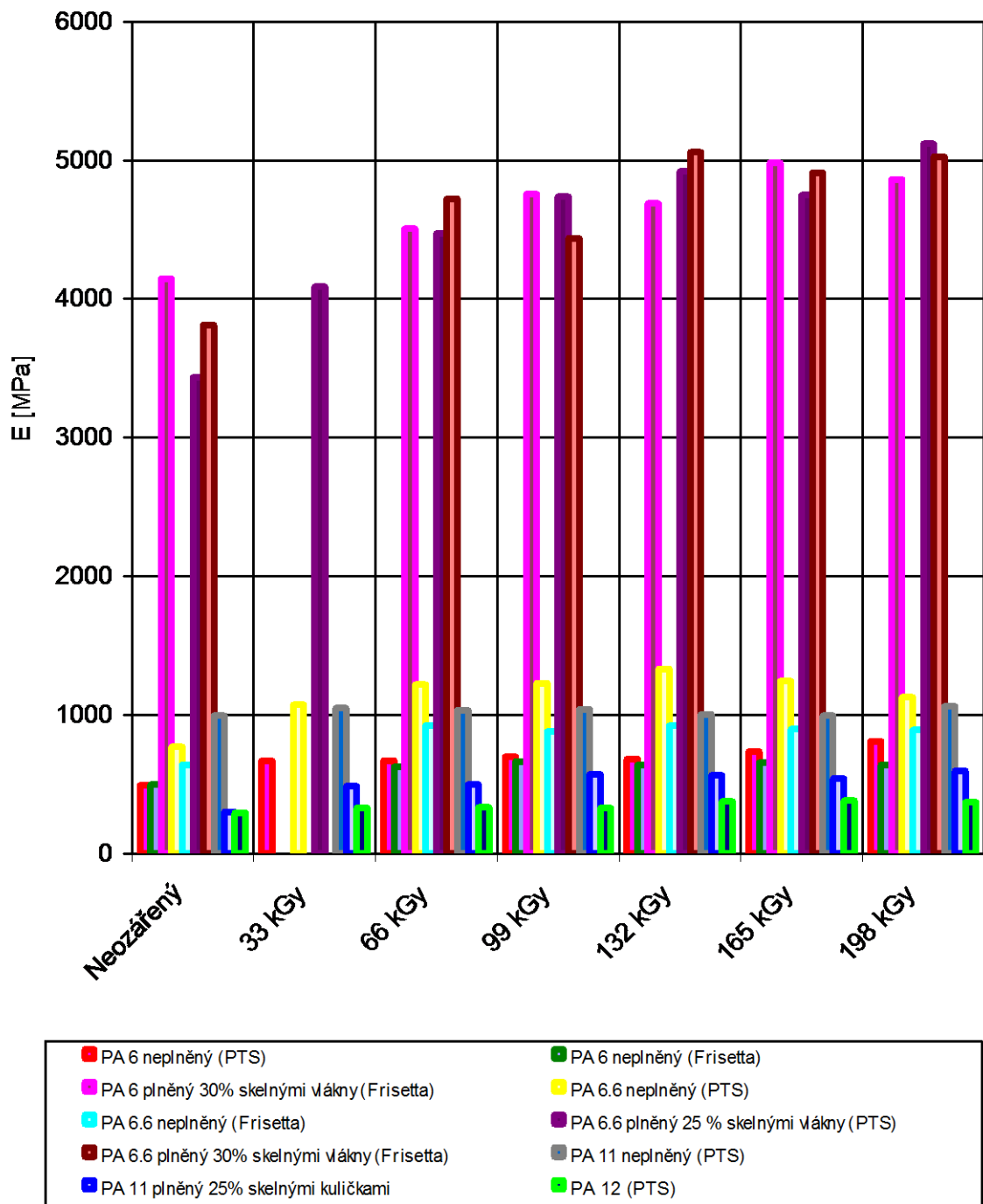
Z hlediska meze pevnosti při 80°C dosáhly ostatní polyamidy následujících hodnot:

- PA 6 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 33 % při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6.6 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 31% při dávce ozáření 132 kGy.
- PA 6.6 plněný 25% skelnými vlákny od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 26% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 11 plněný 25% skelnými kuličkami od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 25% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6.6 neplněný od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 20 % při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 18% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 12% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6 neplněný od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 7% při dávce ozáření 66 kGy.
- PA 11 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení 5% při dávce ozáření 99 kGy.

Tab. 26: Modul pružnosti při 80 °C

POLYAMIDY											
MODUL PRUŽNOSTI E [MPa] PŘI 80 °C											
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]						198		
			0	33	66	99	132	165			
PA 6 neplněný	V-PTS-CREAMID-B3H2	PTS	491	670 (34%)	672 (37%)	700 (43%)	683 (39%)	735 (50%)	811 (65%)	198	
PA 6 neplněný	PA 6 Frianyl B63 VN	Frisetta	498	-	627 (26%)	666 (34%)	638 (28%)	656 (32%)	641 (29%)		
PA 6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6 Frianyl B63 VN GV30	Frisetta	4147	-	4507 (9%)	4757 (15%)	4689 (13%)	4981 (20%)	4862 (17%)		
PA 6.6 neplněný	V-PTS-CREAMID-A3H2	PTS	770	1073 (39%)	1219 (58%)	1230 (60%)	1333 (73%)	1246 (62%)	1129 (47%)		
PA 6.6 neplněný	PA 6.6 Frianyl A63 VN	Frisetta	640	-	925 (45%)	881 (38%)	923 (44%)	898 (40%)	892 (39%)		
PA 6.6 plněný 25% skelnými vlákny	V-PTS-CREAMID A3H2G5FR	PTS	3432	4087 (19%)	4472 (30%)	4737 (38%)	4919 (43%)	4749 (38%)	5119 (49%)		
PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6.6 Frianyl A63 VN GV25	Frisetta	3812	-	4722 (24%)	4437 (16%)	5057 (33%)	4911 (29%)	5026 (32%)		
PA 11 neplněný	V-PTS-CREAMID-11T	PTS	995	1050 (6%)	1035 (4%)	1041 (5%)	1005 (1%)	994 (-1%)	1064 (7%)		
PA 11 plněný 25% skelnými kuličkami	V-PTS-CREAMID 11-BUM25	PTS	301	486 (61%)	500 (66%)	573 (90%)	567 (88%)	541 (80%)	596 (98%)		
PA 12	V-PTS-CREAMID-12-AMN 0 TLD	PTS	296	329 (11%)	333 (13%)	327 (10%)	376 (27%)	382 (29%)	372 (26%)		

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 21: Porovnání modulu pružnosti pro polyamidy při 80°C

Zhodnocení naměřených výsledků

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je zřejmé, že již při nejmenší dávce ozáření modul pružnosti vzrůstá. Jak je patrné z tabulky č. 26 ze skupiny polyamidů dosáhl nejlepšího zlepšení z hlediska modulu pružnosti při 80°C materiál **PA 11 plněný 25% skelnými ku-
ličkami** od výrobce **PTS**. Z původní hodnoty 301 MPa neozářeného materiálu, vzrostla hodnota modulu pružnosti na 596 MPa při ozáření dávkou 198 kGy. Ozáření touto dávkou značí nárůst modulu pružnosti o cca **98%**.

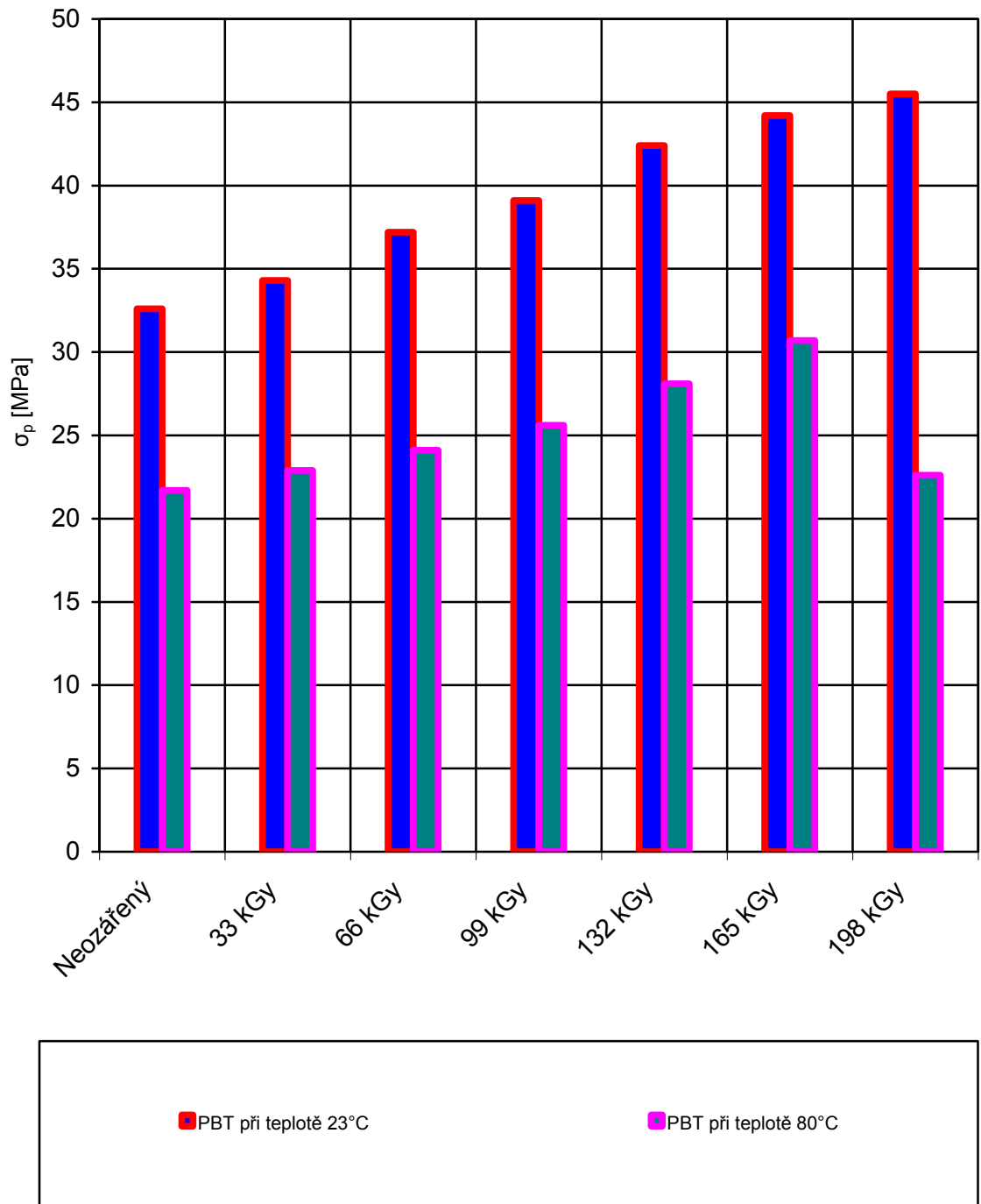
Z hlediska modulu pružnosti při 80°C dosáhly ostatní polyamidy následujících hodnot:

- PA 6.6 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 73% při dávce ozáření 132 kGy.
- PA 6 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 65% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6.6 plněný 25% skelnými vlákny od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 49% při dávce ozáření 198 kGy.
- PA 6.6 neplněný od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 45% při dávce ozáření 66 kGy.
- PA 6 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího o 34% při dávce ozáření 99 kGy.
- PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 33 % při dávce ozáření 132 kGy.
- PA 12 od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 29% při dávce ozáření 165 kGy.
- PA 6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 20% při dávce ozáření 165 kGy.
- PA 11 neplněný od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 7% při dávce ozáření 198 kGy.

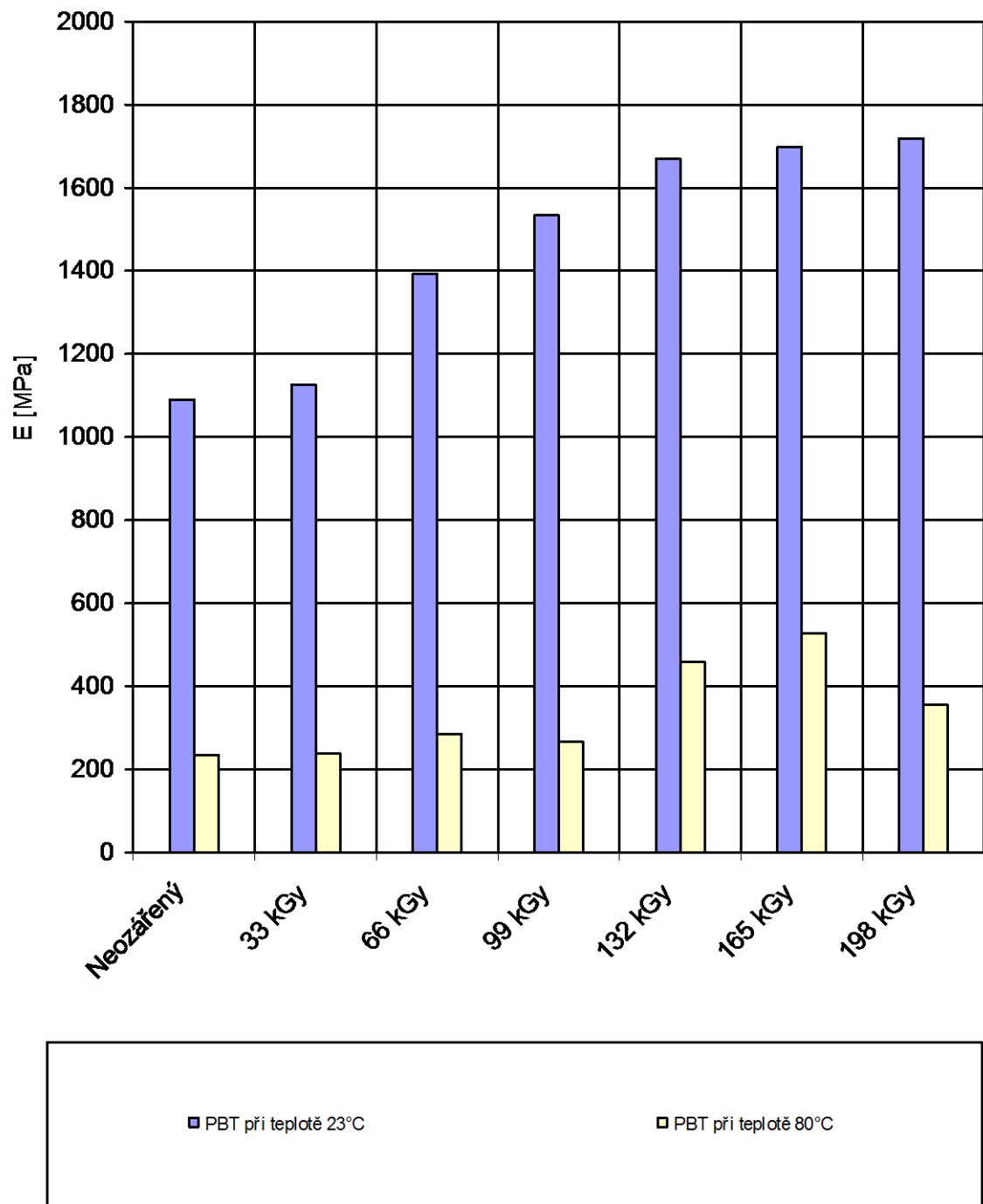
Tab. 27: Mez pevnosti a modul pružnosti PBT při teplotách 23°C a 80°C

POLYESTERY									
MEZ PEVNOSTI σ_p [MPa] PŘI 23°C									
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]						
			0	33	66	99	132	165	198
PBT	V-PTS-CREATEC-B3HZC	PTS	32,6	34,3 (5%)	37,2 (14%)	39,1 (20%)	42,4 (30%)	44,2 (36%)	45,5 (40%)
MODUL PRUŽNOSTI E [MPa] PŘI 23°C									
PBT	V-PTS-CREATEC-B3HZC	PTS	1090	1127 (3%)	1393 (28%)	1534 (41%)	1670 (53%)	1698 (56%)	1719 (58%)
MEZ PEVNOSTI σ_{300} [MPa] PŘI 80°C									
PBT	V-PTS-CREATEC-B3HZC	PTS	21,7	22,9 (6%)	24,1 (11%)	25,6 (18%)	28,1 (29%)	30,7 (42%)	22,6 (4%)
MODUL PRUŽNOSTI E [MPa] PŘI 80°C									
PBT	V-PTS-CREATEC-B3HZC	PTS	235	238 (1%)	285 (21%)	266 (13%)	459 (95%)	528 (125%)	355 (51%)

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 22: Porovnání meze pevnosti pro PBT při teplotách 23°C a 80°C



Obr. 23: Porovnání modulu pružnosti pro PBT při teplotách 23°C a 80°C

Zhodnocení naměřených výsledků

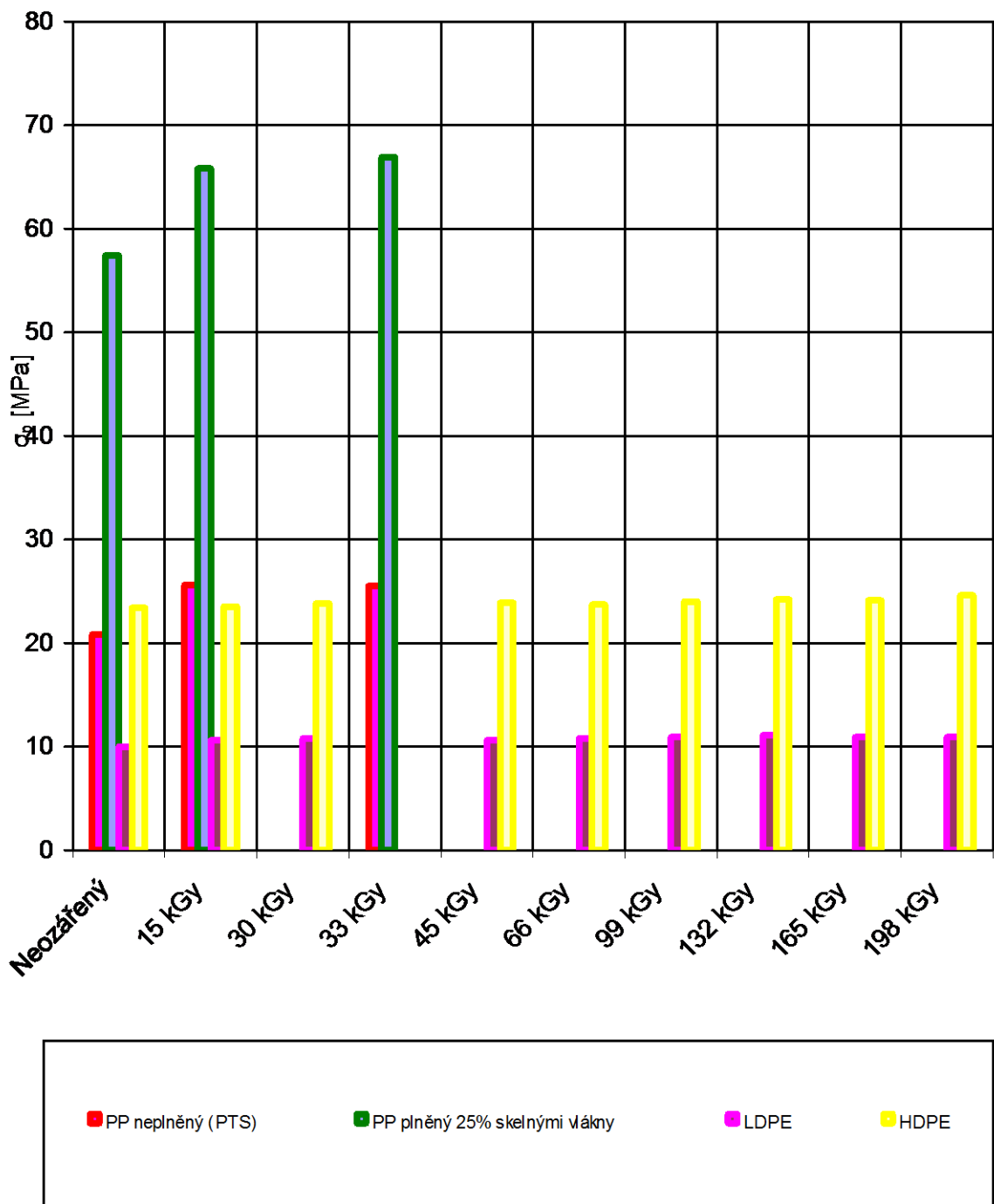
Při porovnání výsledků naměřených hodnot při 23°C je zřejmé, že mez pevnosti narůstá s dávkou ozáření. Z původní hodnoty 32,6 MPa neozářeného materiálu, nejvíce vzrostla mez pevnosti při dávce ozáření 198 kGy na 45,5 MPa, což je zlepšení meze pevnosti o 40%. Zároveň došlo ke zvýšení modulu pružnosti z hodnoty 1090 MPa neozářovaného materiálu na hodnotu 1719 MPa ozářeného dávkou 198 kGy, z měření vyplývá zlepšení modulu pružnosti o 58%.

Porovnáním naměřených výsledků při 80°C je patrné, že mez pevnosti se zvýšila z hodnoty 21,7 MPa neozářeného materiálu na nejvyšší hodnotu 30,7 MPa při dávce ozáření 165 kGy. Z čehož vyplývá zlepšení meze pevnosti o 42%. Taktéž došlo ke zvýšení modulu pružnosti z původní hodnoty 235 MPa neozářovaného materiálu na hodnotu 528 MPa ozářeného dávkou 165 kGy, z měření vyplývá nárůst zlepšení modulu pružnosti o 125%.

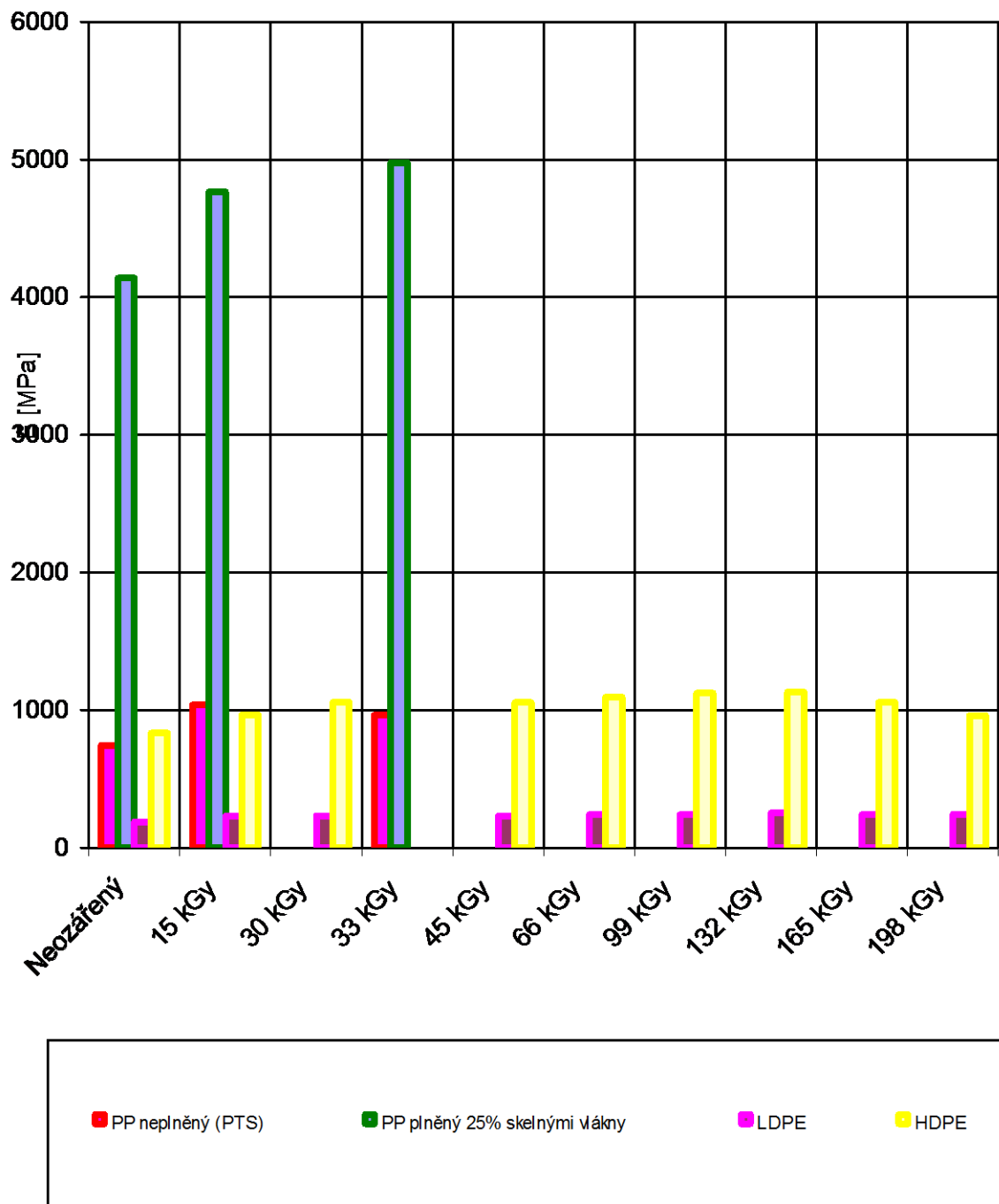
Tab. 28: Mez pevnosti a modul pružnosti při 23°C

POLYOLEFÍNY														
MEZ PEVNOSTI σ_p [MPa] PŘI 23°C														
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]											
			0	15	30	33	45	66	99	132	165	198		
PP neplněný	PTS-Crealen EP-2300L1-M800	PTS	20,8	25,6 (23%)	-	25,5 (23%)								
PP plněný 25% skelnými vlákny	PTS-Crealen EP8G5HS*M0083	PTS	57,4	65,8 (15%)	-	66,9 (17%)								
LDPE	DOW LDPE 780 E	Dow Chemical Company	10,0	10,6 (6%)	10,8 (8%)	-	10,6 (6%)	10,8 (8%)	10,9 (9%)	10,9 (9%)	11,1 (11%)	10,9 (9%)	10,9 (9%)	10,9 (9%)
HDPE	DOW HDPE 25055 E	Dow Chemical Company	23,4	23,5 (0%)	23,8 (2%)	-	23,9 (2%)	23,7 (1%)	24,0 (3%)	24,2 (3%)	24,1 (3%)	24,6 (5%)		
MODUL PRUŽNOSTI E [MPa] PŘI 23°C														
PP neplněný	PTS-Crealen EP-2300L1-M800	PTS	746	1038 (39%)	-	965 (29%)								
PP plněný 25% skelnými vlákny	PTS-Crealen EP8G5HS*M0083	PTS	4140	4765 (15%)	-	4978 (20%)								
LDPE	DOW LDPE 780 E	Dow Chemical Company	190	232 (22%)	232 (22%)	-	233 (23%)	241 (27%)	243 (28%)	256 (35%)	242 (27%)	245 (29%)		
HDPE	DOW HDPE 25055 E	Dow Chemical Company	833	968 (16%)	1058 (27%)	-	1056 (27%)	1095 (32%)	1124 (35%)	1132 (36%)	1057 (27%)	962 (16%)		

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 24: Porovnání meze pevnosti pro polyolefiny při teplotě 23°C



Obr. 25: Porovnání modulu pružnosti pro polyolefiny při teplotě 23°C

Zhodnocení výsledků

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je zřejmé, že již při nejmenší dávce ozáření materiálu mez pevnosti vzrůstá. Jak je patrné z tabulky č. 28 ze skupiny polyolefinů dosáhl nejlepšího zlepšení z hlediska meze pevnosti při 23°C materiál **PP neplněný** od výrobce **PTS** z původní hodnoty 20,8 MPa neozářeného materiálu vzrostla hodnota meze pevnosti na 25,6 MPa při ozáření dávkou 15 kGy. Ozáření touto dávkou značí nárůst zlepšení o **23%**.

Z hlediska meze pevnosti při 23°C dosáhly ostatní polyolefiny následujících hodnot:

- PP plněný 25 skelnými vlákny od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 17% při dávce ozáření 33 kGy.
- LDPE od výrobce Dow Chemical Company dosáhl největšího zlepšení o 11% při dávce ozáření 132 kGy
- HDPE od výrobce Dow Chemical Company dosáhl největšího zlepšení o 5 % při dávce ozáření 198 kGy.

Taktéž u modulu pružnosti došlo ke zlepšení materiálu již při nejmenší dávce ozáření. Nevyšší hodnoty modulu pružnosti při 23°C dosáhl **PP neplněný** od výrobce **PTS** z původní hodnoty 746 MPa neozářeného materiálu, vzrostla hodnota na 4978 MPa ozářeného dávkou 15 kGy. Toto zlepšení značí nárůst modulu pružnosti o **39%**.

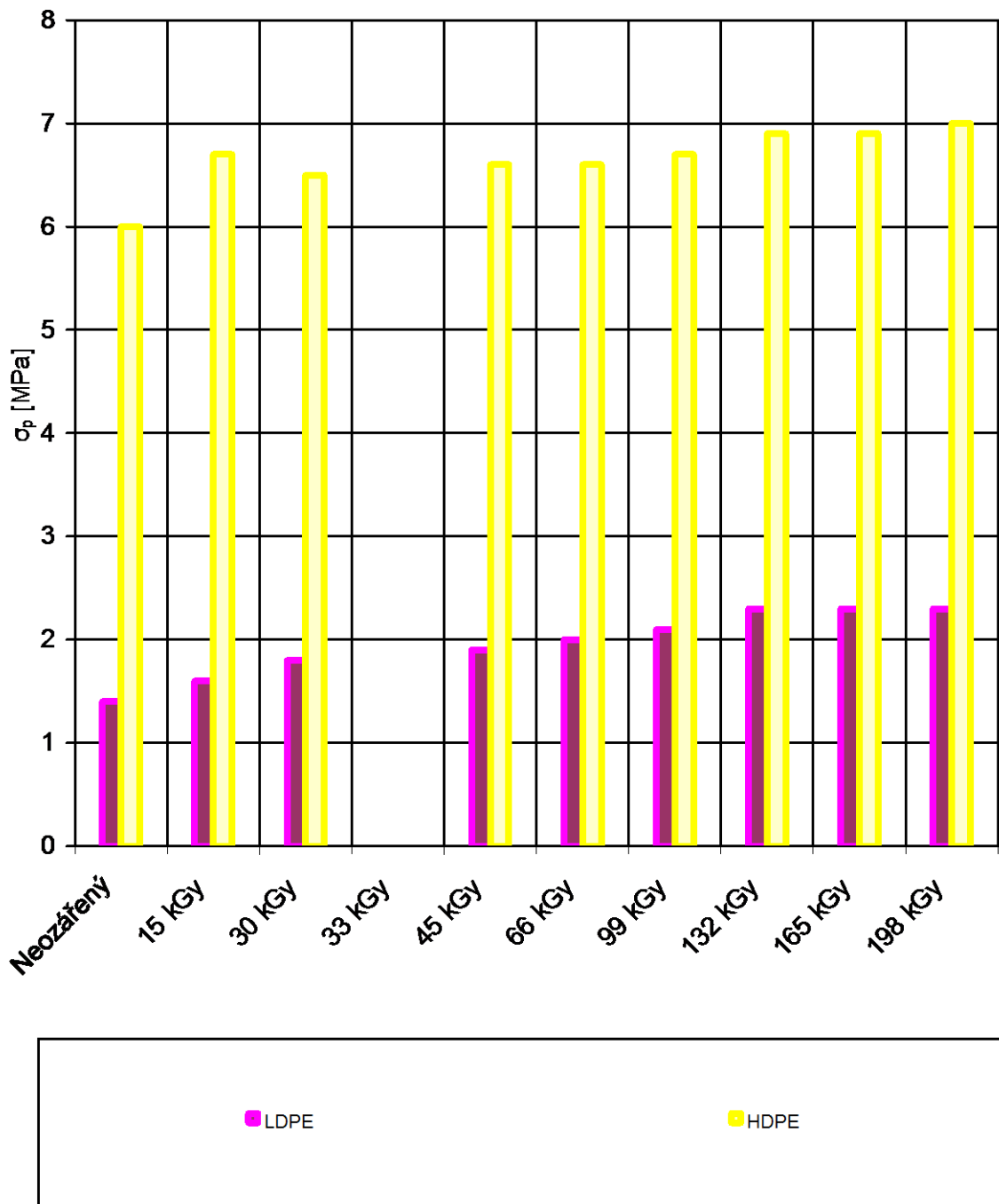
Z hlediska modulu pružnosti při 23°C dosáhly ostatní polyolefiny následujících hodnot:

- PP plněný 25% skelnými vlákny od výrobce PTS dosáhl největšího zlepšení o 20% při dávce ozáření 33 kGy.
- LDPE od výrobce Dow Chemical Company dosáhl největšího zlepšení o 35% při dávce ozáření 132 kGy.
- HDPE od výrobce Dow Chemical Company dosáhl největšího zlepšení o 36 % při dávce ozáření 132 kGy.

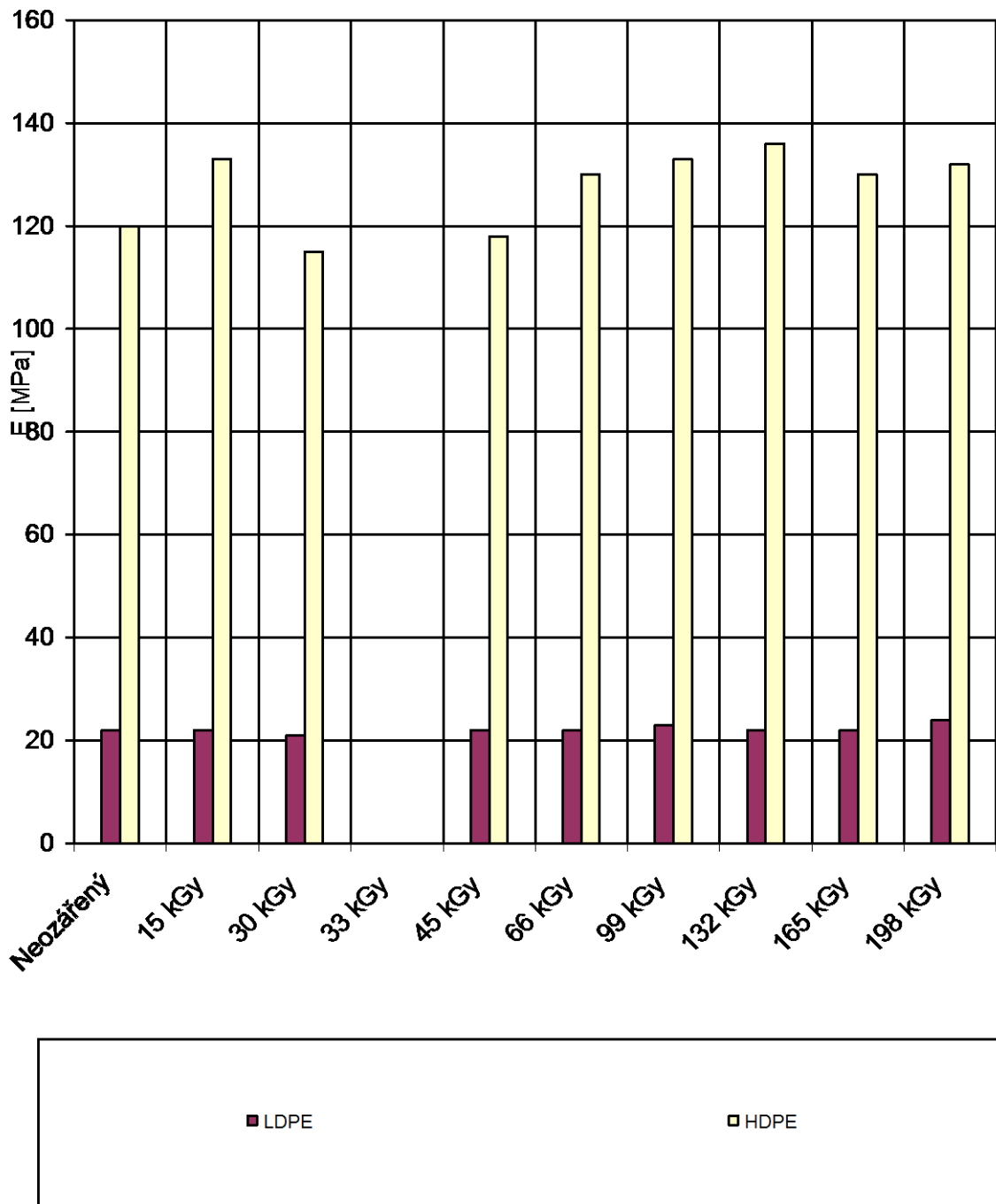
Tab. 29: Mez pevnosti a modul pružnosti při 100°C

POLYOLEFÍNY												
MEZ PEVNOSTI σ_p [MPa] PŘI 100°C												
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]									
			0	15	30	33	45	66	99	132	165	198
LDPE	DOW LDPE 780E	Dow Chemical Company	1,4	1,6 (14%)	1,8 (29%)	-	1,9 (36%)	2,0 (43%)	2,1 (50%)	2,3 (64%)	2,3 (64%)	2,3 (64%)
HDPE	DOW HDPE 25055E	Dow Chemical Company	6,0	6,7 (12%)	6,5 (8%)	-	6,6 (10%)	6,6 (10%)	6,7 (12%)	6,9 (15%)	6,9 (15%)	7,0 (17%)
MODUL PRUŽNOSTI E [MPa] PŘI 100°C												
LDPE	DOW LDPE 780E	Dow Chemical Company	22	22 (0%)	21 (-5%)	-	22 (0%)	22 (0%)	23 (5%)	22 (0%)	22 (0%)	24 (9%)
HDPE	DOW HDPE 25055E	Dow Chemical Company	120	133 (11%)	115 (4%)	-	118 (2%)	130 (8%)	133 (8%)	136 (13%)	130 (8%)	132 (10%)

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 26: Porovnání meze pevnosti pro LDPE a HDPE při teplotě 100°C



Obr. 27: Porovnání modulu pružnosti pro LDPE a HDPE při teplotě 100°C

Zhodnocení výsledků

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je patrné, že již při nejnižším ozáření materiálu mez pevnosti vzrůstá. Vyššího nárůstu meze pevnosti při 100°C dosáhl materiál LDPE od výrobce Dow Chemical Company. Z původní hodnoty 1,4 MPa neozářeného materiálu vzrostla hodnota meze pevnosti na 2,3 MPa, při ozáření dávkou 132, 165 a 198 kGy. Ozáření těmito dávkami značí nárůst meze pevnosti o 64%. Materiál HDPE od výrobce Dow Chemical Company dosáhl největšího zlepšení o 17% ozářením dávkou 198 kGy.

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je zřejmé, že vyššího zlepšení modulu pružnosti při 100°C dosáhl materiál HDPE od výrobce Dow Chemical Company. Z hodnoty 120 MPa neozářeného materiálu vzrostla hodnota modulu pružnosti na 136 MPa při dávce ozáření 132 kGy, což udává zlepšení modulu pružnosti materiálu o 13%. Materiál LDPE od výrobce Dow Chemical Company dosáhl největšího zlepšení o 9% ozářením dávkou 198 kGy.

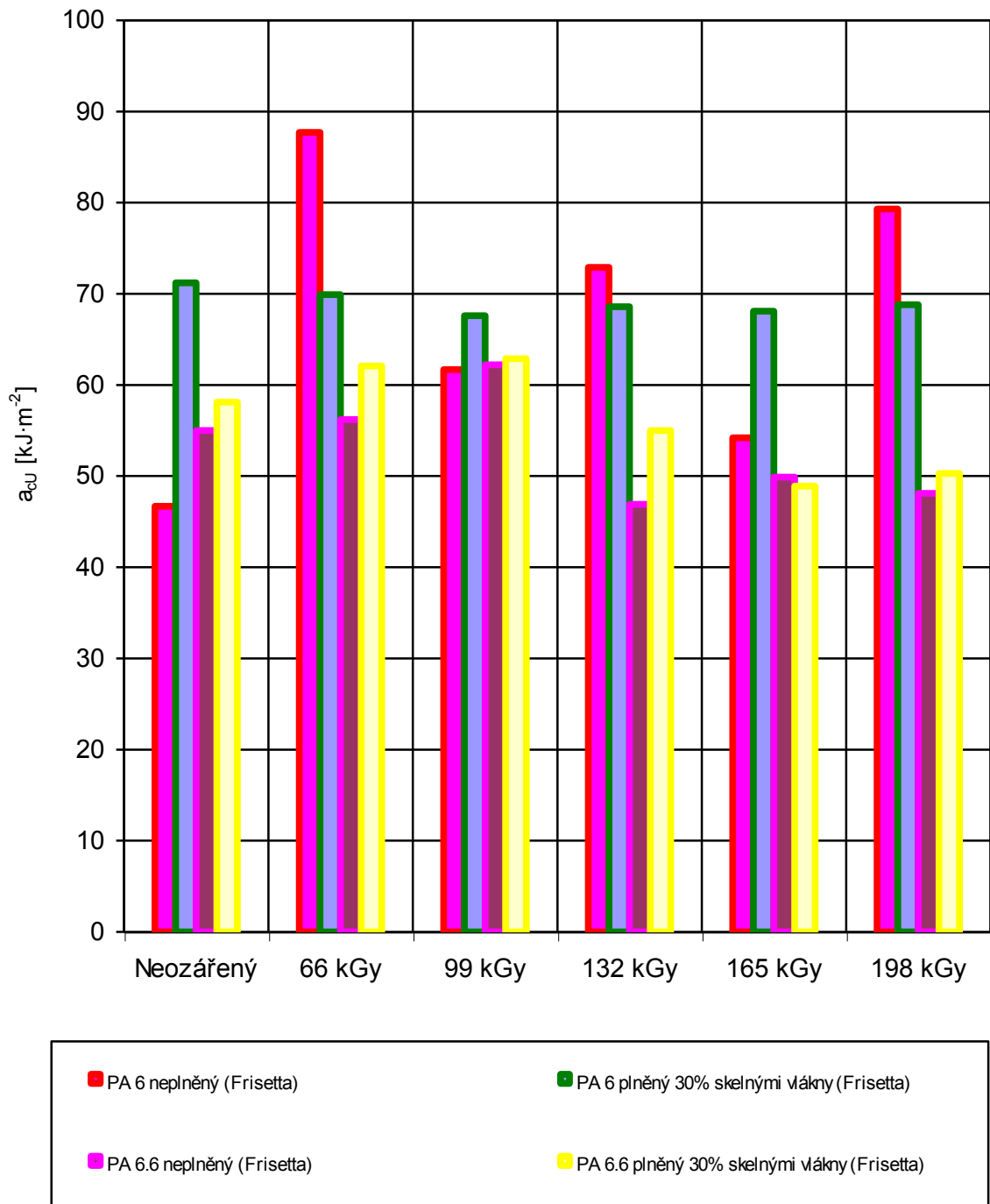
10 ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI

Zkouška rázové houževnatosti byla provedena na stroji ZWICK ROELL B5113. Pro zkoušky byla použita zkušební tělíska z materiálu PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 30% skelných vláken) od výrobce Frisetta a PP (neplněný a plněný 25% skelných vláken) od výrobce PTS. Zkoušky se prováděly při teplotě 23°C a za snížené teploty - 15°C pro polyamidy a -35°C pro polypropyleny. Pro jednotlivé materiály a dávky ozáření bylo provedeno 10 měření, z nichž byla stanovena průměrná hodnota.

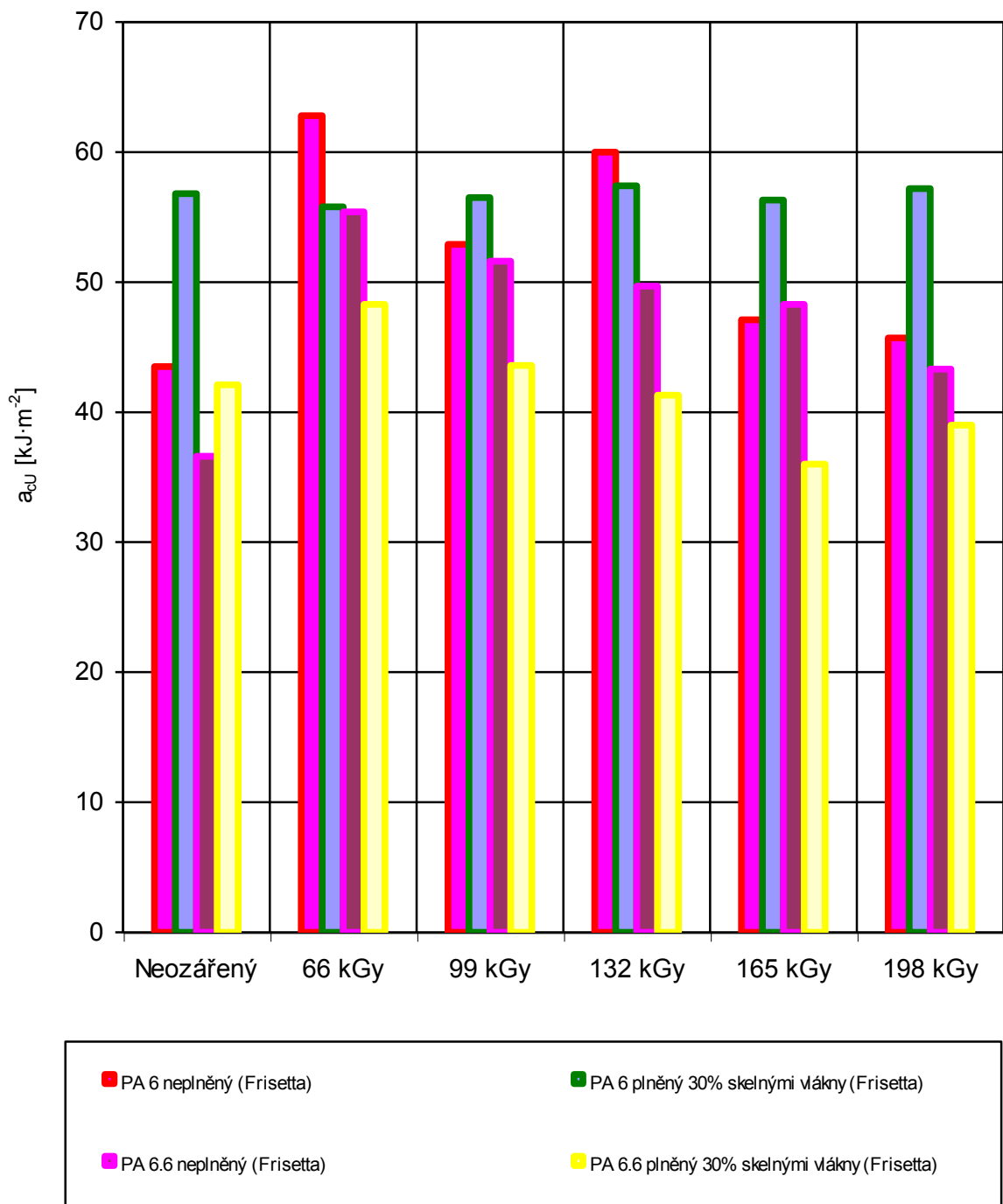
Tab. 30: Rázová houževnatost a_{cU} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] při teplotě 23°C a -15°C

POLYAMIDY									
RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST a_{cU} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] PŘI 23°C									
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]						
			0	66	99	132	165	198	
PA 6 neplněný	PA 6 Frianyl B63 VN	Frisetta	49,7	87,7 (77%)	61,7 (24%)	79,2 (59%)	54,2 (9%)	79,3 (60%)	
PA 6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6 Frianyl B63 VN GV30	Frisetta	71,2	69,9 (-2%)	67,6 (-5%)	68,6 (-4%)	68,1 (-4%)	68,8 (-3%)	
PA 6.6 neplněný	PA 6.6 Frianyl A63 VN	Frisetta	55,0	56,2 (2%)	62,2 (13%)	46,9 (-15%)	50,0 (-9%)	48,1 (-13%)	
PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6.6 Frianyl A63 VN GV25	Frisetta	58,1	62,1 (7%)	62,9 (8%)	55,0 (-5%)	48,9 (-16%)	50,3 (-14%)	
RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST a_{cU} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] PŘI -15°C									
PA 6 neplněný	PA 6 Frianyl B63 VN	Frisetta	43,5	62,8 (44%)	52,9 (22%)	60,0 (38%)	47,1 (8%)	45,7 (5%)	
PA 6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6 Frianyl B63 VN GV30	Frisetta	56,8	55,8 (-2%)	56,5 (-1%)	57,4 (1%)	56,3 (-1%)	57,2 (1%)	
PA 6.6 neplněný	PA 6.6 Frianyl A63 VN	Frisetta	36,6	55,4 (51%)	51,6 (41%)	49,7 (36%)	48,3 (32%)	43,3 (18%)	
PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny	PA 6.6 Frianyl A63 VN GV25	Frisetta	42,1	48,3 (15%)	43,6 (4%)	41,3 (-2%)	36,0 (-15%)	39,0 (-7%)	

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 28: Porovnání rázové houževnatosti pro polyamidy při teplotě 23°C



Obr. 29: Porovnání rázové houževnatosti pro polyamidy při teplotě -15°C

Zhodnocení výsledků

Porovnáním výsledků naměřených zkoušek rázové houževnatosti při teplotě 23°C dosáhl největšího vzrůstu rázové houževnatosti materiál PA 6 neplněný od výrobce Frisetta. Jak je patrné z tabulky č. 25 z hodnoty 49,7 kJ·m⁻² neozářeného materiálu vzrostla rázová houževnatost na 87,7 kJ·m⁻² při ozáření dávkou 66 kGy což je zlepšení o 77%.

Z hlediska rázové houževnatosti při 23°C dosáhly ostatní polyamidy následujících hodnot:

- PA 6.6 neplněný od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 13% při dávce ozáření 99 kGy. Při vyšším ozáření se rázová houževnatost snižuje až pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu.
- PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 8% při dávce ozáření 99 kGy. Při vyšším ozáření se rázová houževnatost snižuje až pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu.
- PA 6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta již při nejmenším ozáření rázová houževnatost klesá pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu.

Porovnáním výsledků naměřených hodnot při teplotě -15°C největšího zlepšení rázové houževnatosti zaznamenal materiál PA 6.6 neplněný od výrobce Frisetta. Z původní neozářované hodnoty 43,5 kJ·m⁻² dosáhl hodnoty 55,4 kJ·m⁻², z čehož vyplývá zlepšení rázové houževnatosti o 51%.

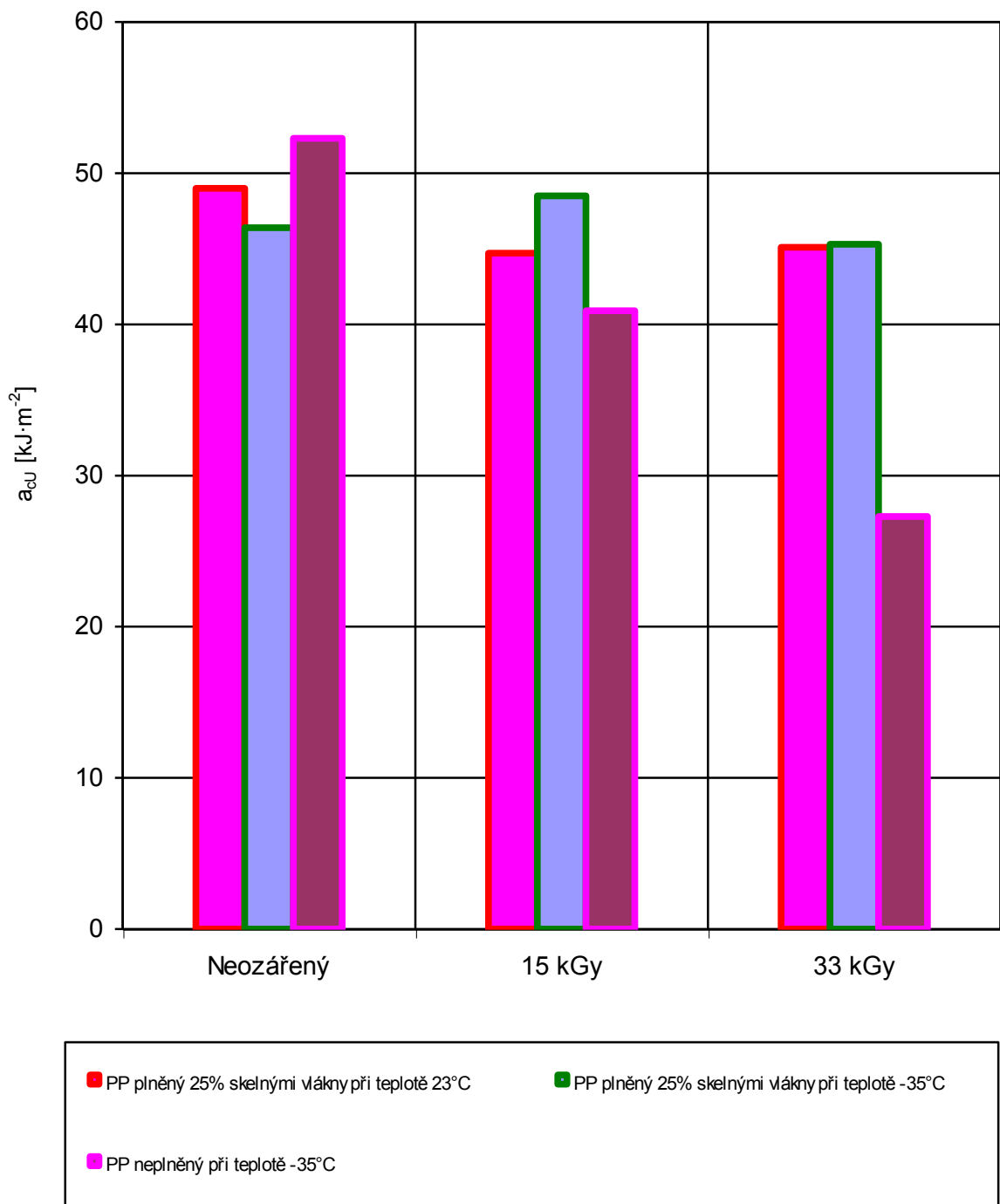
Z hlediska rázové houževnatosti při - 15°C dosáhly ostatní polyamidy následujících hodnot:

- PA 6 neplněný od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 44% při dávce ozáření 66 kGy.
- PA 6.6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta dosáhl největšího zlepšení o 15% při dávce ozáření 66 kGy. Při vyšším ozáření se rázová houževnatost snižuje až pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu.
- PA 6 plněný 30% skelnými vlákny od výrobce Frisetta se ozářením rázová houževnatost téměř nemění.

Tab. 31: Rázová houževnatost a_{cU} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] při teplotě 23°C a -35°C

POLYOLEFÍNY				
RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST a_{cU} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] PŘI 23°C				
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]	
			0	15
PP neplněný	PTS-Crealen EP-2300L1-M800	PTS	Vzorek nebyl přeražen	
PP plněný 25% skelnými vlákny	PTS-Crealen EP8G5HS*M0083	PTS	49,0	45,1 (-8%)
RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST a_{cU} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] PŘI -35°C				
PP neplněný	PTS-Crealen EP-2300L1-M800	PTS	52,3	27,3 (-48%)
PP plněný 25% skelnými vlákny	PTS-Crealen EP8G5HS*M0083	PTS	46,4	45,3 (-2%)

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 30: Porovnání rázové houževnatosti pro polypropyleny při teplotách 23°C a -35°C

Zhodnocení výsledků

Porovnáním výsledků naměřených hodnot při teplotě 23°C nedochází u všech neplněných PP od výrobce PTS k přeražení zkušebních vzorků. Ozářením PP plněného 25% skelnými vlákny dochází ke snížení rázové houževnatosti pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu. Hodnota dávky ozáření zde nerozhoduje.

Porovnáním výsledků naměřených hodnot při teplotě -35°C dochází u všech neplněných i plněných PP od výrobce PTS k přeražení zkušebních vzorků. Ozářením PP neplněného dochází ke snížení rázové houževnatosti pod hodnotu výchozího neozářeného materiálu. Ozářením dávkou 15 kGy PP 25% skelnými vlákny dochází ke zvýšení rázové houževnatosti o 5%, dalším ozářením se hodnota snižuje.

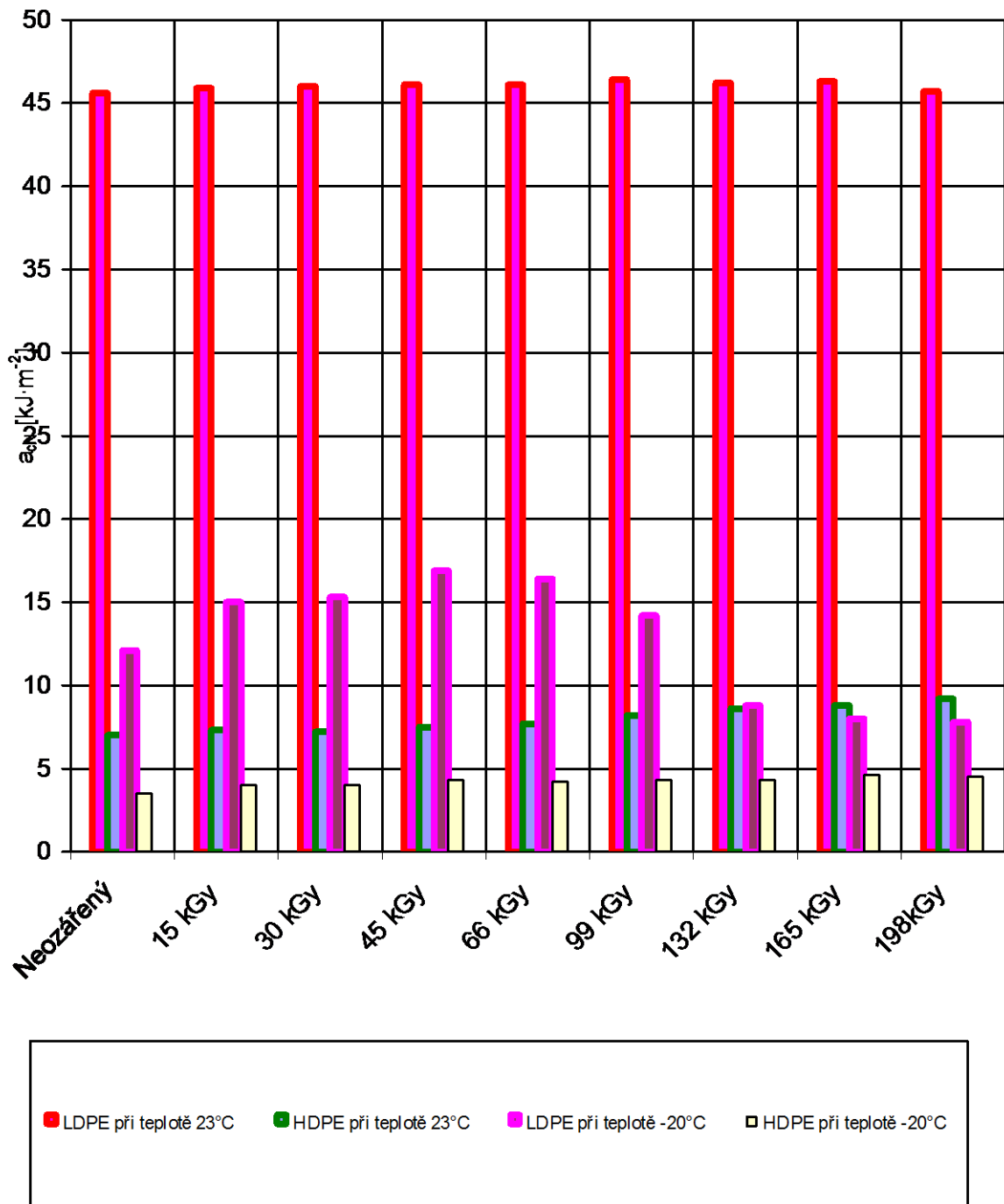
11 VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST

Zkouška vrubové houževnatosti byla provedena na stroji CAEST Resil Impactor Junior. Pro zkoušky byly použity zkušební tělíska z materiálu LDPE a HDPE od výrobce Dow Chemical Company. Zkoušky se prováděly při teplotě 23°C a za snížené teploty -20°C. Pro jednotlivé materiály a dávky ozáření bylo provedeno 10 měření, z nichž byla stanovena průměrná hodnota.

Tab. 32: Vrubová houževnatost a_{cN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] při teplotě 23°C a -20°C

POLYOLEFÍNY											
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST a_{cN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] PŘI 23°C											
Typ	Název	Výrobce	Dávka intenzity záření (DOSIS) [kGy]								
			0	15	30	45	66	99	132	165	198
LDPE	DOW LDPE 780 E	Dow Chemical Company	45,6	45,9 (1%)	46,0 (1%)	46,1 (1%)	46,1 (1%)	46,4 (2%)	46,2 (1%)	46,3 (2%)	45,7 (0%)
HDPE	DOW HDPE 25055 E	Dow Chemical Company	7,0	7,3 (4%)	7,2 (3%)	7,5 (7%)	7,7 (10%)	8,2 (17%)	8,6 (23%)	8,8 (26%)	9,2 (31%)
VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST a_{cN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] PŘI -20°C											
LDPE	DOW LDPE 780 E	Dow Chemical Company	12,1	15,0 (24%)	15,3 (26%)	16,9 (40%)	16,4 (36%)	14,2 (17%)	8,8 (-27%)	8 (-34%)	7,8 (-36%)
HDPE	DOW HDPE 25055 E	Dow Chemical Company	35,0	4,0 (14%)	4,0 (14%)	4,3 (23%)	4,2 (20%)	4,3 (23%)	4,3 (23%)	4,6 (31%)	4,5 (29%)

Hodnoty v závorce vyjadřují % zlepšení oproti referenčnímu materiálu tj. neozařovaného.



Obr. 31: Porovnání vrubové houževnatosti pro LDPE a HDPE při teplotách 23°C a -20°C

Zhodnocení výsledků:

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je patrné, že nejvyššího nárůstu vrubové houževnatosti při 23°C dosáhl materiál HDPE od výrobce Dow Chemical Company. Z původní hodnoty 7 kJ·m⁻² neozařovaného materiálu vzrostla hodnota vrubové houževnatosti na 9,2 kJ·m⁻², při ozáření dávkou 198 kGy. Ozáření touto dávkou značí nárůst zlepšení vrubové houževnatosti o 31%. U materiálu LDPE od výrobce Dow Chemical Company se vrubová houževnatost ozářením téměř nemění.

Porovnáním výsledků naměřených hodnot je zřejmé, že vyššího zlepšení vrubové houževnatosti při -20°C dosáhl materiál LDPE od výrobce Dow Chemical Company. Z hodnoty 12,1 kJ·m⁻² neozařovaného materiálu vzrostla hodnota vrubové houževnatosti na 16,9 kJ·m⁻² při dávce ozáření 45 kGy, což udává zlepšení vrubové houževnatosti o 40%. Materiál HDPE od výrobce Dow Chemical Company dosáhl největšího zlepšení o 31% ozářením dávkou 165 kGy.

ZÁVĚR

Náplní této bakalářské práce bylo zhotovit matici změn mechanických vlastností polymerních materiálů, které byly ozářeny elektronovým beta zářením. Zkoumané materiály byly PBT, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken), PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček), PA 12 od výrobce PTS, PA 6 a PA 6.6 (neplněný a plněný 30% skelných vláken) od výrobce Frisetta, LDPE, HDPE od výrobce Dow Chemical Company. Zkušební tělíska byly zpracované na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420C. Zkušební tělíska z PP (neplněného a plněného 25% skelných vláken) od výrobce PTS byly zpracované na vstřikovacím stroji DEMAG Ergotech 50 – 200 system. Zkušební tělíska byla vystavena dávkám elektronového záření, energií 10MeV. Ozářené i neozářené tělíska byly podrobeny tahovým zkouškám. Zkouška tahem byla prováděna při normální teplotě, tj. 23°C a za zvýšené teploty při 80°C. Materiál LDPE a HDPE byl testován při teplotě 100°C. Vybrané materiály byly podrobeny zkouškám vrubové houževnatosti a zkouškám rázové houževnatosti.

Vyhodnocování výsledků spočívalo v porovnávání meze pevnosti, modulu pružnosti, rázové a vrubové houževnatosti mezi neozářovaným a ozařovaným materiálem vybranými dávkami ozáření.

Jak je patrné z výsledků, radiační sít'ování zlepšuje zkoumané vlastnosti materiálu. Pro každou shledávanou aplikaci je však nutné stanovit optimální dávku ozáření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Švorčík, V., Polymery, Fakulta: VŠCHT [online]. [cit. 2011-02-24] Dostupný z WWW: <http://vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>
- [2] Vaculík, J., Diplomová práce – Vlastnosti radiačně síťovaných polymeru. Zlín UTB 2010. 123 s.
- [3] SOVA, M., KREBS, J. a kolektiv. Termoplasty v praxi, Praha: ONTL, 2001. ISBN 80-86229-15-7
- [4] MÉZL, M., Plastikářem snadno a rychle – Technologie vstřikování plastů, 2005
- [5] Adámek, R., Diplomová práce – Vliv záření na vlastnosti vybraných plastů. Zlín UTB 2008. 135 s.
- [6] MEISSNER, B., ZILVAR, V., Fyzika polymerů – Struktura a vlastnosti polymerních materiálů 1.vyd. Praha: SNTL. 1987.
- [7] Macourek, J., Diplomová práce – Vliv ozáření na mechanické a termomechanické vlastnosti LDPE a HDPE. Zlín UTB 2009. 122 s.
- [8] LPM Technické díly. [online]. [cit. 2011-07-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.lpm.cz>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PA	polyamid
PA 6	polyamid 6
PA 6.6	polyamid 6.6
PA 11	polyamid 11
PA 12	polyamid 12
PP	polypropylen
PBT	polybutylen tereftalát
LDPE	nízkohustotní polyetylen
HDPE	vysokohustotní polyetylen
E	modul pružnosti [MPa]
σ_p	mez pevnosti materiálu v tahu [MPa]
a_{cU}	rázová houževnatost Charpy [$J \cdot cm^{-2}$]
a_{cN}	vrubová houževnatost Charpy [$J \cdot cm^{-2}$]
σ_{100}	napětí při protažení 100% [MPa]
σ_{200}	napětí při protažení 200% [MPa]
σ_{300}	napětí při protažení 300% [MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [1].....</i>	13
<i>Obr. 2: Schéma rozdělení přírodních a syntetických polymerů [3].....</i>	14
<i>Obr. 3: Druhy a rozdělení plastů dle zpracovaných objemů [4].....</i>	16
<i>Obr. 4: Tvar makromolekulárních řetězců [7].....</i>	17
<i>Obr. 5: Záření alfa [5]</i>	21
<i>Obr. 6: Záření beta [5]</i>	22
<i>Obr. 7: Záření gama [5].....</i>	22
<i>Obr. 8: Schéma pronikání gama a beta záření do materiálu [7]</i>	23
<i>Obr. 9: Schéma radiačního síťování elektronovým zářením [2]</i>	25
<i>Obr. 10: Některé vlastnosti plastů v závislosti na dávce ozáření [2]</i>	28
<i>Obr. 11: Zkušební těleso pro zkoušku tahem [2]</i>	31
<i>Obr. 12: Pracovní diagram tahové zkoušky [2].....</i>	32
<i>Obr. 14: Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder C420 [8].....</i>	36
<i>Obr. 15: Vstřikovací stroj DEMAG Ergotech 50 – 200 system</i>	38
<i>Obr. 16: Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456</i>	39
<i>Obr. 17: Charpyho kladivo ZWICK ROELL B5113</i>	40
<i>Obr. 18: Zkušební stroj CAEST Resil Impactor Junior</i>	41
<i>Obr. 19: Porovnání meze pevnosti pro polyamidy při 23°C</i>	54
<i>Obr. 20: Porovnání modulu pružnosti pro polyamidy při 23°C.....</i>	57
<i>Obr. 21: Porovnání meze pevnosti pro polyamidy při 80°C</i>	60
<i>Obr. 22: Porovnání modulu pružnosti pro polyamidy při 80°C.....</i>	63
<i>Obr. 23: Porovnání meze pevnosti pro PBT při teplotách 23°C a 80°C</i>	66
<i>Obr. 24: Porovnání modulu pružnosti pro PBT při teplotách 23°C a 80°C.....</i>	67
<i>Obr. 25: Porovnání meze pevnosti pro polyolefiny při teplotě 23°C.....</i>	70
<i>Obr. 26: Porovnání modulu pružnosti pro polyolefiny při teplotě 23°C</i>	71
<i>Obr. 27: Porovnání meze pevnosti pro LDPE a HDPE při teplotě 100°C</i>	74
<i>Obr. 28: Porovnání modulu pružnosti pro LDPE a HDPE při teplotě 100°C.....</i>	75
<i>Obr. 29: Porovnání rázové houževnatosti pro polyamidy při teplotě 23°C.....</i>	79
<i>Obr. 30: Porovnání rázové houževnatosti pro polyamidy při teplotě -15°C.....</i>	80

<i>Obr. 31: Porovnání rázové houževnatosti pro polypropyleny při teplotách 23°C a – 35°C.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 32: Porovnání vrubové houževnatosti pro LDPE a HDPE při teplotách 23°C a –20°C.....</i>	<i>87</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Radiačně síťované polymery [2]</i>	27
<i>Tab. 2: Technické parametry vstřikovacího stroje Arburg</i>	37
<i>Tab. 3: Technické parametry vstřikovacího stroje Demag</i>	38
<i>Tab. 4: Technické parametry zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456</i>	39
<i>Tab. 5: Technické parametry Charpyho kladiva ZWICK ROELL B5113</i>	40
<i>Tab. 6: Technické parametry zkušebního stroje CEAST Resil Impactor Junior</i>	41
<i>Tab. 7: Vybrané vlastnosti polymeru PBT</i>	42
<i>Tab. 8: Vybrané vlastnosti polymeru PA 6</i>	43
<i>Tab. 9: Vybrané vlastnosti polymeru PA 6 (neplněný a plněný 25% sk. vláken)</i>	43
<i>Tab. 10: Vybrané vlastnosti polymeru PA 12</i>	44
<i>Tab. 11: Vybrané vlastnosti polymeru HDPE</i>	45
<i>Tab. 12: Vybrané vlastnosti polymeru LDPE</i>	45
<i>Tab. 13: Vybrané vlastnosti polymeru PP</i>	46
<i>Tab. 14: Přehled polyamidů</i>	47
<i>Tab. 15: Parametry nastavení vstřikovacího stroje pro materiál PTS</i>	48
<i>Tab. 16: Parametry nastavení vstřikovacího stroje pro materiál Frisetta</i>	48
<i>Tab. 17: Přehled polyetylenů</i>	49
<i>Tab. 18: Parametry nastavení vstřikovacího stroje</i>	49
<i>Tab. 19: Přehled polyesteru</i>	49
<i>Tab. 20: Parametry nastavení vstřikovacího stroje</i>	50
<i>Tab. 21: Přehled polypropylenů</i>	50
<i>Tab. 22: Parametry nastavení vstřikovacího stroje</i>	51
<i>Tab. 23: Mez pevnosti při 23°C</i>	53
<i>Tab. 24: Modul pružnosti při 23°C</i>	56
<i>Tab. 25: Mez pevnosti při 80°C</i>	59
<i>Tab. 26: Modul pružnosti při 80°C</i>	62
<i>Tab. 27: Mez pevnosti a modul pružnosti PBT při teplotách 23°C a 80°C</i>	65
<i>Tab. 28: Mez pevnosti a modul pružnosti při 23°C</i>	69
<i>Tab. 29: Mez pevnosti a modul pružnosti při 100°C</i>	73
<i>Tab. 30: Rázová houževnatost a_{cU} [kJ·m⁻²] při teplotě 23°C a -15°C</i>	78
<i>Tab. 31: Rázová houževnatost a_{cU} [kJ·m⁻²] při teplotě 23°C a -35°C</i>	82

Tab. 32: Vrubová houževnatost a_{cN} [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$] při teplotě 23°C a -20°C 86