

Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů

Bc. Jan Vaculík

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan VACULÍK**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerži na dané téma
2. Připravte zkušební tělíska vstřikováním
3. Provedte ozáření zkušebních tělísek
4. Provedte mechanické zkoušky
5. Vyhodnoťte naměřené výsledky zkoušek

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Zdeněk Holík

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

19. února 2010

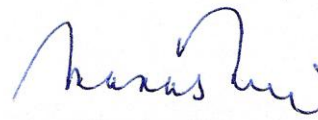
Termín odevzdání diplomové práce:

19. května 2010

Ve Zlíně dne 20. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

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. 5. 2010



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

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

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

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 vzdělávacího 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

Náplní této diplomové práce je porovnat vliv různých dávek elektronového beta záření na mechanické vlastnosti vybraných polymerů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části je popsáno rozdělení plastů, síťování polymerů, ionizační záření a mechanické zkoušky materiálů.

Praktická část nejprve popisuje základní vlastnosti a použití vybraných materiálů a použitá zařízení. Dále popisuje přípravu zkušebních těles a průběh tahové zkoušky. Na závěr je provedeno zhodnocení naměřených výsledků.

Klíčová slova: plasty, síťování, záření, vstřikování, tahová zkouška, mez pevnosti, modul pružnosti

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to compare the effect of different doses of electron beta irradiation on mechanical properties of selected plastics. The thesis is divided into theoretical and practical part.

The theoretical part describes the distribution of plastics, cross linking polymers, ionizing radiation and mechanical testing of materials.

The practical part first describes the basic properties and uses of selected materials and used equipment. Further, it describes the preparation of test samples and a course of tensile tests. At the end is an evaluation of the measured results.

Keywords: plastics, cross linking, radiation, injection molding, tensile test, breaking strength, modulus

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Zdeňku Holíkovi za odborné rady a pomoc při zpracování této diplomové práce, dále Ing. Vladimíru Šumberovi za technickou asistenci při výrobě zkušebních těles a Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc a technickou asistenci při provádění experimentu.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat firmě BGS GmbH & Co, KG v Saal am Donau, SRN konkrétně panu Ing. Michalu Daňkovi, díky kterému bylo realizováno ozáření zkušebních těles.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PLASTY	13
1.1 ROZDĚLENÍ PLASTŮ	13
1.2 PŘÍSADY DO POLYMERŮ	17
1.2.1 Zpracovatelské přísady.....	17
1.2.2 Antidegradanty	17
1.2.3 Síťovací prostředky	18
1.2.4 Přísady ovlivňující další fyzikální vlastnosti.....	18
1.3 KOMPOZITY	19
1.3.1 Kompozity s částicovými plnivý	19
1.3.2 Kompozity vyztužené vlákny	19
2 SÍŤOVÁNÍ	20
2.1 SÍŤOVÁNÍ PEROXIDY	20
2.2 SÍŤOVÁNÍ ELASTOMERŮ NA BÁZI 1, 3 – DIENŮ SÍROU	21
2.3 SÍŤOVÁNÍ KYSLÍKEM.....	22
2.4 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	23
2.4.1 Měrné jednotky techniky ozařování	24
2.4.2 Materiály pro radiační síťování	24
2.4.3 Zlepšení vlastností radiačně síťovaných plastů	26
3 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	29
3.1 DRUHY ZÁŘENÍ.....	30
3.1.1 Záření alfa	30
3.1.2 Záření beta.....	31
3.1.3 Záření gama.....	32
3.1.4 Neutronové záření	33
3.2 ROZDÍLY MEZI ELEKTRONOVÝM BETA ZÁŘENÍM A ZÁŘENÍM GAMA	33
4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU	35
4.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA	35
4.1.1 Zkušební tělesa.....	36
4.1.2 Tahová křivka.....	37
4.1.2.1 Mez úměrnosti	38
4.1.2.2 Mez pružnosti	38
4.1.2.3 Mez kluzu	39
4.1.2.4 Mez pevnosti v tahu	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	42
6 POUŽITÉ MATERIÁLY	43

6.1	MATERIÁL PBT.....	43
6.1.1	Použití	43
6.2	POLYAMIDY.....	44
6.2.1	Použití	45
7	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	46
7.1	SUŠÍCÍ ZAŘÍZENÍ ARBURG THERMOLIFT 100 - 2.....	46
7.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER 420C	48
7.3	ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 1456.....	50
8	POPIS PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	52
8.1	VSTŘIKOVACÍ HODNOTY.....	52
8.2	SÍŤOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	57
9	TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	63
9.1	VYHODNOCOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	64
9.2	ZKOUŠKA TAHEM ZA TEPLoty T = 23°C	65
9.3	ZKOUŠKA TAHEM ZA TEPLoty T = 80°C	72
10	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	79
10.1	MATERIÁL PBT.....	79
10.1.1	Zkouška tahem za teploty T = 23°C.....	79
10.1.2	Zkouška tahem za teploty T = 80°C.....	81
10.2	MATERIÁL PA 6	83
10.2.1	Zkouška tahem za teploty T = 23°C.....	83
10.2.2	Zkouška tahem za teploty T = 80°C.....	85
10.3	MATERIÁL PA 6.6	87
10.3.1	Zkouška tahem za teploty T = 23°C.....	87
10.3.2	Zkouška tahem za teploty T = 80°C.....	89
10.4	MATERIÁL PA 11	91
10.4.1	Zkouška tahem za teploty T = 23°C.....	91
10.4.2	Zkouška tahem za teploty T = 80°C.....	93
10.5	MATERIÁL PA 12	95
10.5.1	Zkouška tahem za teploty T = 23°C.....	95
10.5.2	Zkouška tahem za teploty T = 80°C.....	97
10.6	MATERIÁL PA 6.6 25% GF	99
10.6.1	Zkouška tahem za teploty T = 23°C.....	99
10.6.2	Zkouška tahem za teploty T = 80°C.....	101
10.7	MATERIÁL PA 11 25% GK.....	103
10.7.1	Zkouška tahem za teploty T = 23°C.....	103
10.7.2	Zkouška tahem za teploty T = 80°C.....	105
	ZÁVĚR	108
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	114

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	116
SEZNAM OBRÁZKŮ	118
SEZNAM TABULEK.....	121
SEZNAM PŘÍLOH.....	123

ÚVOD

Polymery díky obrovské šíři svých vlastností a díky tomu, že lze materiálu, který je při zpracování prakticky v tekutém stavu, udělit nejrůznější tvary, stále více nahrazují ostatní materiály. Se vzrůstajícím uplatněním těchto materiálů rostou i nároky na jejich vlastnosti.

Bylo tedy nezbytné hledat nové metody zlepšování vlastností polymerů, které vede k nahrazení drahých konstrukčních materiálů cenově dostupnými polymerními materiály.

Metoda zlepšení vlastností polymerních materiálů, kterou se zabývá tato diplomová práce, se zakládá na vytvoření sítě mezi jednotlivými řetězci polymerního materiálu díky energii dodané materiálu při ozáření ionizačním beta zářením. Materiály poté dosahují lepších mechanických, chemických a teplotních vlastností. Proces ozáření je navíc proveden na hotových výrobcích bez dodatečného namáhání. Variací ozařovacích parametrů lze rovněž měnit stupeň zesílení a dosáhnout tak požadovaných vlastností materiálu.

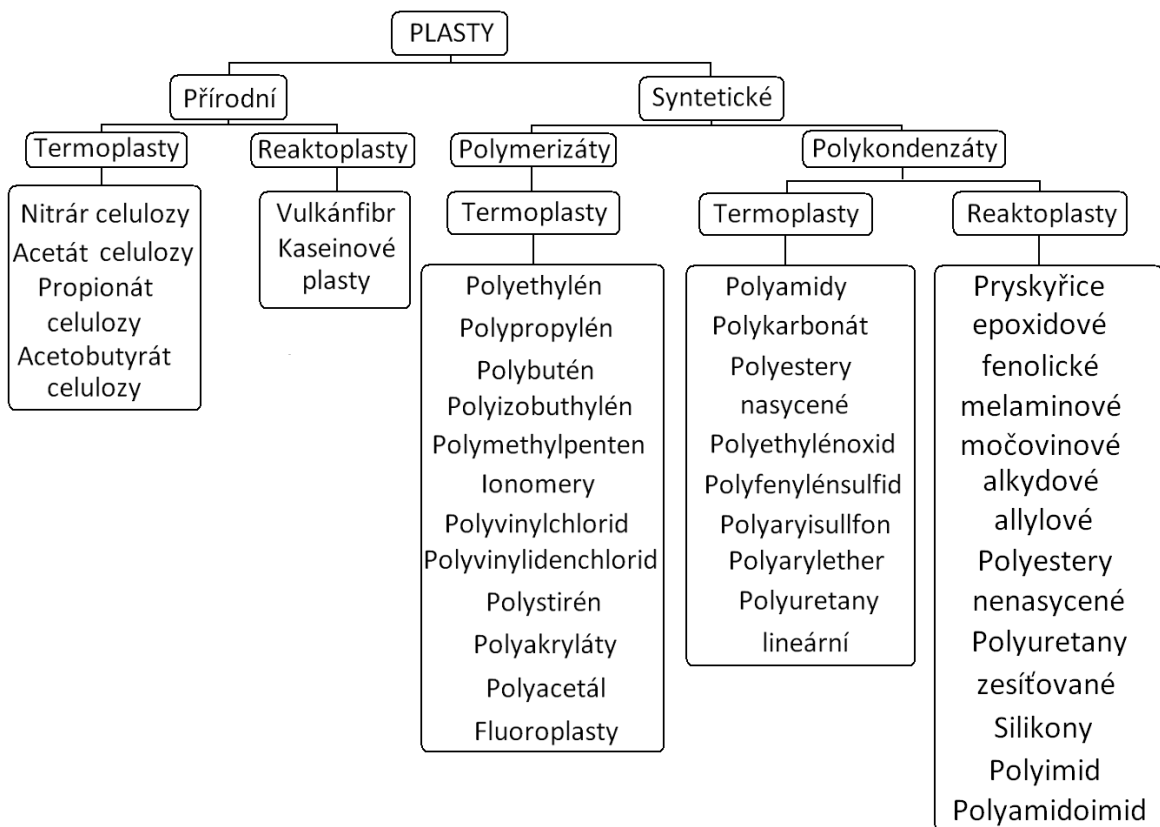
Hlavním úkolem této diplomové práce je porovnat, jaký vliv mají různé dávky ozáření na mechanické vlastnosti vybraných polymerních materiálů. Testované materiály (PBT, PA 6, PA 6.6, PA 11, PA 12, PA 6.6 plněný 25% skelných vláken a PA 11 plněný 25% skleněných kuliček) po zpracování do podoby zkušebních těles podstoupí proces ozáření v německé firmě BGS GmbH & Co, KG. Poté dojde k provedení tahové zkoušky a k následnému vyhodnocení naměřených výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 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 tvářitelná za působení teploty **T** a tlaku **p**, v jejichž makromolekule se jako články řetězu mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Základním prvkem řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet dlouhé řetězce. [1]

1.1 Rozdělení plastů

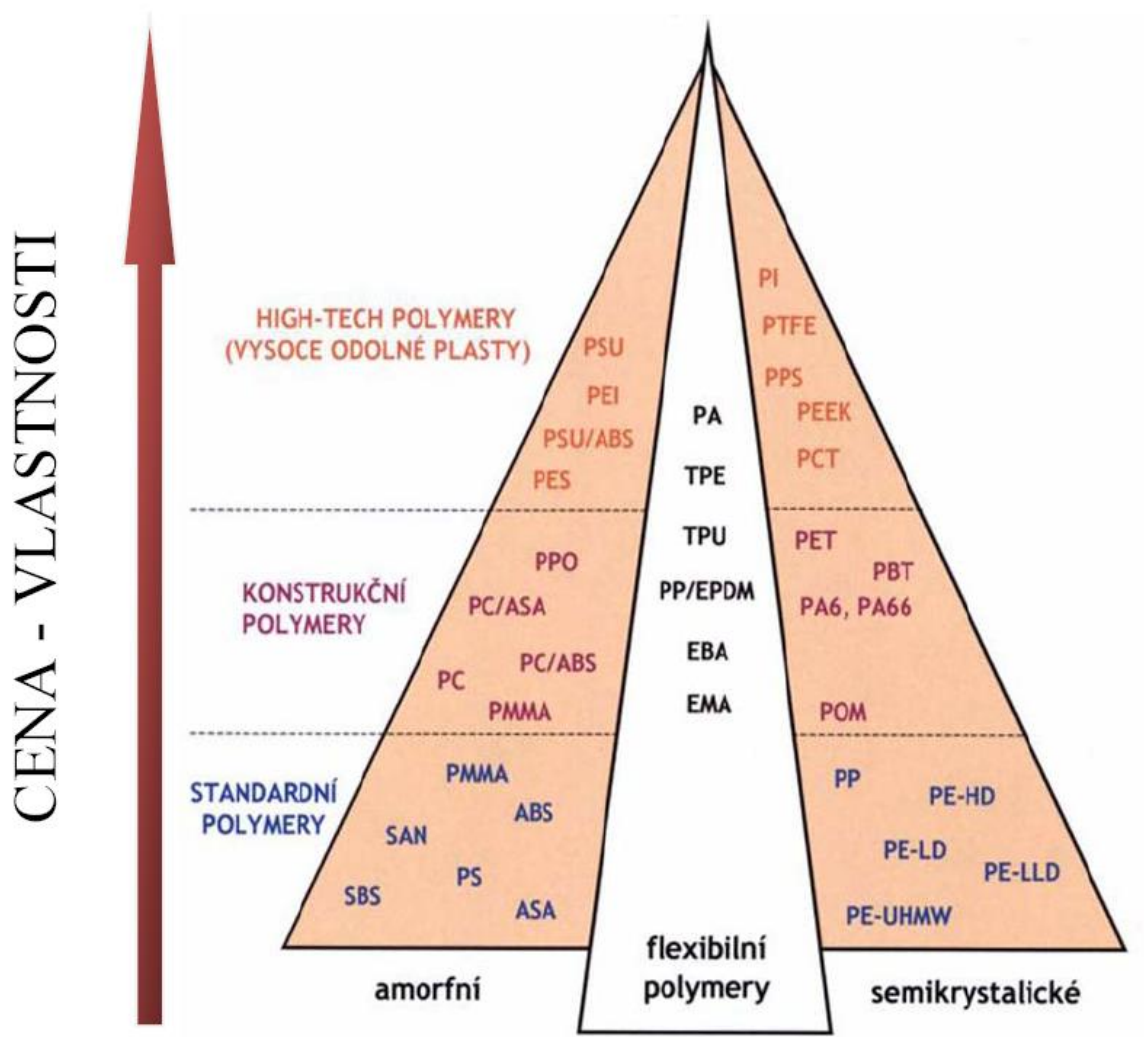


Obr. 1: Rozdělení přírodních a syntetických polymerů [18]

Plasty můžeme rozdělit podle různých hledisek:

1. Podle aplikace:

- **plasty pro široké použití** = polyolefiny (PE, PP), polystyrénové hmoty (PS), polyvinylchlorid (PVC), fenolformaldehydové (PF) a močovinoformaldehydové hmoty (UF),
- **plasty pro inženýrské aplikace** = polyamidy (PA), polykarbonáty (PC), polyoximethylén (POM), polymethylmetakrylát (PMMA), tepolymer ABS, polyfenylénoxid (PPO), polyuretan (PU), epoxidové (EP) a polyesterové (UP) pryskyřice,
- **plasty pro špičkové aplikace** = polysulfon (PSU), polyfenylénsulfid (PPS), tetrafluoretylén (PTFE), polyimidy (PI) a další. [1]



Obr. 2: Rozdělení polymerů dle jejich aplikace a ceny [18]

2. Podle chování za zvýšené teploty:

- **termoplasty** = polymerní materiály, které působením tepla přecházejí do plastického stavu, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Ochlazením pod teplotu tání T_m (semikrystalické plasty) resp. teplotu viskózního toku T_f (amorfní plasty) přecházejí do tuhého stavu. Jelikož při zahřívání nedochází ke změnám struktury, lze proces opakovat teoreticky bez omezení. Mezi termoplasty patří většina zpracovatelských hmot, např. polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA) atd. [1]
- **reaktoplasty** = dříve nazývané termosety, v první fázi zahřívání též měknou, poté dochází k chemické reakci - prostorovému zesíťování struktury (vytvrzování). Tento děj je nevratný, vytvrzené plasty nelze roztavit, dalším zahříváním dochází k degradaci. Patří sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty, atd. [1]
- **kaučuky, pryže a elastomery** = polymerní materiály, které podobně jako rektoplasty v první fázi zahřívání měknou, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – prostorovému zesíťování struktury (VULKANIZACE). Elastomery na bázi termoplastů lze je opakovaně přivádět do plastického stavu, nedochází ke změnám struktury, probíhá zde pouze fyzikální děj. [1]

3. Podle stupně uspořádanosti:

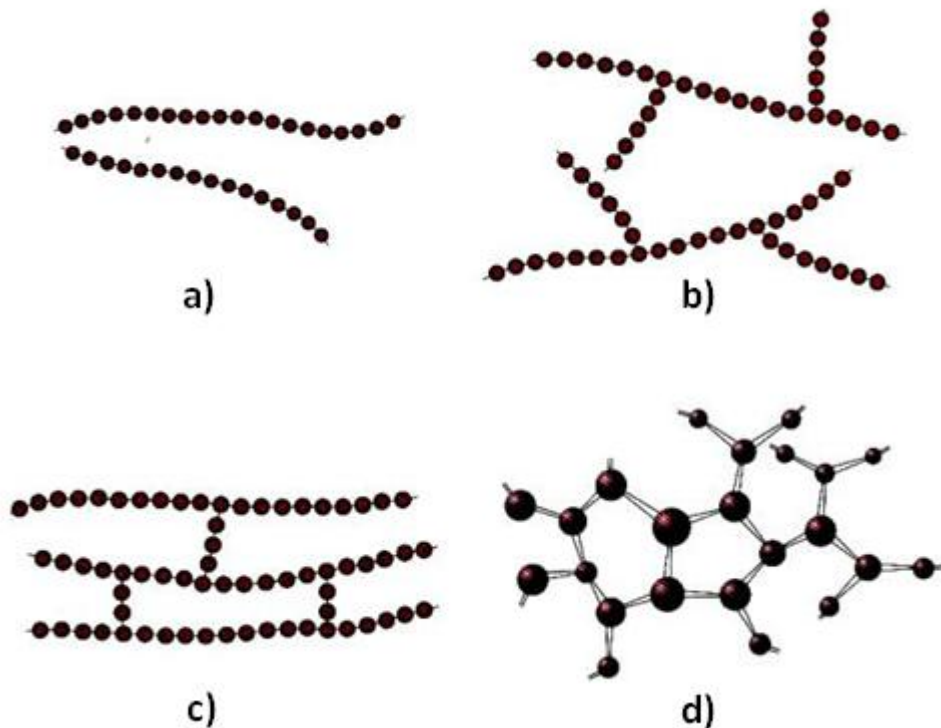
- **amorfní plasty** = makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici. Charakteristické vlastnosti jsou tvrdost, křehkost, vysoká pevnost, vysoký modul pružnosti a průhlednost. Použitelnost amorfních polymerů je do teploty zesíťování T_g . Patří sem např. PS, PMMA, PC. [1]
- **krystalické (semikrystalické) plasty** = vykazují určitý stupeň uspořádanosti (stupeň krystalinity). Ten se pohybuje od 40 do 90 %. Mají větší index lomu světla, proto jsou mléčně zakalené. Charakteristické jsou velkou houževnatostí materiálu, se stupněm krystalinity roste pevnost a modul pružnosti. Jejich použitelnost je do teploty tání T_m . Patří sem např. PE, PP, PA, PTFE, POM, atd. [1]

4. Podle původu:

- **přírodní** = označovány jako biopolymery, založeny na přírodních makromolekulárních látkách na bázi celulózy, kaseinu, latexu, atd.
- **syntetické** = výroba chemickou cestou (polymerace, polykondenzace, polyadice) [1]

5. Podle tvaru molekul:

- lineární,
- rozvětvené,
- zesíťované,
- prostorově zesíťované. [1]



Obr. 3: Tvary molekul [13]

- a) lineární polymer; b) rozvětvený polymer; c) zesíťovaný polymer;
d) prostorově zesíťovaný polymer (trojrozměrná síť)

1.2 Přísady do polymerů

Požadavky kladené na výrobky z polymerů jsou tak různorodé, že prakticky nepřichází v úvahu používání samotných, čistých polymerů, ale jen upravených dalšími látkami - přísadami, které spolu s polymery tvoří polymerní směsi. [3]

1.2.1 Zpracovatelské přísady

Tyto přísady usnadňují, nebo v některých případech dokonce umožňují zpracování polymerních směsí. Ovlivňují však více či méně jak vlastnosti polymerní směsi, tak výsledného produktu. [3]

Mezi zpracovatelské přísady patří:

- **plastikací činidla** = zvětšují účinnost a rychlost plastikace,
- **maziva** = usnadňují zpracování těžko zpracovatelných plastů (PVC, PS,...), zlepšují také vlastnosti výrobku (vzhled povrchu, tepelnou a světelnou stabilitu, odolnost vůči povětrnosti),
- **separační činidla** = usnadňují vyjímání výrobků z forem,
- **pomocné zpracovatelské prostředky** = používají se zejména pro snížení viskozity kaučukových směsí. Neovlivňují negativně užité vlastnosti pryžového výrobku.
- **změkčovadla** = jsou to málo těkavé organické látky poskytující polymerům ohebnost, tvárnost, vláčnost, dále snižují teplotu zesklnění a viskozitu taveniny.
- **tepelné stabilizátory** = jsou látky, které umožňují tvarování polymerů za tepla. Dále umožňují tváření polymerů majících teploty měknutí a rozkladu v úzkém rozmezí. [3]

1.2.2 Antidegradanty

Jako antidegradanty označujeme skupinu přísad, které dlouhodobě chrání výrobky před vnějšími vlivy během jejich používání. K těmto vlivům patří především účinek slunečního světla, atmosférického kyslíku a ozonu a tepelné energie. [3]

- **Světelné stabilizátory** = přísady absorbující ultrafialové světlo (zabránění degradace polymeru),

- **antioxidanty** = zabraňují-tepelně oxidačnímu stárnutí,
- **antiozonanty** = zabraňují praskání pryže ozonem. [3]

1.2.3 Síťovací prostředky

Látky, které se účastní síťovacích reakcí, tj. spojování lineárních nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců příčnými vazbami do struktury prostorové sítě. [3]

- **Síťovací činidla** = umožňují samotné síťování polymerů,
- **aktivátory síťování** = přísady aktivující síťovací reakci,
- **urychlovače síťování** = látky urychlující reakci síťovacího činidla s polymerem.[3]

1.2.4 Přísady ovlivňující další fyzikální vlastnosti

- **Plniva** = důležité přísady ovlivňující vlastnosti směsí a především vlastních výrobků. V neposlední řadě se přidávají také pro snížení ceny výrobku. Plnivy lze zlepšovat mechanické vlastnosti materiálu jako:

- pevnost,
- odolnost vůči oděru,
- houževnatost,
- tuhost.

A ostatní vlastnosti např.:

- odolnost vůči teplu, korozi a stárnutí,
- vzhled výrobku,
- cenu výrobku. [3]

Rozděluje je podle:

- **tvary:**
 - anizotropní = převládají dva rozměry nad třetím (masek, slída),
 - izotropní = mající stejný rozměr (CaCO₃, saze).

➤ **chemické podstaty:**

- anorganické (amorfní a krystalické),
- organické (papírová vlákna, celulóza, dřevěná moučka, atd. [3])

1.3 Kompozity

Kompozitní materiál, nebo zkráceně kompozit je obecně vzato materiál ze dvou, nebo více substancí s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti, které nemá sama o sobě žádná z jeho součástí. [12]

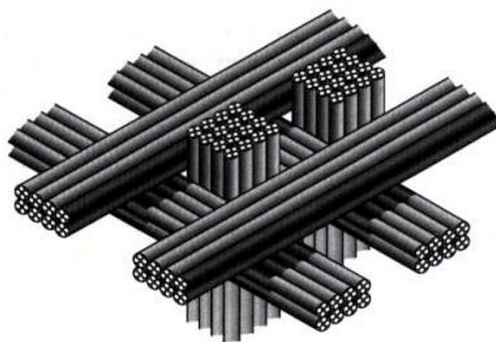
Důležitou roli u kompozitů nehrají pouze složky či fáze, ale i rozhraní mezi nimi.

1.3.1 Kompozity s částicovými plnivy

Částice, používané jako plniva kompozitů, mají tvar kulovitý, destičkovitý, jehlicovitý, nebo nepravidelný. Jejich složení je též rozmanité: vápenec, oxid křemičitý, oxidy křemíku, hořčíku a hliníku, skleněné mikrokuličky, slída, nebo mikročástice kovů. Částicová plniva mění značně takové mechanické vlastnosti matrice, jako je modul pružnosti, houževnatost, tvrdost, apod. [13]

1.3.2 Kompozity vyztužené vlákny

Významnou kvantitativní charakteristikou vláken, používaných jako plniva u kompozitů, zpevněných vláken, je poměr E_V/ρ_V (modul pružnosti, dělený hustotou) a poměr R_{mV}/ρ_V (pevnost v tahu, dělená hustotou), neboť právě tyto veličiny rozhodují o hmotnosti celé konstrukce. Nejčastěji používanými materiály pro taková vlákna je sklo, uhlík, bór s wolframem, ocel, kevlar, apod. [13]



Obr. 4: Trojrozměrný vláknový kompozit [13]

2 SÍŤOVÁNÍ

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

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

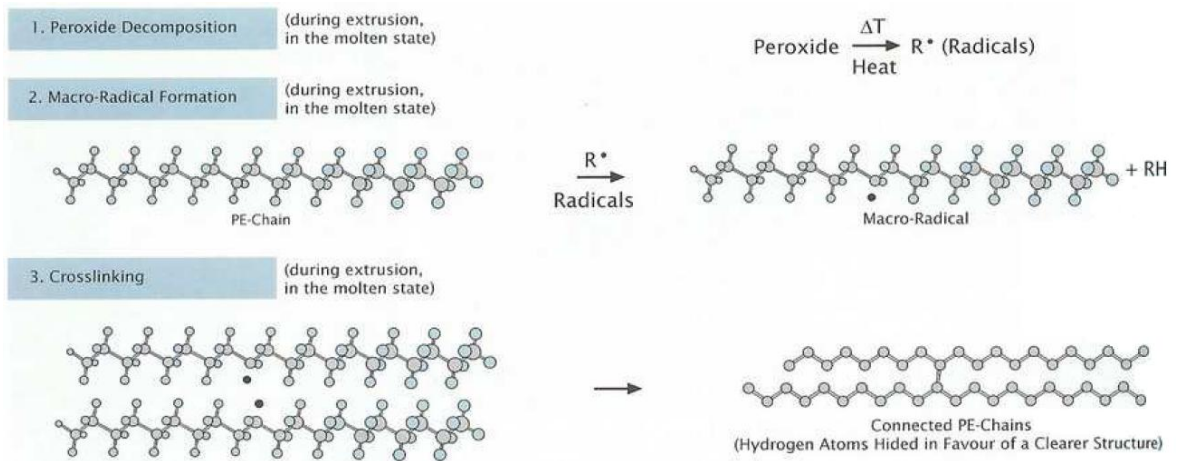
Zesíťováním ztrácejí polymery rozpustnost (v rozpouštědlech pouze bobtnají, tj. zvětšují svůj objem), tavitelnost a termoplasticitu a naopak získávají tvarovou stálost za zvýšených teplot, někdy i vyšší odolnost vůči chemikáliím. [3]

Prostorově zesíťované struktury vznikají různými způsoby, zejména:

- polykondenzací nebo polyadící tří a vícefunkčních monomerů,
 - kopolymerací monomerů, z nichž alespoň jeden má vyšší funkčnost než 2,
 - zabudováním příčných vazeb mezi lineární nebo rozvětvené makromolekulární řetězce,
 - vzájemnou reakcí makromolekulárních řetězců s vhodnými reaktivními skupinami.
- [18]

2.1 Síťování peroxidy

Při síťování pomocí peroxidů (dibenzonylperoxid, butyl-peroxid) se obvykle používají vyšší teploty (polymer se při ní taví). V prvním kroku se pomocí tepla rozloží peroxid (ROOR) na volné radikály RO \cdot , jenž dále reaguje polymerním řetězcem. Při této rekombinaci polymerních radikálů dochází ke spojení řetězce přes C-C vazbu. [19]



Obr. 5: Síťování PE pomocí peroxidů [19]

2.2 Síťování elastomerů na bázi 1, 3 – dienů sírou

Pro dosažení podstatných vlastností pryží, jako je schopnost rychlého a úplného návratu z deformovaného stavu, je nutné síťování kaučuků (vulkanizace). Vulkanizací se přemění původní převážně plastický kaučuk ve vysoce elastický vulkanizovaný kaučuk (pryž). Pro polydienové kaučuky je nejdůležitějším vulkanizačním činidlem síra. Podle množství vázané síry můžeme vytvořit různé produkty:

- měkká pryž,
- polotvrdá pryž (semiebonit),
- tvrdá pryž (ebonit).

Vulkanizace polydienových kaučuků spočívá v reakci nenasyčených řetězců se sírou za tepla, přičemž mezi těmito řetězci vznikají sírné můstky. Vulkanizace dienových polymerů zahříváním se sírou je velmi málo účinná a pouze asi každý padesátý atom síry vnesený do polymeru způsobuje zesílení. [18]

Jak ukazuje Tab. 1, s rostoucím obsahem vázané síry u vulkanizátů přírodního kaučuku se zvyšuje teplota skelného přechodu.

Tab. 1: Vliv obsahu vázané síry ve vulkanizátech přírodního kaučuku na Tg [18]

Obsah vázané síry [dsk]	Tg [°C]
4	-58
8	-36
12	-13
16	13
20	36
24	58
28	80

2.3 Síťování kyslíkem

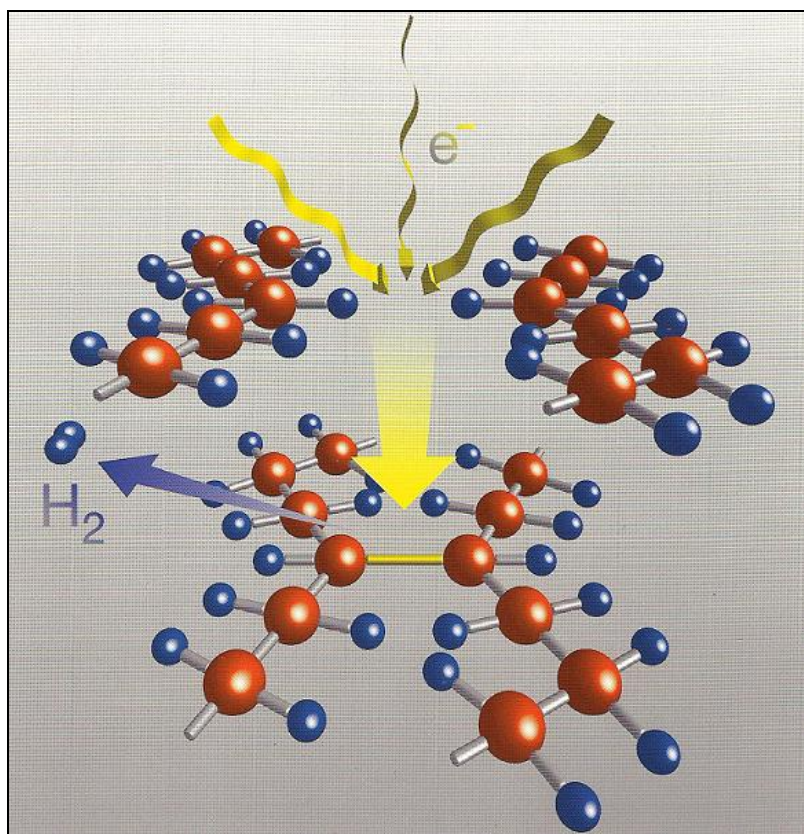
Rozvětvené nenasycené polyestery připravené z trojfunkčního nebo čtyřfunkčního polyalkoholu (glycerolu, pentaerythritolu), dikarboxylové kyseliny (ftalanhydridu) a nenasycených mastných kyselin (linolové, linoleové kyseliny) se označují jako vysychavé alkydy. Alkydy se používají jako pojiva nátěrových hmot a v nátěrovém filmu podléhají zesíťování vzdušným kyslíkem. Tato reakce, která je katalyzována ionty Co^{2+} , Pb^{2+} , Mn^{2+} , aj., bývá označována jako zasychání. Mechanismus síťování probíhajícího na nenasycených mastných kyselinách je odlišný u izolovaných a konjugovaných dvojných vazeb. Izolované dvojně vazby podléhají síťování přes stupeň hydroperoxidu, který se rozpadá na radikály, a sérií následných reakcí umožňuje zesíťování. Zesíťování systémů obsahujících mastné kyseliny s konjugovanými dvojnými vazbami probíhá přes stupeň cyklického peroxidu. [18]

2.4 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.

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

Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály (rozpad vazeb C-H), ty pomocí rekombinace vytvoří v řetězci síť a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C. [11]



Obr. 6: Schéma radiálního síťování elektronovým zářením [11]

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. [11]

2.4.1 Měrné jednotky techniky ozařování

Požadované změny vlastností u radiačního síťování určuje v první řadě dávka ozáření, tzn. množství absorbované energie záření na měrnou jednotku hmoty.

Dávka intenzity záření (dosis) = absorbovaná energie záření/hmotnost

Jednotka intenzity záření je Gray (Gy), dříve používaná jednotka byla rad.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg} = 100 \text{ rad}$$

Energie záření absorbovaná výrobkem za časovou jednotku a vztažená ke hmotnosti = dávková intenzita záření.

$$1 \text{ Gy/s} = 1 \text{ Watt/kg} = 0,36 \text{ Mrad/h}$$

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

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

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

$$1 \text{ Becquerell (Bq)} = 1 \text{ rozpad/sek.}$$

2.4.2 Materiály pro radiační síťování

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

Tab. 2: Radiálně síťovatelné polymery [11]

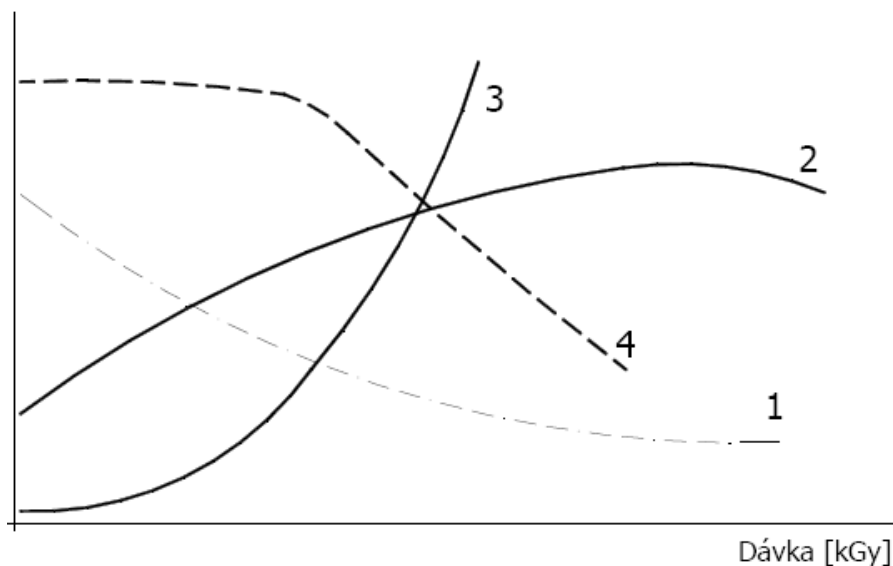
Termoplasty	Polyolefiny	CSM, chlorsulfonovaný polyetylen EEA, kopolymer etylenu s akrylátem EPDM, etylenpropylendienový kaučuk EVA, kopolymer etylenu s vinylacetátem PE, polyetylen (LDPE, HDPE, LLDPE,...) CM, chlorovaný polyetylen PP, polypropylen
	Polyestery	PBT, polybutylentereftalát UP, nenasycená 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 elastomer

2.4.3 Zlepšení vlastností radiačně síťovaných plastů

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

V důsledku radiačního síťování může původně termoplastický výrobek odolávat vyšším teplotám. Tvarová stálost za působení tepla je značně zlepšena v porovnání s výchozím termoplastickým materiálem. [11]

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



Obr. 7: Některé vlastnosti plastů v závislosti na dávce ozáření [11]

1 – tažnost, 2 – pevnost v tahu, 3 – tvarová stálost za tepla, 4 – bobtnání

Radiačním sít'ováním 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) Tepelných vlastností:

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

3) Chemických vlastností:

- snížení rozpustnosti,
- zlepšení odolnosti proti bobtnání,
- zvýšení odolnosti proti trhlinám způsobených pnutím,
- zlepšení odolnosti proti hydrolýze,
- zvýšená olejuvzdornost. [11]

Tab. 3: Přehled možných aplikací v průmyslu a vlastností po ozáření [18]

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

3 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Záření je proces přenosu energie prostorem prostřednictvím fyzikálních polí nebo mikročástic. Uskutečňuje se dvěma způsoby:

- **časově proměnné pole**, které se šíří prostorem ve formě vln, jež se odpoutávají od zdroje a přenášejí do prostoru část energie z tohoto zdroje. Příkladem jsou elektromagnetické vlny či zatím hypotetické vlny gravitační. Hovoříme o záření vlnovém. [4]
- **pohybující se částice**, které jsou emitovány zdrojem, velkou rychlostí letí prostorem a přenášejí tak kinetickou energii (a též hybnost, popř. i elektrický náboj) ze zdroje do okolního prostoru. Příkladem je záření b (proud rychle letících elektronů) nebo a (proud héliových jader). Jedná se o záření korpuskulární. [4]

Ionizující záření je souhrnné označení pro záření, jehož kvanta mají energii postačující k ionizaci atomů nebo molekul ozářené látky. [12]

Pro běžné druhy záření fotonového (X a γ), elektronového (β^-) a α se za energetickou hranici ionizujícího záření bere energie 5 keV. Složitější situace je u neutronového záření, kde i velmi pomalé neutrony vstupují do jader a prostřednictvím jaderných reakcí mohou vyvolávat sekundárně ionizaci (a to i zpožděně či dlouhodoběji - aktivace jader, vznik radionuklidů). Podobně není definována prahová energie u záření β^+ , kde i velmi pomalé pozitrony anihilují s elektrony za vzniku tvrdého ionizujícího záření γ . [4]

S ohledem na charakter ionizačního procesu je možno ionizující záření rozdělit na přímo ionizující a nepřímo ionizující. Přímě ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi (protony, elektrony, pozitrony atp.) Nepřímě ionizující záření zahrnuje nenabitě částice (neutrony, fotony atp.), které prostředí samy neionizují, ale při interakci s prostředím uvolňují sekundární přímo ionizující částice. Ionizace prostředí je zde tedy způsobena těmito sekundárními částicemi. Vznik ionizujícího záření souvisí se strukturou atomů a jejich jader. [12]

Druhy ionizujícího záření:

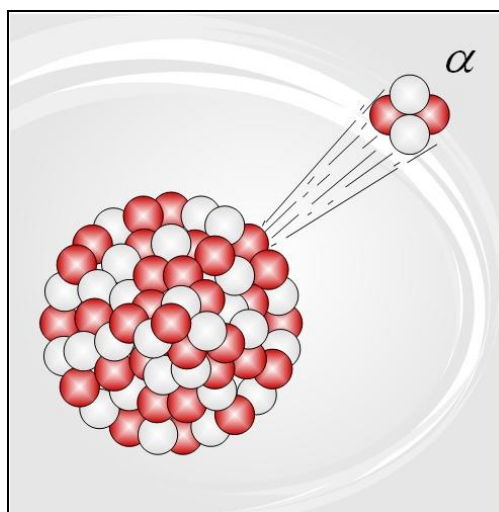
- záření alfa = proud α -částic, tj. jader helia,
- záření beta = záření urychlených elektronů nebo pozitronů,
- záření gama = energetické fotony, tj. druh elektromagnetického záření,
- neutronové záření.

Zdroje ionizujícího záření:

- přírodní zdroje = kosmické záření, sluneční záření, přírodní radioizotopy),
- umělé zdroje = urychlovače částic - Cyklotron, Synchrotron, případně lineární urychlovače, mezi něž patří i rentgenky (Rentgen, CT, mamograf) a CRT displeje, jaderné zbraně, jaderný reaktor, uměle vytvořené nestabilní chemické prvky, zařízení pro scintilační a stopovací diagnostické metody, terapeutická zařízení - cesiové a kobaltové gama ozařovače, Leksellův gama-nůž, radiofarmaka a tracersy. [12]

3.1 Druhy záření**3.1.1 Záření alfa**

Jako částice alfa (α , He^{2+}) označujeme jádro hélia. V podstatě jde o atom hélia bez elektronového obalu. Tvoří je dva protony a dva neutrony (jsou tedy kladně nabitě s elektrickým nábojem $+2e$). [12]



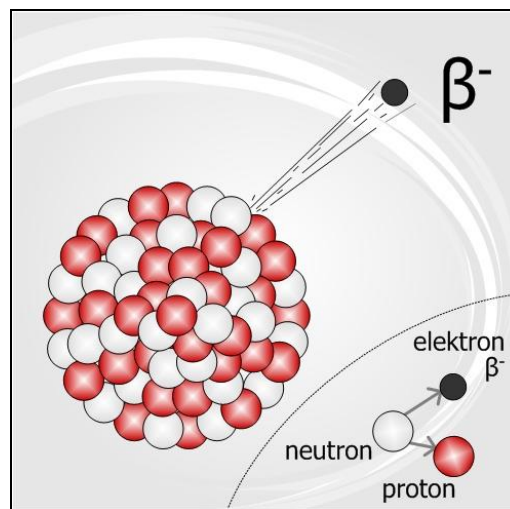
Obr. 8: Záření α [12]

Proud α částic se označuje jako alfa záření. K jeho pohlcení stačí list papíru, ve vzduchu se pohltní po několika centimetrech.

Záření alfa se vychyluje jak v elektrickém tak v magnetickém poli. Částice alfa letí velkou rychlostí a mají silné ionizační účinky. Jejich kinetická energie se pohybuje mezi 2 MeV a 8MeV. [2]

3.1.2 Záření beta

Záření beta jsou částice (elektrony nebo pozitrony), které jsou vysílány radioaktivními jádry prvků při beta rozpadu. Pohybují se velmi rychle, nesou kladný nebo záporný elektrický náboj a jejich pohyb může být tedy ovlivňován elektrickým polem. Jejich pronikavost je větší než u alfa částic, mohou pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou, k jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1 m nebo kovu o šířce 1 mm. [12]



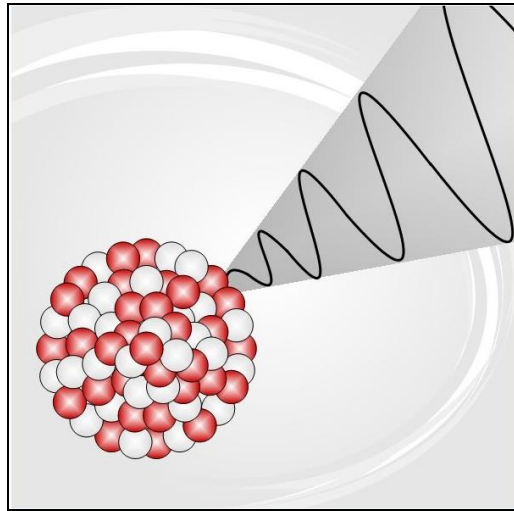
Obr. 9: Záření β [12]

Záření beta mínus (β^-) je proud elektronů e^- , které vyletují z jádra atomu. Malá hmotnost částic se projevuje výrazným zakřivením trajektorie částic jak v magnetickém, tak v elektrickém poli, avšak na opačnou stranu než záření alfa. Energie elektronů záření dosahuje 10 MeV a jejich rychlost se blíží rychlosti světla. Elektrony v jádře vznikají přeměnou z neutronu, za vzniku protonu a antineutrína. [2]

Záření beta plus (β^+) je proud pozitronů e^+ vyzařovaných některými radionuklidy při jaderných přeměnách. Toto záření je však v praxi velmi vzácné a v drtivé většině případů se setkáme s prvním typem záření. [2]

3.1.3 Záření gama

Záření gama (γ) je vysoce energetické elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních a jiných jaderných a subjaderných dějích. [12]

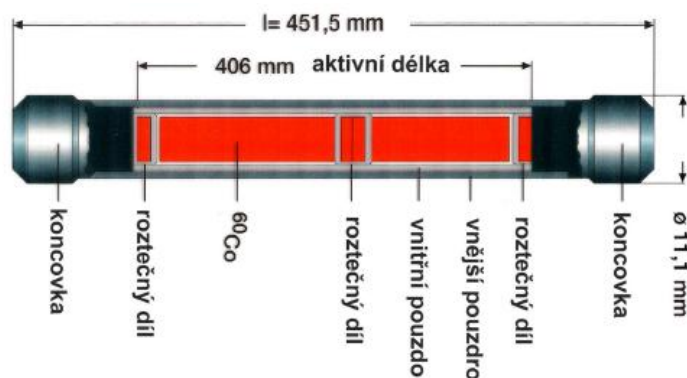


Obr. 10: Záření γ [12]

Gama záření silně ionizuje, uvolňuje z látky nabitě částice v důsledku fotoefektu. Zdrojem záření je jádro izotopu, který vznikl přeměnou radionuklidu. Toto jádro je excitované, v krátké době však přechází do základního stavu a tento přechod je spojen s vyzářením fotonů záření gama. [2]

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

Zdrojem γ záření může být např. $^{60}_{27}\text{Co}$.



Obr. 11: Schéma kapsle Co^{60} [11]

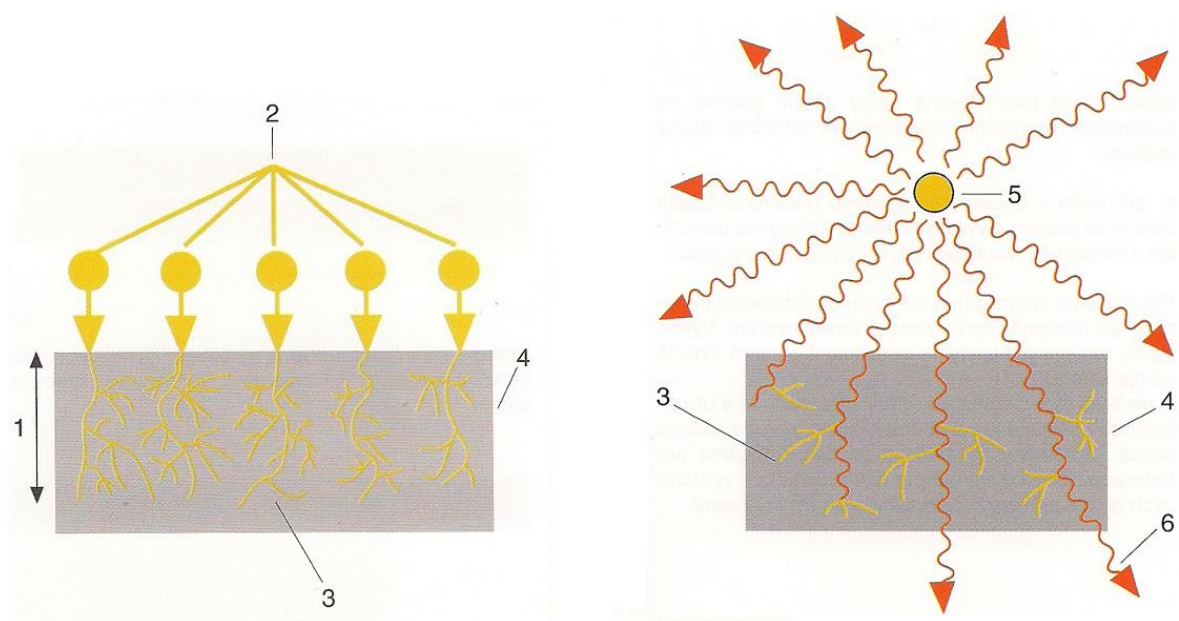
V praxi se pro ozařování používá tzv. blok, jenž má kolem 370 tub s radioaktivní látkou, jak je zobrazeno na obr. 11. Výkon takového bloku je kolem 35 kW. [19]

3.1.4 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 nenes elektrický náboj, a nemůže tak ztrácet energii přímou ionizací. [2]

3.2 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. [11]



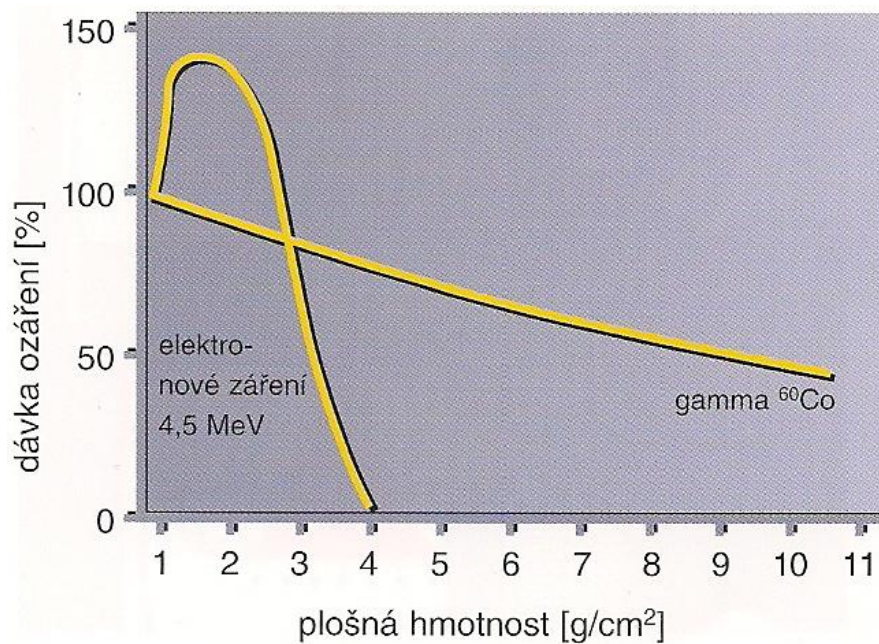
Obr. 12: Schéma pronikání beta a gama záření do materiálu [11]

- 1 – hloubka vniknutí elektronů, 2 – primární elektrony,
 3 – sekundární elektrony, 4 – ozářený materiál,
 5 – zapouzdřený zdroj záření Co^{60} , 6 – gama kvanta

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. [11]

Pro síťování polymerních materiálů jsou potřebné poměrně vysoké dávky ozáření. Proto se pro většinu plastových dílů používá převážně elektronové beta záření. Gama záření lze využít pro svou větší hloubku vniknutí zejména u složitých objemných tvarových dílů. V současnosti se však gama záření využívá především v oblasti sterilizace. [11]



Obr. 13: Schopnost pronikání elektronů a gama kvant záření [11]

4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU

Zkoušky mechanických vlastností lze rozdělit takto:

- a) Mechanické vlastnosti zjišťované *krátkodobým působením statické síly nebo statického napětí*. Zjišťuje se chování materiálu za konkrétních podmínek napětí, deformace, teploty a času. Jednotlivé podmínky se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušky, s výjimkou doby trvání zkoušky, která se buď nemění vůbec, nebo jen v mezích, které nemají vliv na hodnotu zjišťované vlastnosti. Krátkodobých zkoušek se používá hlavně pro rychlou kontrolu jakosti. Hlavním požadavkem je dobrá reprodukovatelnost výsledků bez zřetele na možnost jejich širšího využití v praxi. [10]
- b) Mechanické vlastnosti zjišťované *dlouhodobým působením statické síly nebo statického napětí*. Zjišťuje se chování materiálu za konkrétních zkušebních podmínek v podstatně delším časovém úseku, než je tomu u zkoušek krátkodobých. Zjišťují se závislosti hodnot zkoušených vlastností na čase. Podmínky zkoušky (napětí, teplota, event. vlhkost) se mohou měnit v širokém rozmezí podle účelu zkoušky. Dlouhodobé zkoušky slouží ke zjišťování inženýrských vlastností, jejichž znalost podmiňuje správnou aplikaci plastických hmot. [10]
- c) Mechanické vlastnosti zjišťované *cyklicky nebo acyklicky měnícím se napětím*. Zkouší se únava materiálu za určitých podmínek časově proměnného namáhání, konstantní teploty event. vlhkosti. Doba trvání zkoušky je buď předepsána, nebo závisí na odolnosti materiálu proti únavě (zkouška do porušení). [10]

4.1 Tahová zkouška

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

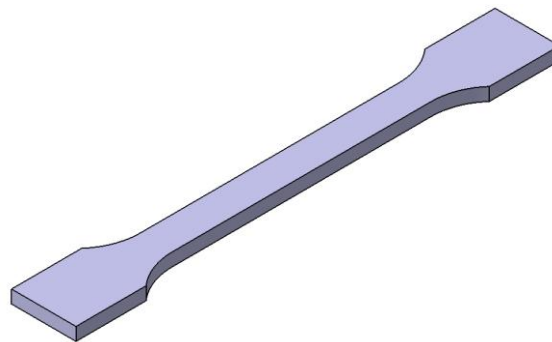
Grafickým znázorněním tahové zkoušky jsou pracovní diagramy, které poskytují informace o deformačním chování materiálů za různých podmínek zkoušení.

U plastických hmot je v důsledku anizotropie napětí v tahu rozloženo po průřezu nerovnoměrně, což je příčinou vzniku smykových napětí. [10]

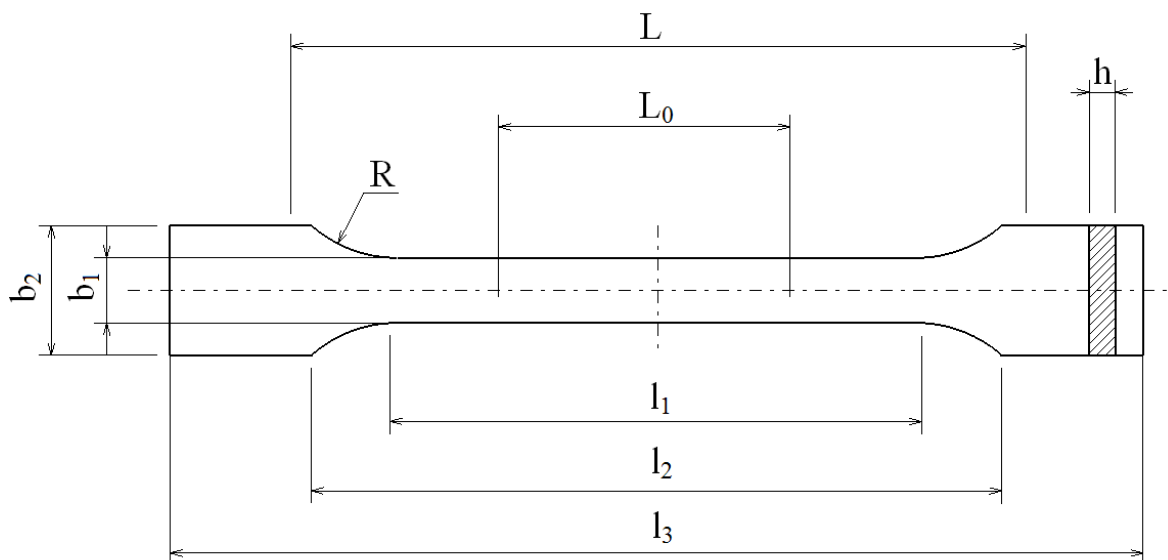
4.1.1 Zkušební tělesa

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

Tělesa mají tvar oboustranných lopatek – tzv. osmiček.



Obr. 14: Zkušební těleso pro tahovou zkoušku



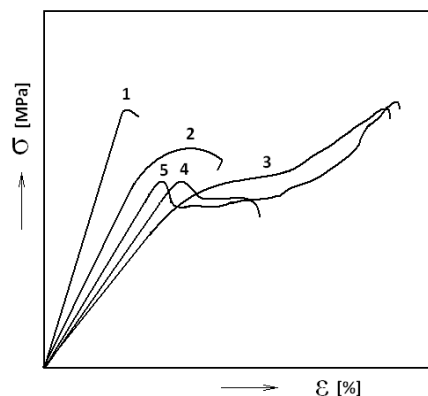
Obr. 15: Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku tahem [8]

Tab. 4: Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku plastů [8]

Rozměry [mm]			
	Druh rozměru	Typ 1A	Typ 1B
b₁	Šířka pracovní části	10 ± 0,2	
b₂	Šířka upínací části	20 ± 0,2	
l₁	Délka pracovní části	80 ± 2	60 ± 0,5
l₂	Vzdálenost mezi širokými částmi	104 až 113	106 až 120
l₃	Celková vzdálenost	≥ 150	
L₀	Počáteční měřená délka	50 ± 0,5	
L	Vzdálenost čelistí na počátku	115 ± 1	$l_2^{+5}_0$
h	Tloušťka tělíska	4 ± 0,2	
R	Poloměr	20 až 25	≥ 60

4.1.2 Tahová křivka

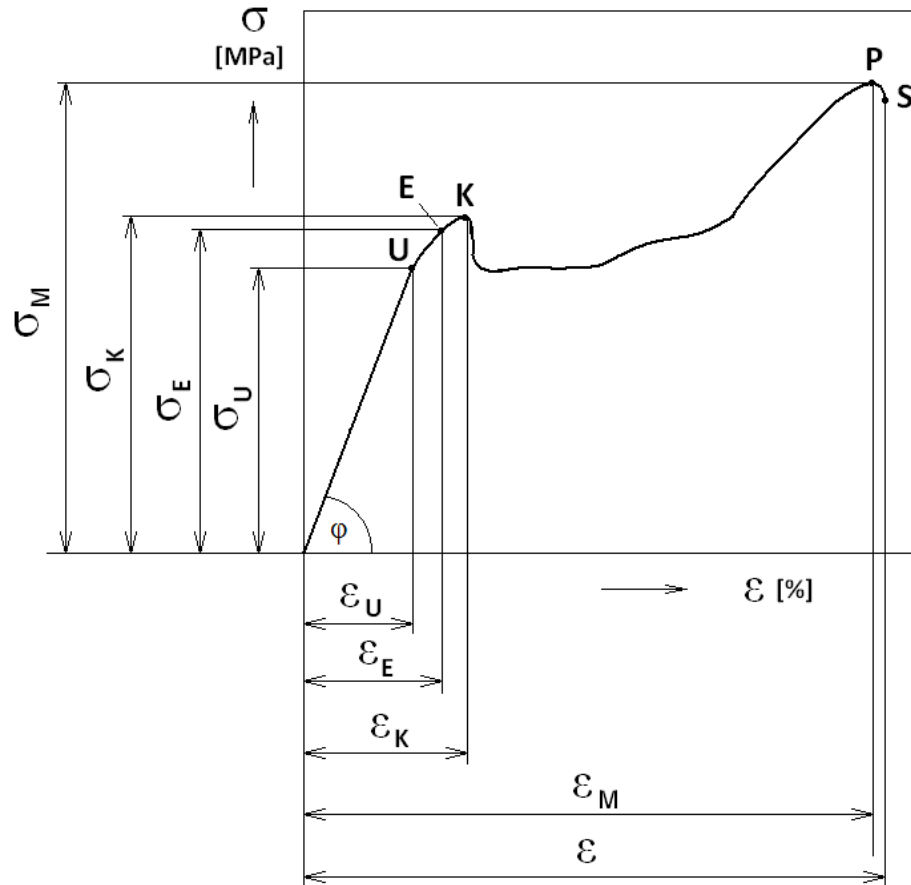
Grafické znázornění závislosti napětí σ na poměrném prodloužení měřené části zkušebního tělesa $\Delta l = l - l_0$ představuje u každé plastické hmoty jiný charakteristický pracovní diagram. [10]



Obr. 16: Typy pracovních diagramů plastických hmot [10]

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

Na křivce pracovního diagramu lze vyznačit několik důležitých bodů: E – mez pružnosti σ_E , U – mez úměrnosti σ_U , K – mez kluzu σ_K , P – mez pevnosti neboli pevnost v tahu σ_M , S – napětí při přetržení. Bodům odpovídají hodnoty tažnosti ε_E , ε_U , ε_K , ε_M . [10]



Obr. 17: Pracovní digram tahové zkoušky [10]

4.1.2.1 Mez úměrnosti

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

$$\sigma_U = \frac{F_U}{A_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

4.1.2.2 Mez pružnosti

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

nevymizí. Po okamžitém vymizení ideálně elastické deformace zůstává ještě deformace viskoelastická neboli zpožděně elastická, jejíž vymizení je časově závislé. Působí-li napětí delší dobu, dochází k částečně plastické deformaci, dokonale nevratné. [10]

Mez pružnosti je největší napětí, při jehož odstranění prakticky úplně vymizí deformace měřené části zkušebního tělesa. Označuje se σ_E :

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

4.1.2.3 Mez kluzu

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

Mez kluzu σ_K je nejmenší napětí, při němž nastávají podstatné trvalé deformace. [10]

Lze ji vyjádřit smluvním napětím:

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

4.1.2.4 Mez pevnosti v tahu

Při zvětšení napětí nad mez kluzu se zkušební těleso přetrhne. Jaký průběh mohou mít pracovní křivky plastických hmot je patrné na obr. 16. U křivky č. 1 pozorujeme, že k přetržení dojde prakticky okamžitě po dosažení meze kluzu. Mez kluzu je zde současně i pevností v tahu. U těchto typů plastických hmot nedochází k zúžení průřezu v místě přetržení. Lom je zpravidla rovinný, označujeme jej jako křehký. U křivky č. 2 je zkušební těleso přetrženo brzy po překročení meze kluzu. Ta je největším napětím dosaženým při zkoušce a je současně i pevností v tahu. Při přetržení dochází k vzniku krátkého zúžení. Křivka č. 3 se vyznačuje tím, že nemá mez kluzu. U těchto materiálů se za pevnost v tahu považuje smluvní mez kluzu. Pro křivku č. 4 je charakteristická horní a dolní mez kluzu. Zkušební těleso se přetrhne brzy po překročení meze kluzu, kdy hmota ztrácí mechanickou

pevnost. Křivka č. 5 se od předchozí liší chováním za dolní mezí kluzu. To je způsobeno orientací molekul těchto plastických hmot. [10]

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

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

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním úkolem této práce je porovnat mechanické vlastnosti neozářeného polymerního materiálu a materiálu modifikovaného různými dávkami radiačního záření. Konkrétně se jednalo o mechanické vlastnosti materiálu při statické zkoušce v tahu a dynamické zkoušce rázové houževnatosti.

Pro tyto účely budou vybrané materiály zpracovány na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420C do podoby zkušebních těles tvaru lopatiček (tahová zkouška) a tvaru tyčinek (zkouška rázové houževnatosti). Materiály určené k testování jsou PBT (polybutylentereftalát) a polyamidy PA 6, PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken), PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček) a PA 12.

Část zkušebních těles bude ozářena ve firmě BGS zářením urychlených elektronů dávkami 33, 66, 99, 132, 165 a 198kGy. Neozářená i ozářená zkušební tělesa budou podrobena tahové zkoušce a zkoušce rázové houževnatosti na zařízeních ZWICK.

Naměřená data budou vyhodnocena za účelem porovnat vliv jednotlivých dávek ozáření na mechanické vlastnosti vybraných materiálů.

6 POUŽITÉ MATERIÁLY

V této diplomové práci byly použity materiály PBT a polyamidy PA 6, PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken), PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček) a PA 12. Tato kapitola obsahuje stručný popis těchto materiálů, jejich vlastnosti a použití. Materiálové listy těchto materiálů jsou obsahem přílohy P IV na přiloženém CD.

6.1 Materiál PBT

Jedná se o semikrystalický polymerní materiál patřící do skupiny polyesterů. V hlavních řetězcích obsahuje esterové vazby. Má skvělé mechanické a elektrické vlastnosti a velkou odolnost vůči rozpouštědlům, olejům a chemikáliím.

Tab. 5: Vybrané vlastnosti polymeru PBT

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Fyzikální		
hustota	1,26	g/cm ³
Mechanické		
Modul pružnosti v tahu (E)	1300	MPa
Poměrné protažení při přetržení	124	%
Pevnost v ohybu	45	MPa
Teplotní		
Teplota tání 50°C/h 9,8 N	210	°C

6.1.1 Použití

Díky svým vynikajícím elektrickým vlastnostem se PBT vyztužené skelnými vlákny používá při výrobě elektrických a elektronických konektorů a zásuvek, cívek a motorových skříní, spínačů apod. Neplněný se díky svému širokému rozsahu hodnot viskozity zpracovává jak vstřikováním a vytlačováním, tak vyfukováním (tyče, desky).

6.2 Polyamidy

Téměř všechny polyamidy jsou krystalické polymery s obsahem krystalického podílu až 60%. Mají velmi dobré mechanické vlastnosti. Příčinnou vysoké pevnosti, tuhosti, tvrdosti a oděruvzdornosti je krystalická část, zatímco ohebnost, elasticita a tažnost je zapříčiněna amorfní částí polymeru. Vysokou pevnost v tahu má především PA 6, PA 6.6. U polyamidů PA 11 a PA 12 jsou tyto vlastnosti horší. Elektrické, optické a chemické vlastnosti polyamidů nejsou příliš dobré. V následujících tabulkách jsou vybrané vlastnosti použitých polyamidů.

a) PA 6

Tab. 6: Vybrané vlastnosti polymeru PA 6

Vlastnosti	Hodnoty	Jednotky
Fyzikální		
hustota	1,14	g/cm ³
Mechanické		
Modul pružnosti v tahu (E)	2700	MPa
Poměrné protažení při přetržení	6,8	%
Pevnost v ohybu	74	MPa
Teplotní		
Teplota tání 50°C/h 9,8 N	210	°C

b) PA 6.6

Tab. 7: Vybrané vlastnosti polymeru PA 6.6

Vlastnosti	Neplněný	Plněný	Jednotky
Fyzikální			
hustota	1,14	1,38	g/cm ³
vlhkost	2,7	5,6	%
Mechanické			
vrubová houževnatost Izod	0,04	0,08	kJ/m ²

c) PA 11

Tab. 8: Vybrané vlastnosti polymeru PA 11

Vlastnosti	Neplněný	Plněný	Jednotky
Fyzikální			
hustota	1,03	1,22	g/cm ³
vlhkost	6,6	5,9	%
Mechanické			
vrubová houževnatost Izod	0,04	0,09	kJ/m ²

6.2.1 Použití

Polyamidy, zejména PA 6 a PA 6.6 se používají na výrobu vláken. Dále se zpracovávají vstřikováním či vytlačováním. Vytlačováním se z polyamidů vyrábějí fólie, tyče, trubky, desky a jiné profily. Vstřikované dílce se používají např. v automobilovém průmyslu jako sací potrubí motoru, ventilátory, vnitřní kryty blatníku atd.

Polyamidy PA 11 a PA 12 se používají jako hnací řemeny, hadice odolné vůči olejům a benzínu atd.

7 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

V této kapitole jsou popsány stroje a zařízení potřebné k vypracování této diplomové práce. Pro přípravu materiálu před vstřikováním bylo použito sušící zařízení s označením ARBURG THERMOLIFT 100-2. Vstřikování vzorků bylo provedeno na vstřikovací stroji ARBURG Allrounder 420C. Realizace samotné tahové zkoušky pak probíhala na trhacím stroji ZWICK ROELL 1456.

7.1 Sušící zařízení ARBURG THERMOLIFT 100 - 2

Toto zařízení je určeno jak pro vysušení polymerního materiálu, tak pro jeho dopravu do plastikační jednotky vstřikovacího stroje. Obsluha stroje probíhá pomocí kontrolního panelu. Výhodou je mobilita tohoto zařízení, které lze posouvat mezi vstřikovacími stroji. Technické parametry zařízení jsou obsaženy v Tab. 9.



Obr. 18: Sušící zařízení ARBURG THERMOLIFT 100 - 2

Tab. 9: Technické parametry sušícího zařízení [17]

THERMOLIFT 100-2		
objem zařízení	100	l
objem zařízení s připojeným kontejnerem	200	l
provozní napětí	220/400	V
topný element	4,5	kW
ventilátor	0,95	kW
dopravní výška	3	m
dopravní tlak	0,05	bar
zdroj sušícího vzduchu	0,74	kW
celková spotřeba energie	5,5	kW
celková spotřeba energie zahrnující zdroj sušícího vzduchu	6,2	kW
množství sušícího vzduchu	90	m ³ .h ⁻¹
množství obnoveného sušícího vzduchu	20	m ³ .h ⁻¹
přípojka stlačeného vzduchu pro vakuové dopravní zařízení	4 – 6	bar
vzduchový filtr / jmenovitý maximální průtok	180	m ³ .h ⁻¹

7.2 Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 420C

Tento vstřikovací stroj může sloužit jak pro základní vstřikování, tak pro některé speciální druhy zpracování jako např. vícekomponentní vstřikování plastů. Ke své činnosti využívá řídicí systém SELOGICA, umožňující jeho jednoduchou a rychlou obsluhu. Na obrazovce výklopného terminálu se graficky zobrazují všechny cykly stroje. Dochází přitom ke kontrole správnosti dat, které zadává obsluha při programování stroje.



Obr. 19: Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 420C

Tab. 10: Technické parametry vstřikovacího stroje [20]

Vstřikovací stroj ARBURG 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	420 x 420	mm
velikost upínací desky	570 x 570	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
Krouticí moment šneku	700	max. Nm
přítlačná síla trysky	70	max. kN
objem násypky	50	l
Olejová náplň a hmotnost		
množství oleje	235	l
hmotnost stroje, bez oleje	3700	kg

7.3 Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Toto zařízení umožňuje zkoušku tahem, tlakem a ohybovou zkoušku. K ovládání stroje, ukládání a vyhodnocování dat získaných ze zkoušek slouží osobní počítač, který je součástí stroje a obsahuje software Test Xpert. Pro provedení zkoušky za zvýšené nebo snížené teploty je zařízení vybaveno temperační komorou, která je v případě potřeby instalována posunutím po kolejničích.



Obr. 20: Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Tab. 11: Technické parametry zkušebního stroje [17]

ZWICK ROELL 1456		
Rozměry a hmotnost stroje		
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	
	standard – ohyb a tlak	
	standardní hysterzní (cyklické) zkoušky	

8 POPIS PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Zkušební tělesa byla zhotovena vstřikováním na vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 420C.



Obr. 21: Vstřikovací stroj Arburg Allrounder 420C [20]

8.1 Vstřikovací hodnoty

PBT

V tabulce jsou zapsány hodnoty nastavení vstřikovacího stroje a teploty pásem plastikační jednotky pro materiál PBT.

Tab. 12: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro PBT

Parametry	Hodnoty	Jednotky
vstřikovací tlak	80	[MPa]
dotlak	30	[MPa]
dráha dávkování	26	mm
doba chlazení	20	s
teplota formy	70	°C
teplota taveniny	250	°C
Teploty pásem plastikační jednotky		
teplota pod násypkou	70	°C
teplotní pásmo 1	220	°C
teplotní pásmo 2	225	°C
teplotní pásmo 3	230	°C
teplotní pásmo 4	240	°C
teplota trysky	250	°C

Polyamid 6 (PA 6)

Tabulka ukazuje hodnoty nastavení vstřikovacího stroje a teploty pásem plastikační jednotky, které byly použity při přípravě zkušebních těles z materiálu PA 6.

Tab. 13: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro PA 6

Parametry	Hodnoty	Jednotky
vstřikovací tlak	80	[MPa]
dotlak	30	[MPa]
dráha dávkování	26	mm
doba chlazení	20	s
teplota formy	90	°C
teplota taveniny	265	°C
Teploty pásem plastikační jednotky		
teplota pod násypkou	70	°C
teplotní pásmo 1	220	°C
teplotní pásmo 2	230	°C
teplotní pásmo 3	245	°C
teplotní pásmo 4	255	°C
teplota trysky	265	°C

Polyamid 6.6

Tato tabulka obsahuje hodnoty, které byly použity při vstřikování zkušebních těles z materiálu PA 6.6. Hodnoty se pro neplněný materiál (PA 6.6) a pro materiál plněný 25% skelných vláken (PA 6.6 25% GF) liší pouze nepatrně.

Tab. 14: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro neplněný a plněný PA 6.6

Parametry	PA 6.6 neplněný	PA 6.6 plněný	Jednotky
vstřikovací tlak	80	80	[MPa]
dotlak	30	30	[MPa]
dráha dávkování	26	26	mm
doba chlazení	20	20	s
teplota formy	90	85	°C
teplota taveniny	290	290	°C
Teploty pásem plastikační jednotky			
teplota pod násypkou	70	70	°C
teplotní pásmo 1	245	245	°C
teplotní pásmo 2	260	265	°C
teplotní pásmo 3	275	275	°C
teplotní pásmo 4	285	285	°C
teplota trysky	290	290	°C

Polyamid 11

Hodnoty použité pro vstřikování zkušebních těles z neplněného materiálu (PA 11) i pro materiál plněný 25% skelných kuliček (PA 11 25% GK) jsou zapsány v následující tabulce.

Tab. 15: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro neplněný a plněný PA 11

Parametry	PA 11 neplněný	PA 11 plněný	Jednotky
vstřikovací tlak	150	80	[MPa]
dotlak	30	30	[MPa]
dráha dávkování	33	26	mm
doba chlazení	20	20	s
teplota formy	60	50	°C
teplota taveniny	270	270	°C
Teploty pásem plastikační jednotky			
teplota pod násypkou	60	70	°C
teplotní pásmo 1	210	240	°C
teplotní pásmo 2	230	250	°C
teplotní pásmo 3	250	260	°C
teplotní pásmo 4	265	265	°C
teplota trysky	270	270	°C

Polyamid 12

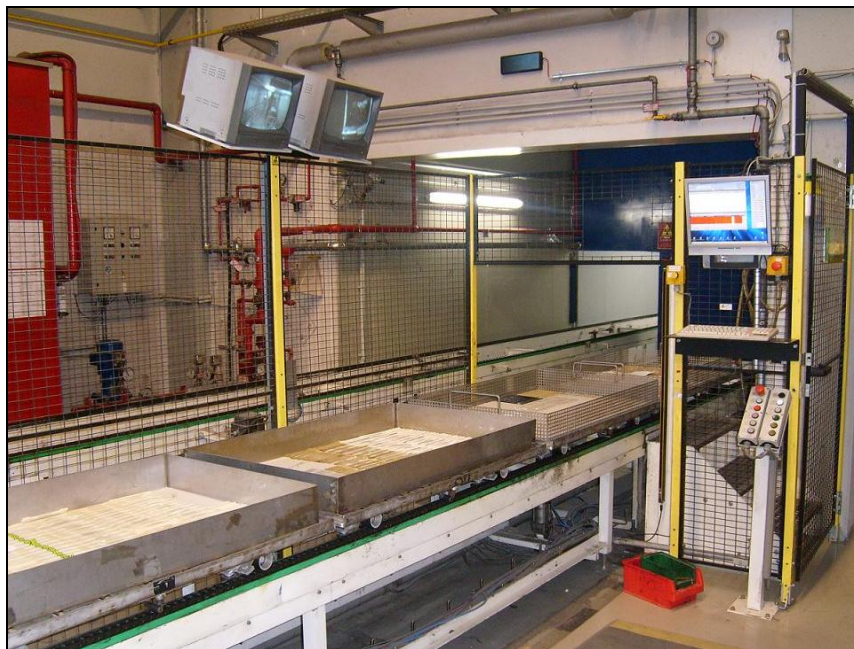
Tabulka obsahuje hodnoty nastavení vstřikovacího stroje a teploty pásem plastikační jednotky, které byly použity při přípravě zkušebních těles z materiálu PA 12.

Tab. 16: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro PA 12

Parametry	Hodnoty	Jednotky
vstřikovací tlak	80	[MPa]
dotlak	30	[MPa]
dráha dávkování	28	mm
doba chlazení	20	s
teplota formy	60	°C
teplota taveniny	250	°C
Teploty pásem plastikační jednotky		
teplota pod násypkou	60	°C
teplotní pásmo 1	210	°C
teplotní pásmo 2	225	°C
teplotní pásmo 3	235	°C
teplotní pásmo 4	245	°C
teplota trysky	250	°C

8.2 Sítování zkušebních těles

Zkušební tělesa byla ozářena elektronovým beta zářením o energii 10MeV německou firmou BGS Beta-Gama-Servise GmbH & Co, KG v pobočce Saal an der Donau. Dávky ozáření byly 33, 66, 99, 132, 165 a 198kGy. Pro dosažení požadované dávky projížděly palety se zkušebními vzorky ozařovacím zařízením tolikrát, než bylo dosaženo požadované hodnoty ozáření.



Obr. 22: Ozařovací linka firmy BGS



Obr. 23: Paleta se zkušebními tělesy a identifikátory

Před každým průjezdem byl na paletu s tělesy umístěn dozimetr pro zjištění skutečné hodnoty ozáření. Dále byl na paletu umístěn identifikátor, který po průjezdu ozařovacím zařízením zčervenal a signalizoval tak, že došlo k ozáření materiálu. Pro nejvyšší dávku ozáření 198kGy tedy bylo na paletu umístěno šest identifikátorů (viz Obr. 24).



Obr. 24: Identifikátory pro určení počtu průjezdů ozařovacím zařízením

Požadované hodnoty ozáření a hodnoty, kterých bylo skutečně dosaženo, jsou zapsány v Tab. 17.

Tab. 17: Požadované a skutečné hodnoty ozáření

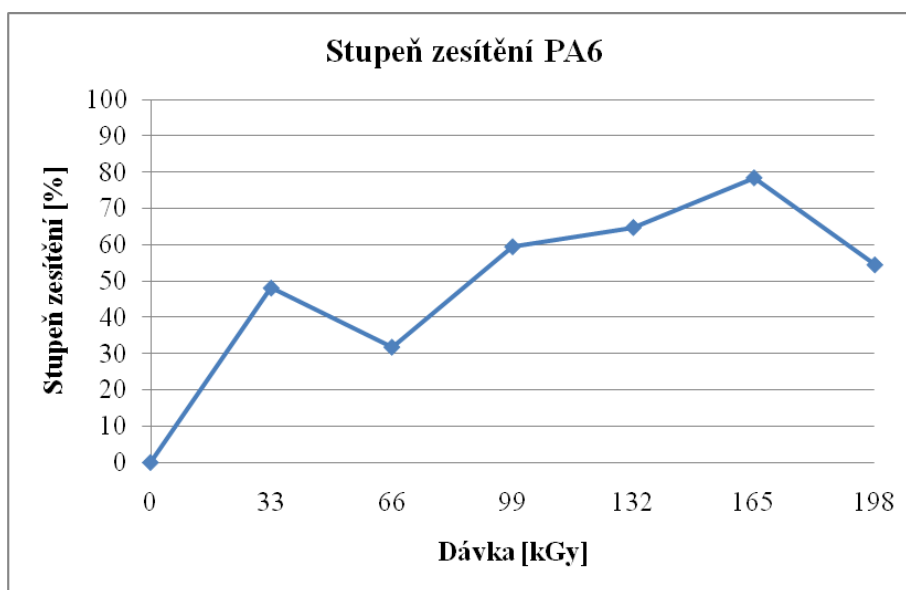
Průjezd zařízením	Požadovaná dávka [kGy]	Skutečná dávka [kGy]
1	33	35,4
2	66	70,1
3	99	105,5
4	132	139
5	165	173,2
6	198	207,2

V následujících tabulkách a grafech je popsán stupeň zesítní, kterého materiály dosáhly po ozáření jednotlivými dávkami. Měření se neprovádělo pro materiál PBT, proto tabulky a grafy obsahují pouze hodnoty pro ostatní materiály (polyamidy).

a) Materiál PA 6

Tab. 18: Stupeň zesítní jednotlivých dávek ozáření materiálu PA 6

Průjezd zařízením	Požadovaná dávka [kGy]	Stupeň zesítní [%]
1	33	48,1
2	66	31,8
3	99	59,5
4	132	64,8
5	165	78,5
6	198	54,5

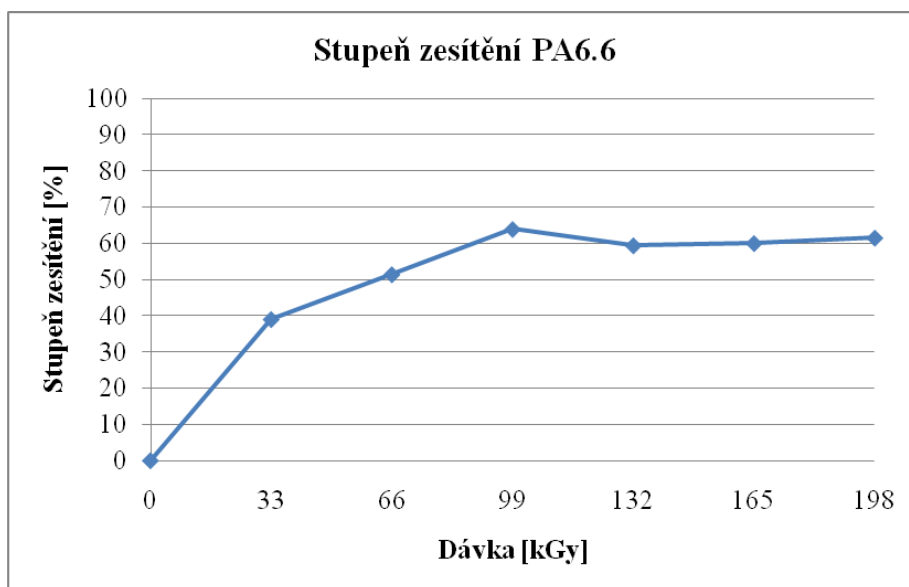


Obr. 25: Stupeň zesítní pro materiál PA 6

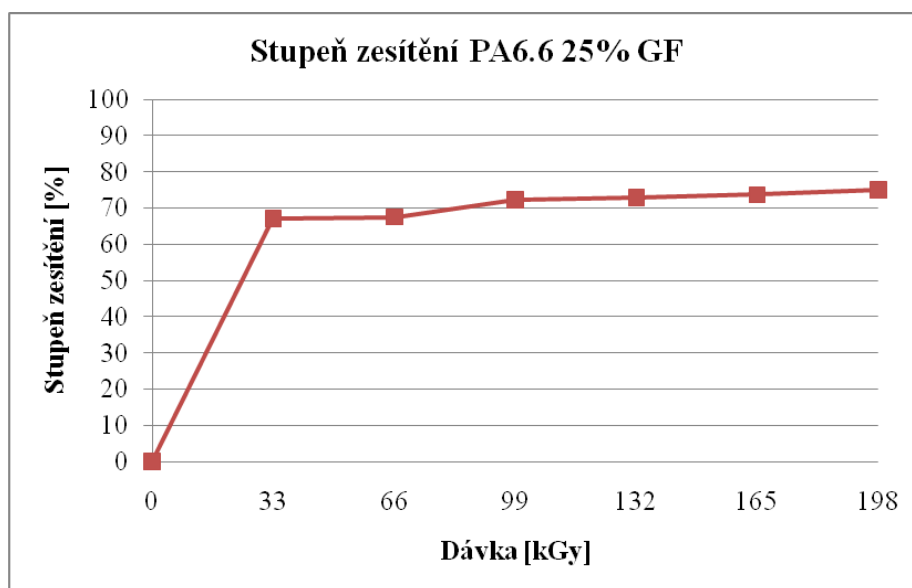
b) Materiál PA 6.6 (neplněný a plněný 25% skelných vláken)

Tab. 19: Stupeň zesítnění jednotlivých dávek ozáření materiálu PA 6.6

Průjezd zařízením	Požadovaná dávka [kGy]	Stupeň zesítnění [%]	
		neplněný	plněný
1	33	39,0	67,1
2	66	51,4	67,5
3	99	63,9	72,3
4	132	59,4	72,9
5	165	60,0	73,7
6	198	61,5	75,1



Obr. 26: Stupeň zesítnění pro neplněný PA 6.6

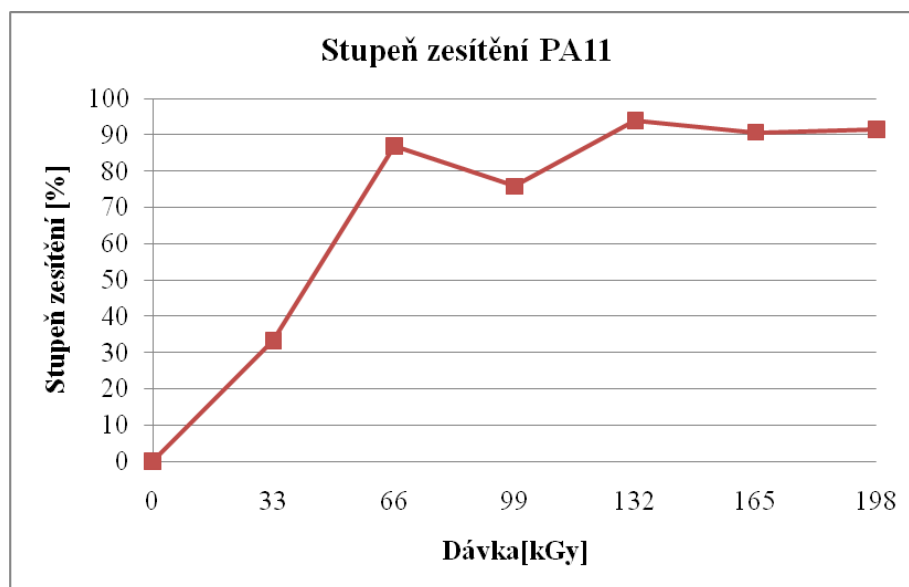


Obr. 27: Stupeň zesítnění pro PA 6.6 plněný 25% skelných vláken

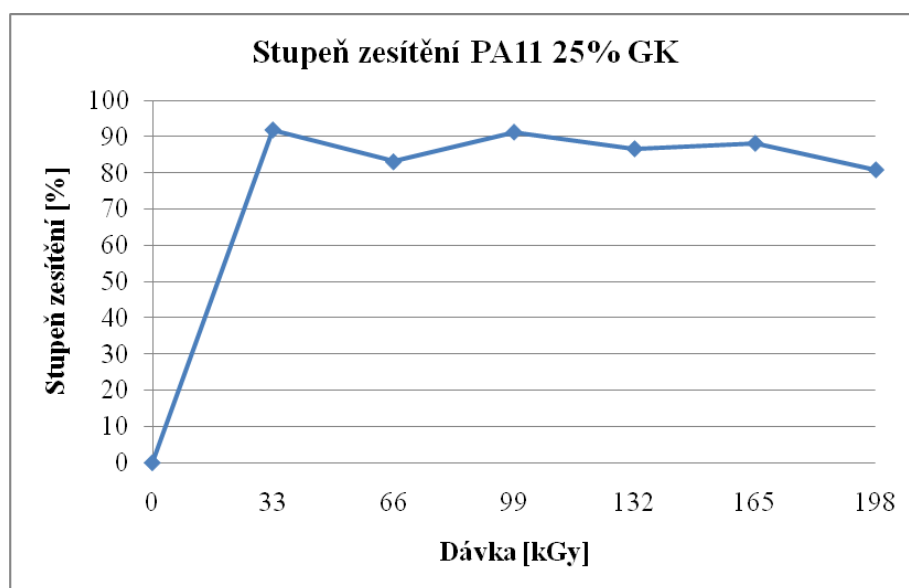
c) Materiál PA 11 (neplněný a plněný 25% skelných kuliček)

Tab. 20: Stupeň zesítnění jednotlivých dávek ozáření materiálu PA 11

Průjezd zařízením	Požadovaná dávka [kGy]	Stupeň zesítnění [%]	
		neplněný	plněný
1	33	33,2	91,9
2	66	86,9	83,1
3	99	75,8	91,3
4	132	94,0	86,7
5	165	90,7	88,2
6	198	91,4	80,9



Obr. 28: Stupeň zesítnění pro neplněný PA 11

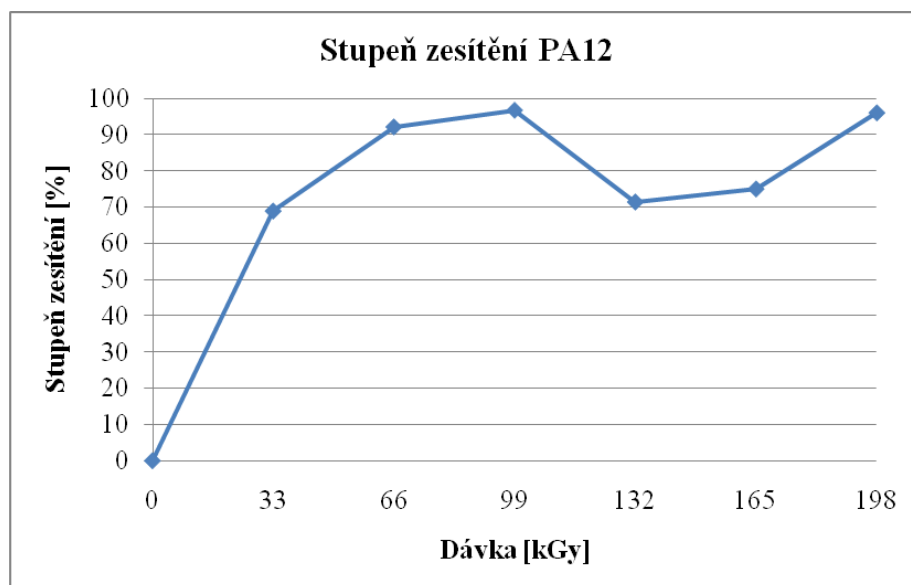


Obr. 29: Stupeň zesítnění pro PA 11 plněný 25% skelných kuliček

d) Materiál PA 12

Tab. 21: Stupeň zesítnění jednotlivých dávek ozáření materiálu PA 12

Průjezd zařízením	Požadovaná dávka [kGy]	Stupeň zesítnění [%]
1	33	68,9
2	66	92,1
3	99	96,7
4	132	71,4
5	165	75,0
6	198	96,0

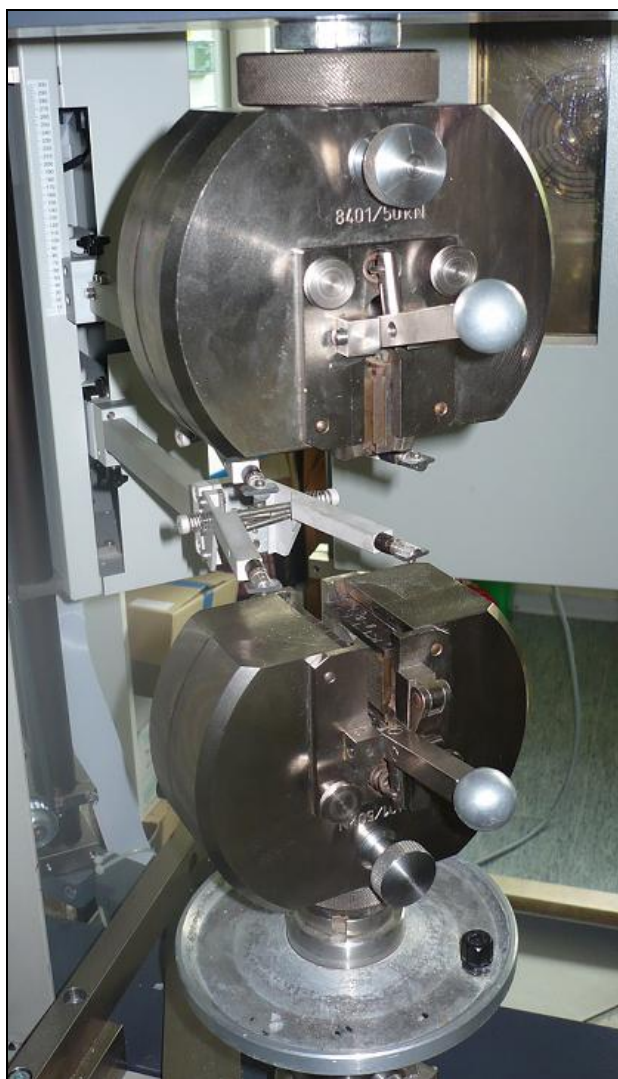


Obr. 30: Stupeň zesítnění pro materiál PA 12

9 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Pro provedení zkoušky byl použit zkušební stroj ZWICK ROELL 1456. Měření probíhala při dvou různých teplotách, pokojové teplotě 23°C a zvýšené teplotě 80°C. Zkušební tělesa byla namáhána jednoosým tahem, přičemž pro získání modulu pružnosti byla rychlost posuvu čelistí nastavena na 1mm.min⁻¹. Po jeho stanovení se rychlost posuvu čelistí zvýšila na 100mm.min⁻¹. Pro každou dávku ozáření byla testována série deseti kusů zkušebních těles.

Díky osobnímu počítači, který je součástí stroje, byla naměřená data každého materiálu uspořádána do tabulek pro jednotlivé hodnoty dávek ozáření. Také byla okamžitě graficky znázorněna závislost zatěžujícího napětí na poměrném prodloužení.



Obr. 31: Čelisti zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456

9.1 Vyhodnocování výsledků

Zpracování výsledků měření proběhlo s použitím těchto vztahů statistického vyhodnocování:

1. **Aritmetický průměr (výběrový)**... \bar{x} ...vyjadřuje typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Je to součet všech hodnot vydělený jejich počtem: [12]

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

2. **Rozptyl**... s^2 ...je definován jako střední hodnota kvadrátů odchylek od střední hodnoty. [12]

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cdot \bar{x}^2) \quad (6)$$

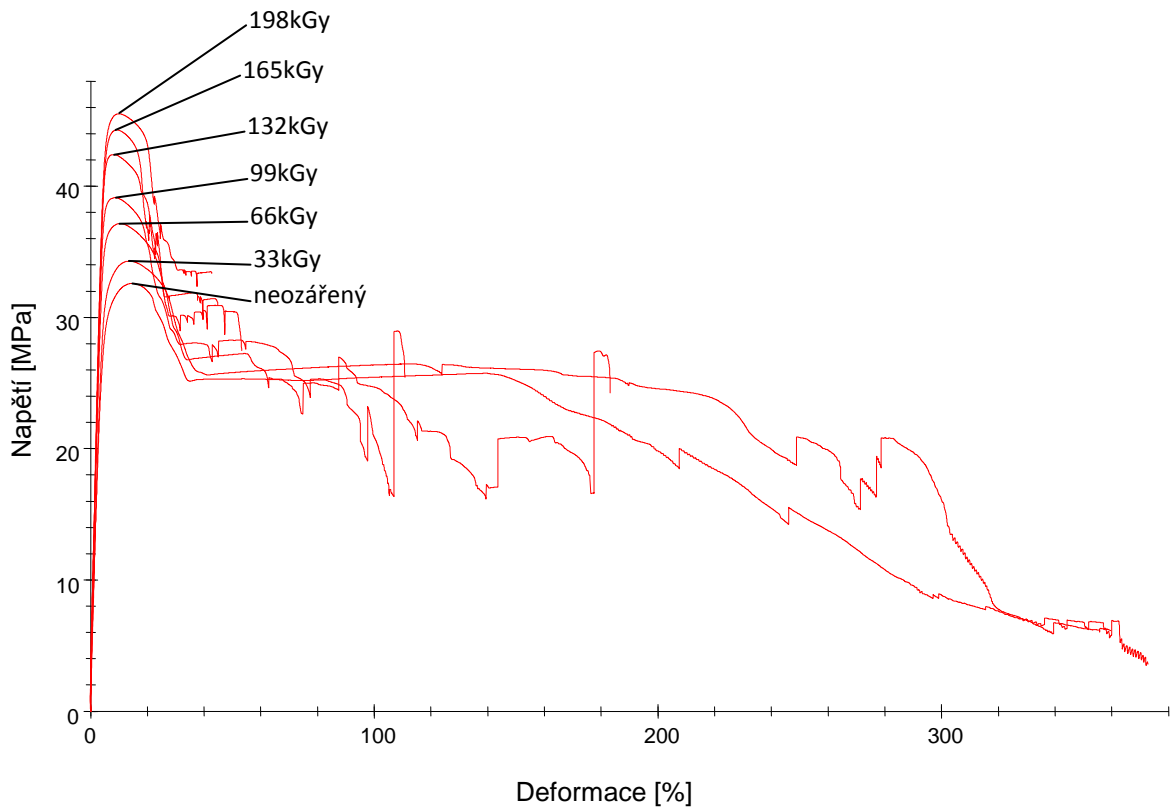
3. **Směrodatná odchylka**... s ...je kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru. Vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel. [12]

$$s = \sqrt{s^2} \quad (7)$$

4. **Střední kvadratická chyba aritmetického průměru**... σ ...má využití pro hodnocení přesnosti měření. Vychází ze směrodatné odchylky „ s “ podělené druhou odmocninou z počtu měření „ n “. [12]

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

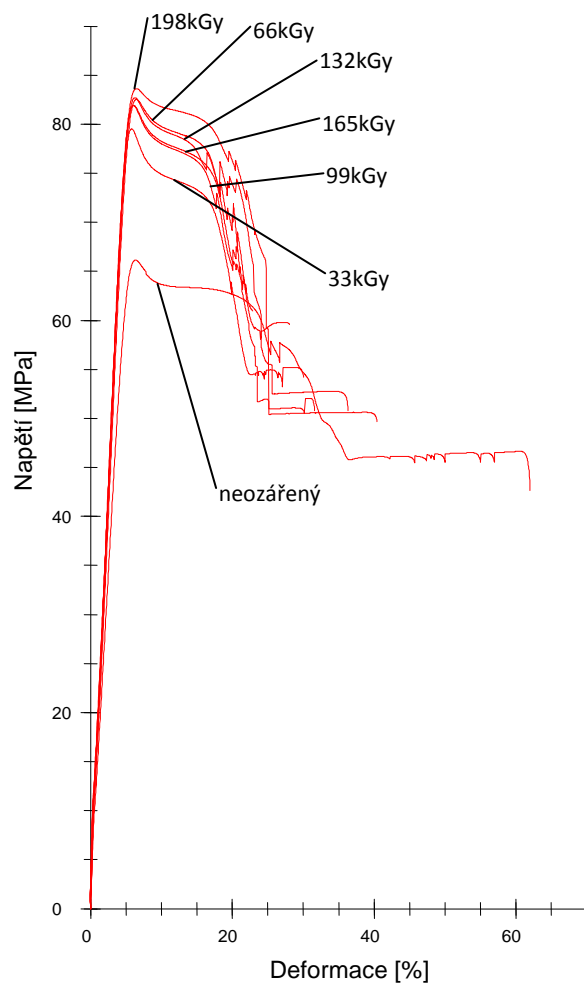
9.2 Zkouška tahem za teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$



Obr. 32: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ - PBT

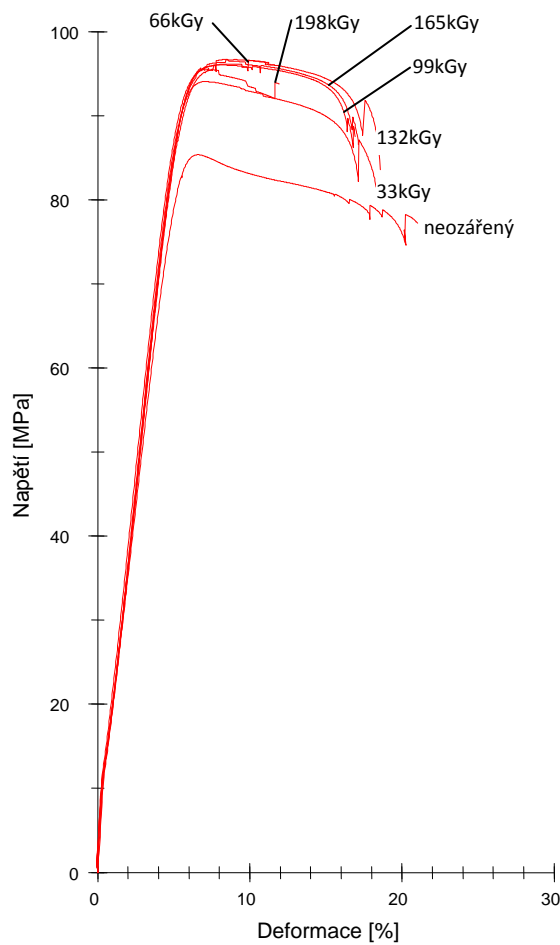
Tab. 22: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PBT

		PBT; $T = 23^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	32,6	34,28	37,15	39,12	42,4	44,28	45,52
	s	0,73	0,58	0,78	1,03	0,85	0,88	0,74
	σ	0,21	0,18	0,25	0,33	0,27	0,28	0,23
E [MPa]	\bar{x}	1089,54	1127,02	1392,92	1534,05	1669,93	1697,49	1718,91
	s	39,32	49,19	70,87	88,98	77,12	68,14	81,43
	σ	11,35	15,56	22,41	28,14	24,39	21,55	25,75
ε_M [%]	\bar{x}	14,76	13,5	10,41	8,65	8,25	9,25	9,91
	s	1,03	0,47	0,45	0,27	0,19	0,29	0,27
	σ	0,30	0,15	0,14	0,09	0,06	0,09	0,09
ε_{F_m} [mm]	\bar{x}	2,95	2,71	2,09	1,73	1,65	1,85	1,99
	s	0,21	0,09	0,09	0,05	0,04	0,06	0,05
	σ	0,06	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	13,84	12,4	9,67	8,11	7,77	8,7	9,25
	s	0,73	0,43	0,41	0,23	0,17	0,27	0,25
	σ	0,21	0,14	0,13	0,07	0,05	0,09	0,08


 Obr. 33: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 6

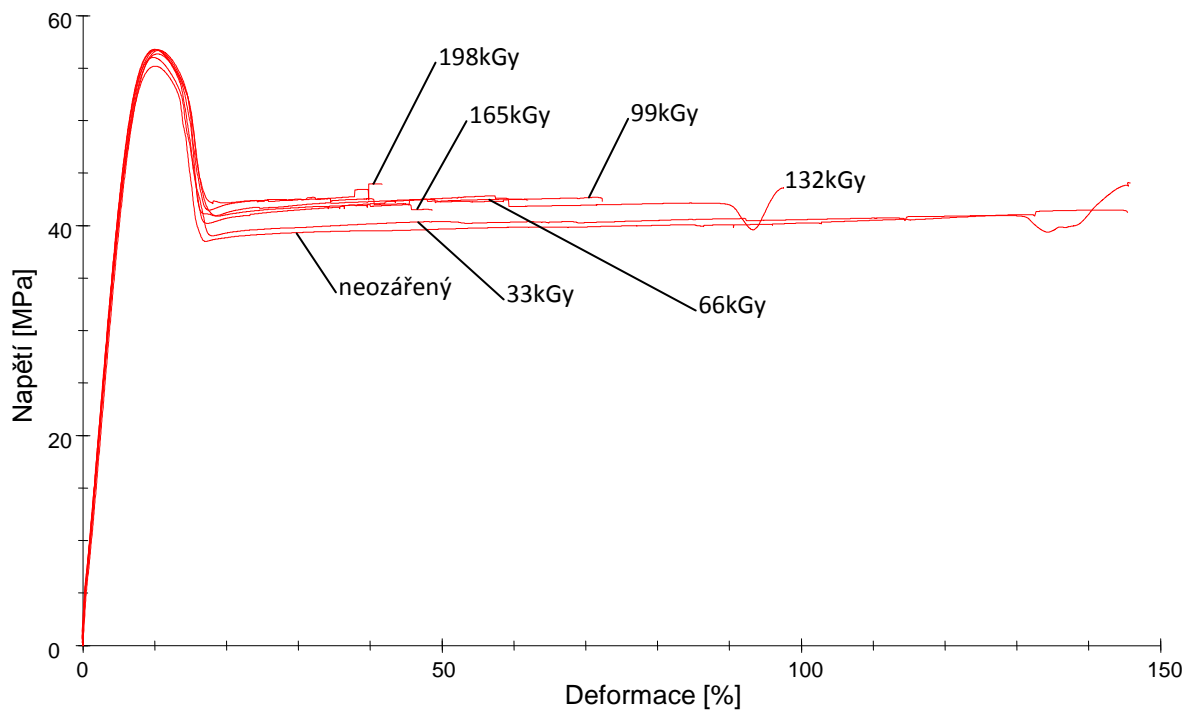
Tab. 23: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6

		PA 6; $T = 23^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	66,16	79,54	81,84	82,72	82,05	82,83	83,76
	s	1,73	0,31	0,39	0,37	2,91	2,77	2,27
	σ	0,50	0,10	0,12	0,12	0,92	0,88	0,72
E [MPa]	\bar{x}	2355,03	3079,54	2772,26	2833,3	2863,89	2906,76	3068,86
	s	93,03	186,91	284,68	175,6	316,8	256,47	333,61
	σ	26,86	59,11	90,02	55,53	100,18	81,10	105,50
\mathcal{E}_M [%]	\bar{x}	6,33	5,72	6,02	6,21	6,15	6,36	6,57
	s	0,17	0,06	0,22	0,06	0,21	0,33	0,29
	σ	0,05	0,02	0,07	0,02	0,07	0,10	0,09
\mathcal{E}_{F_m} [mm]	\bar{x}	1,27	1,15	1,21	1,24	1,23	1,28	1,32
	s	0,03	0,01	0,04	0,01	0,04	0,06	0,06
	σ	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	6,16	5,66	5,91	6,11	6,1	6,33	6,49
	s	0,16	0,04	0,19	0,07	0,21	0,34	0,33
	σ	0,05	0,01	0,06	0,02	0,07	0,11	0,10


 Obr. 34: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 6.6

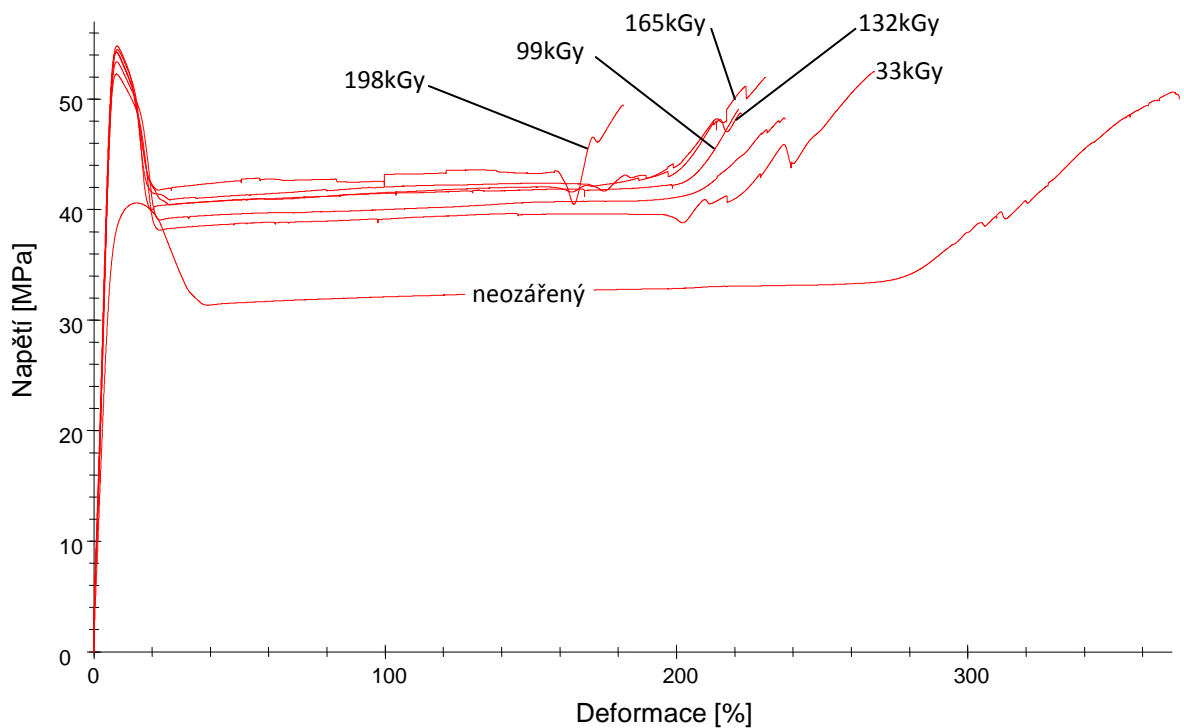
Tab. 24: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6.6

		PA 6.6; $T = 23^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	82,28	90,99	93,2	91,65	93,11	96,03	95,52
	s	5,84	8,28	3,95	8,97	6,68	1,81	2,14
	σ	1,69	2,62	1,25	2,84	2,11	0,57	0,68
E [MPa]	\bar{x}	3180,15	3106,18	3357,16	3201,64	3313,02	3293,98	3561,97
	s	170,51	349,36	455,23	282,93	287,77	335,8	229,2
	σ	49,22	110,48	143,96	89,47	91,00	106,19	72,48
\mathcal{E}_M [%]	\bar{x}	6,07	6,56	7,17	7,24	7,36	8,2	7,13
	s	0,91	1,17	1,37	1,79	1,63	0,86	0,73
	σ	0,26	0,37	0,43	0,57	0,52	0,27	0,23
\mathcal{E}_{F_m} [mm]	\bar{x}	1,21	1,32	1,44	1,45	1,47	1,64	1,43
	s	0,18	0,23	0,27	0,36	0,33	0,17	0,15
	σ	0,05	0,07	0,09	0,11	0,10	0,05	0,05
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	6,01	6,54	7,17	7,18	7,23	7,94	7,05
	s	0,82	1,04	1,2	1,64	1,44	0,78	0,65
	σ	0,24	0,33	0,38	0,52	0,46	0,25	0,21

Obr. 35: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 11

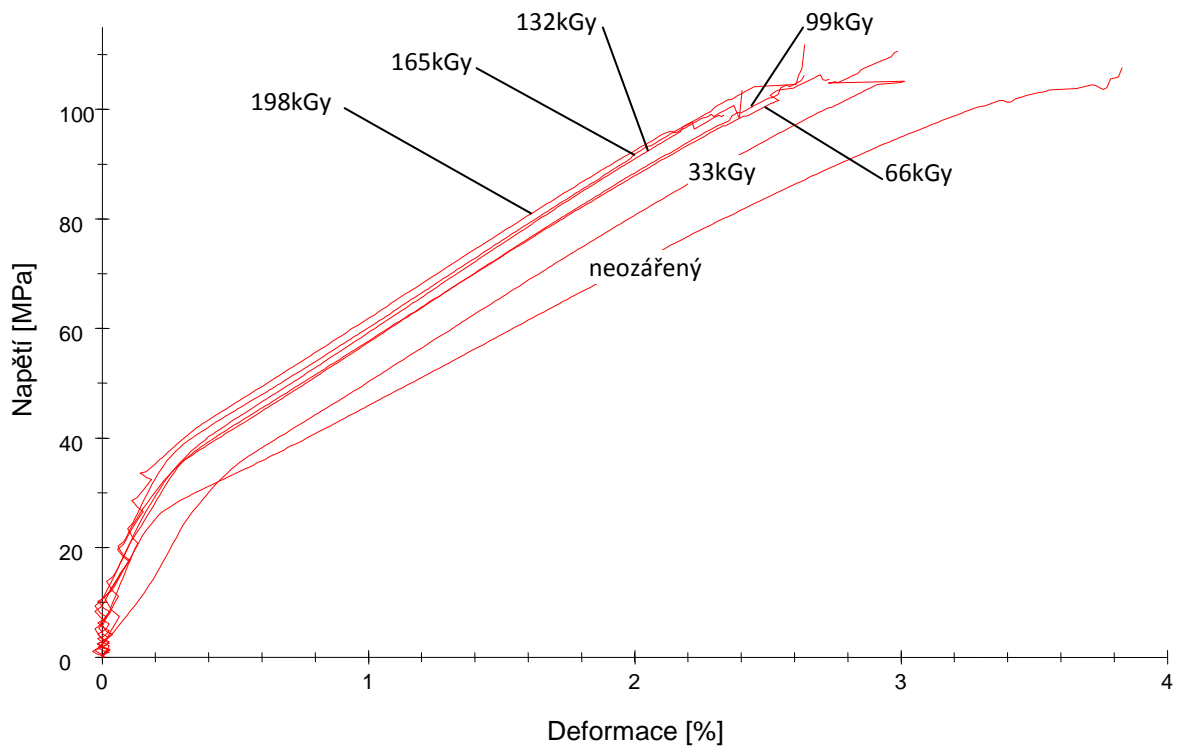
Tab. 25: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 11

		PA 11; $T = 23^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	55,18	56,01	56,77	56,76	56,76	56,69	56,35
	s	0,21	0,45	0,42	0,27	0,3	0,53	0,41
	σ	0,06	0,14	0,13	0,09	0,09	0,17	0,13
E [MPa]	\bar{x}	1418,7	1490,81	1530,43	1515,32	1509,74	1517,62	1500,49
	s	31,74	33,62	50,65	28,4	67,31	28,75	92,85
	σ	9,16	10,63	16,02	8,98	21,29	9,09	29,36
ε_M [%]	\bar{x}	10,18	9,92	10,07	10,13	10,27	10,48	10,4
	s	0,08	0,11	0,15	0,11	0,19	0,14	0,15
	σ	0,02	0,03	0,05	0,03	0,06	0,04	0,05
ε_{F_m} [mm]	\bar{x}	2,04	1,99	2,02	2,03	2,06	2,1	2,08
	s	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,03
	σ	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	9,46	9,32	9,42	9,47	9,61	9,8	9,74
	s	0,08	0,11	0,13	0,1	0,19	0,15	0,15
	σ	0,02	0,03	0,04	0,03	0,06	0,05	0,05

Obr. 36: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 12

Tab. 26: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 12

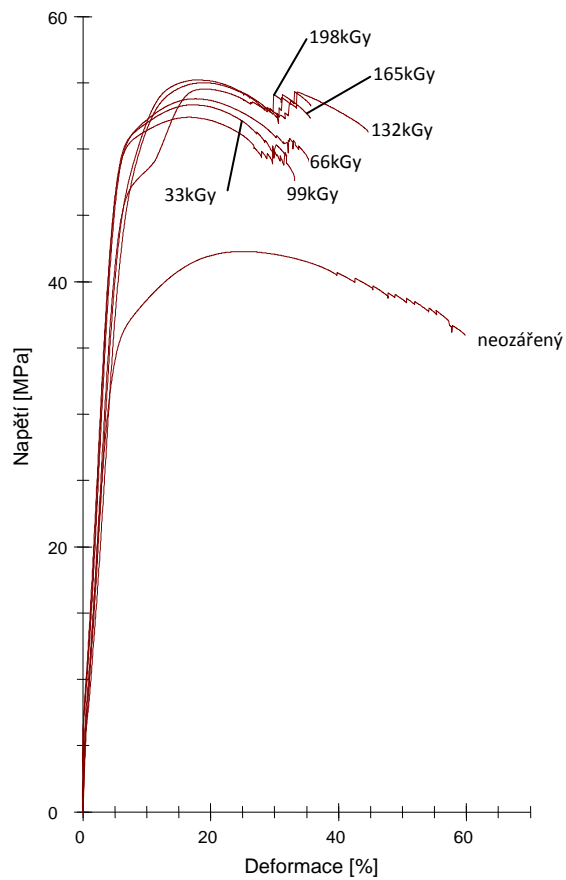
		PA 12; $T = 23^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	48,15	52,3	53,39	54,27	54,25	54,47	54,84
	s	3,32	0,38	0,31	0,47	0,4	0,29	0,67
	σ	0,96	0,12	0,10	0,15	0,13	0,09	0,21
E [MPa]	\bar{x}	1053,7	1615,4	1634,74	1691,59	1731,19	1795,01	1839,13
	s	31,49	74,96	134,18	148,86	166,86	143,7	90,73
	σ	9,09	23,70	42,43	47,07	52,77	45,44	28,69
ε_M [%]	\bar{x}	327,63	33,83	7,79	7,68	7,83	8,09	7,97
	s	100,03	82,27	0,18	0,1	0,22	0,16	0,29
	σ	28,88	26,02	0,06	0,03	0,07	0,05	0,09
ε_{F_m} [mm]	\bar{x}	65,53	6,77	1,56	1,54	1,57	1,62	1,6
	s	20,01	16,45	0,04	0,02	0,05	0,03	0,06
	σ	5,78	5,20	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	295,12	30,91	7,51	7,37	7,52	7,78	7,72
	s	90,03	74,02	0,17	0,11	0,21	0,16	0,26
	σ	25,99	23,41	0,05	0,03	0,07	0,05	0,08



Obr. 37: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 6.6 plněný 25% skelných vláken

Tab. 27: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6.6 25% GF

		PA 6.6 25% GF; $T = 23^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	103,25	106,49	103,3	102,59	101,83	103	96,81
	s	2,27	4,19	4,19	5,55	5,53	5,88	6,09
	σ	0,66	1,32	1,32	1,76	1,75	1,86	1,93
E [MPa]	\bar{x}	8756,06	9550,61	10393,45	9819,31	10695,76	10506,07	11103,57
	s	510,95	448,3	617,03	786,61	1172,88	1052,78	704,08
	σ	147,50	141,76	195,12	248,75	370,90	332,92	222,65
ε_M [%]	\bar{x}	3,6	2,94	2,63	2,63	2,53	2,48	2,26
	s	0,18	0,19	0,16	0,15	0,14	0,14	0,19
	σ	0,05	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,06
ε_{F_m} [mm]	\bar{x}	0,72	0,59	0,53	0,53	0,51	0,5	0,46
	s	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
	σ	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	4,31	3,8	3,78	3,72	3,79	3,76	3,81
	s	0,16	0,18	0,13	0,11	0,08	0,14	0,22
	σ	0,05	0,06	0,04	0,03	0,03	0,04	0,07

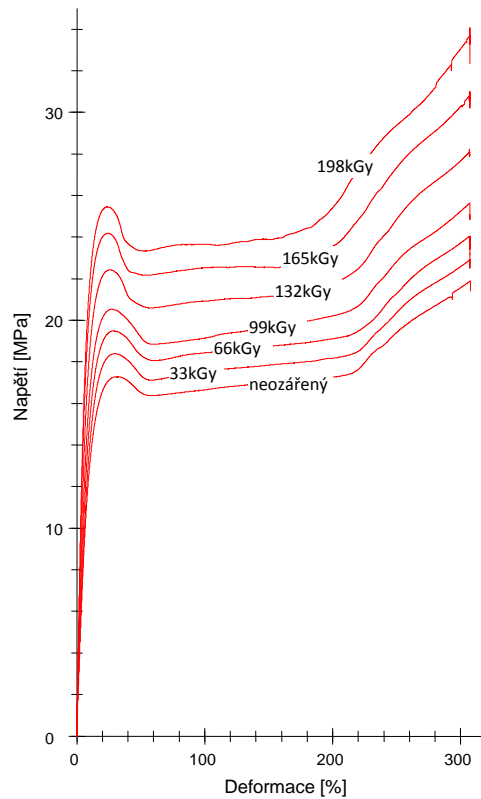


Obr. 38: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 11 plněný 25% skelných kuliček

Tab. 28: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 11 25% GK

		PA 11 25% GK; $T = 23^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	42,28	53,34	53,79	52,4	54,82	55,31	55,1
	s	0,4	0,34	0,37	1,48	0,39	0,3	1,12
	σ	0,12	0,11	0,12	0,47	0,12	0,09	0,35
E [MPa]	\bar{x}	1356,65	2191,69	2271,48	2194,45	2299,57	2110,1	1931,86
	s	43,94	277,75	189,73	270,25	387,89	261,38	249,92
	σ	12,68	87,83	60,00	85,46	122,66	82,66	79,03
\mathcal{E}_M [%]	\bar{x}	24,82	17,21	17,65	16,89	18,39	17,7	18,43
	s	0,89	0,37	0,28	0,36	3,44	1,87	2,16
	σ	0,26	0,12	0,09	0,11	1,09	0,59	0,68
\mathcal{E}_{F_m} [mm]	\bar{x}	4,96	3,45	3,53	3,38	3,68	3,54	3,69
	s	0,18	0,07	0,06	0,07	0,69	0,38	0,43
	σ	0,05	0,02	0,02	0,02	0,22	0,12	0,14
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	22,6	16,22	16,61	15,88	17,32	16,68	18,15
	s	0,8	0,35	0,31	0,37	3,19	1,82	2,74
	σ	0,23	0,11	0,10	0,12	1,01	0,58	0,87

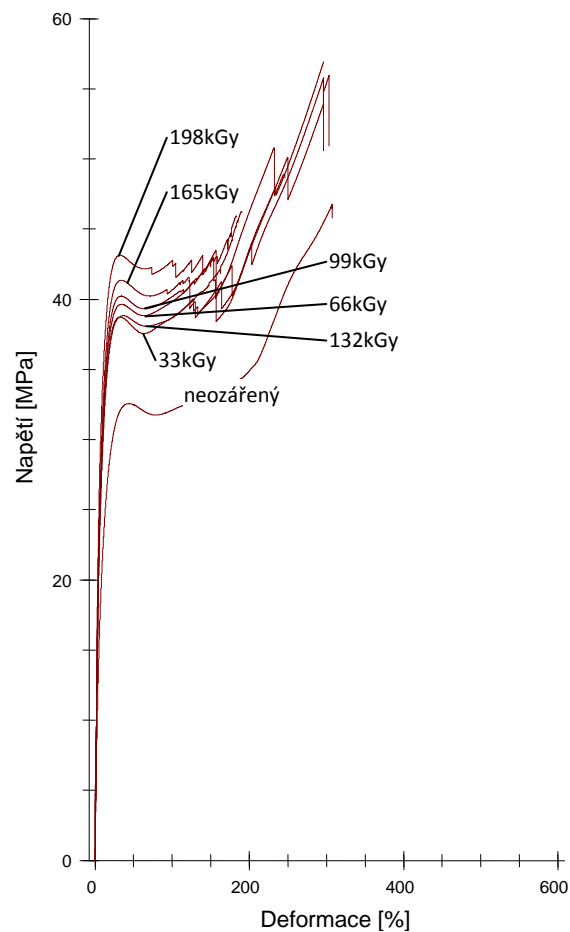
9.3 Zkouška tahem za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$



Obr. 39: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PBT

Tab. 29: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PBT

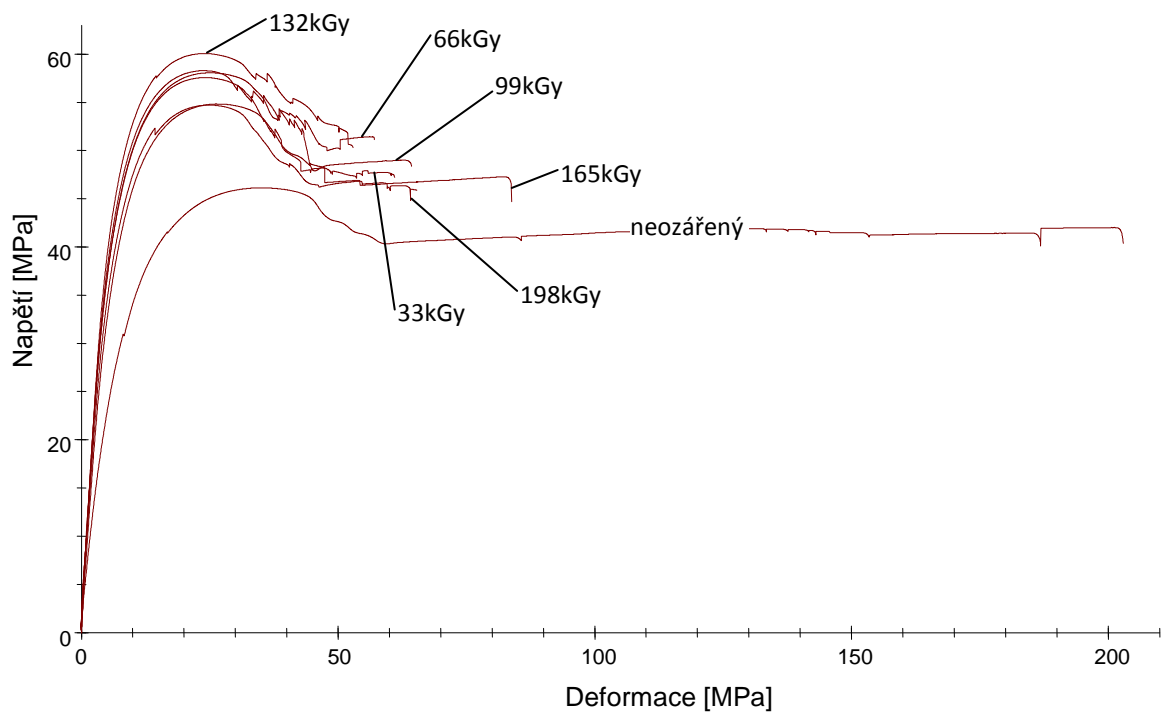
		PBT; $T = 80^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_{300} [MPa]	\bar{x}	21,71	22,91	24,05	25,64	28,1	30,65	22,6
	s	0,63	0,57	0,32	0,61	0,35	0,55	0,8
	σ	0,20	0,18	0,10	0,19	0,11	0,17	0,52
E [MPa]	\bar{x}	234,74	237,65	285,26	266,02	458,46	527,62	354,72
	s	36,94	26,88	57,38	22,25	94,68	221,47	21,92
	σ	11,68	8,50	18,15	7,04	29,94	70,03	6,93
\mathcal{E}_M [%]	\bar{x}	305,87	307,34	307,28	307,35	307,17	305,15	287,89
	s	5,42	0,08	0,12	0,05	0,13	3,39	18,14
	σ	1,71	0,03	0,04	0,02	0,04	1,07	5,74
\mathcal{E}_{F_m} [mm]	\bar{x}	61,19	61,48	61,46	61,48	61,43	61,03	57,59
	s	1,08	0,02	0,03	0,01	0,03	0,68	3,63
	σ	0,34	0,01	0,01	0,00	0,01	0,22	1,15
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	275,36	276,7	276,7	276,71	276,72	274,97	259,18
	s	4,9	0,02	0,02	0,02	0,01	2,99	16,32
	σ	1,55	0,01	0,01	0,01	0,00	0,95	5,16

Obr. 40: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PA 6

Tab. 30: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6

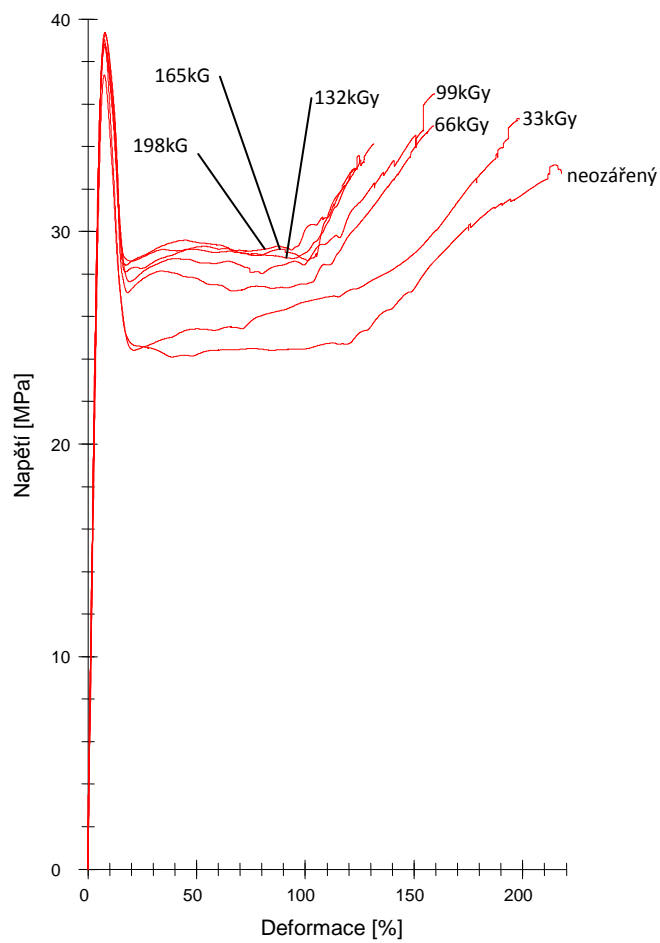
		PA 6; $T = 80^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_{100} [MPa]	\bar{x}	32	38,5	39,8	40,1	38,5	40,8	42,5
E [MPa]	\bar{x}	491,01	670,34	671,81	699,58	682,66	734,79	810,58
	s	68,76	31,37	43,53	75,04	126,09	99,67	170,44
	σ	21,74	9,92	13,77	23,73	39,87	31,52	53,90
ε_M [%]	\bar{x}	307,53*	160,58	153,79	154,1	240,92	146,01	142,04
	s	0,06	21,9	17,81	47,96	75,63	76,34	74,12
	σ	0,02	6,93	5,63	15,17	23,92	24,14	23,44
ε_{F_m} [mm]	\bar{x}	61,51*	32,12	30,76	30,83	48,19	29,21	28,41
	s	0,01	4,38	3,56	9,59	15,13	15,27	14,82
	σ	0,00	1,39	1,13	3,03	4,78	4,83	4,69
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	276,94*	144,69	138,59	138,88	217,04	131,62	128,05
	s	0,01	19,72	16,03	43,16	68,04	68,7	66,69
	σ	0,00	6,24	5,07	13,65	21,52	21,72	21,09

* hodnoty odečtené po dosažení maximálního rozpětí stroje

Obr. 41: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PA 6.6

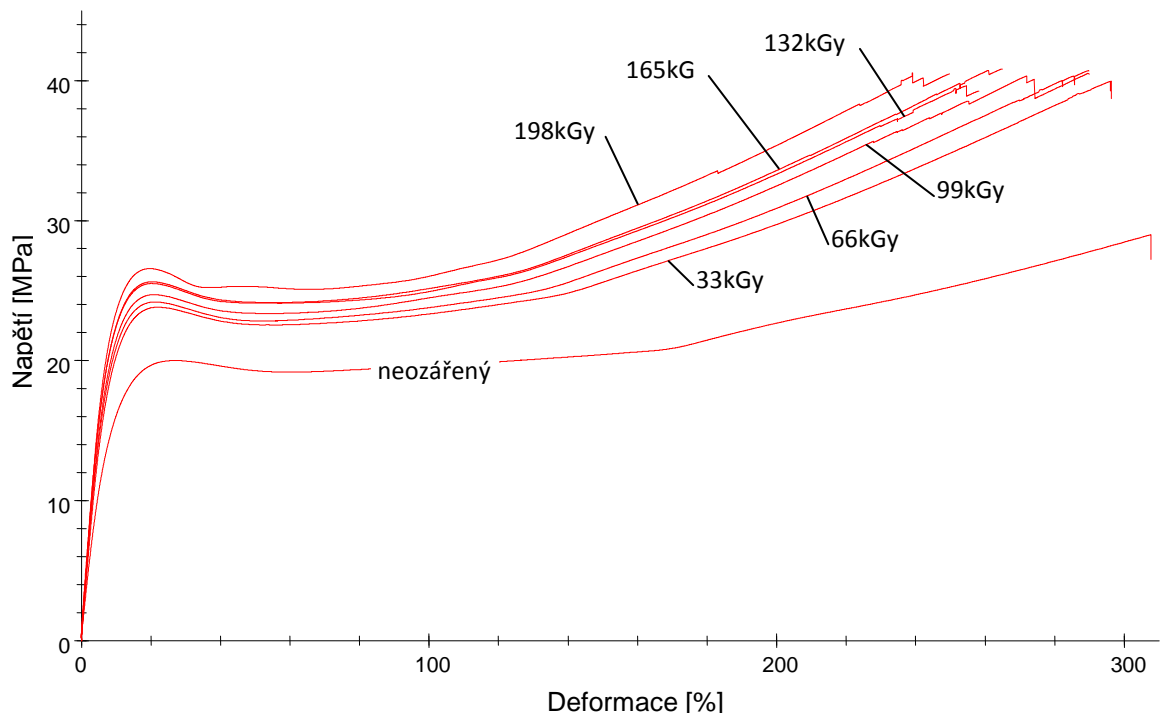
Tab. 31: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6.6

		PA 6.6; $T = 80^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	45,86	54,83	58,07	58,31	60,04	57,59	55,15
	s	1,14	0,48	1,36	1,37	1,32	3,12	2,46
	σ	0,36	0,15	0,43	0,43	0,42	0,99	0,78
E [MPa]	\bar{x}	770,02	1073,22	1218,77	1229,48	1332,71	1245,57	1128,51
	s	93,64	62,66	73,52	47,17	88,91	131,38	129,03
	σ	29,61	19,81	23,25	14,92	28,12	41,55	40,80
ε_M [%]	\bar{x}	33,34	26,62	25,22	24,11	22,82	24,16	23,87
	s	6,31	0,96	0,16	1,15	2,96	1,17	3,45
	σ	2,00	0,30	0,05	0,36	0,94	0,37	1,09
ε_{F_m} [mm]	\bar{x}	6,67	5,33	5,05	4,83	4,57	4,84	4,78
	s	1,26	0,19	0,03	0,23	0,59	0,23	0,69
	σ	0,40	0,06	0,01	0,07	0,19	0,07	0,22
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	30,2	24,2	22,98	21,99	20,82	22,02	21,74
	s	5,69	0,84	0,14	1,03	2,66	1,03	3,1
	σ	1,80	0,27	0,04	0,33	0,84	0,33	0,98


 Obr. 42: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PA 11

Tab. 32: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 11

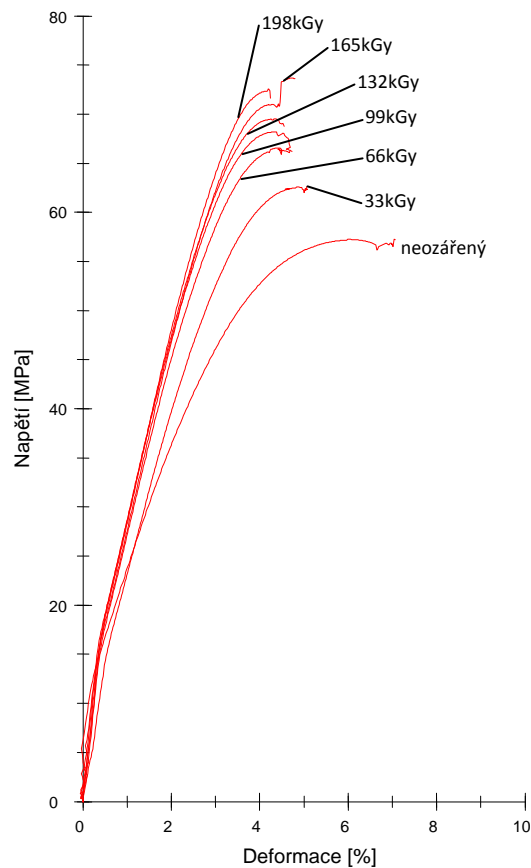
		PA 11; $T = 80^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	37,42	39,03	38,68	39,37	39,26	38,78	38,82
	s	1,62	1,5	0,53	0,95	0,82	0,73	0,7
	σ	0,51	0,47	0,17	0,30	0,26	0,23	0,22
E [MPa]	\bar{x}	994,7	1050,4	1035,18	1041,19	1004,94	993,61	1063,56
	s	46,28	61,37	45,76	68,05	84,95	61,02	74,04
	σ	14,64	19,41	14,47	21,52	26,86	19,30	23,41
\mathcal{E}_M [%]	\bar{x}	7,43	7,43	7,65	7,76	7,88	7,82	7,77
	s	0,24	0,14	0,15	0,18	0,16	0,2	0,12
	σ	0,08	0,04	0,05	0,06	0,05	0,06	0,04
\mathcal{E}_{F_m} [mm]	\bar{x}	1,49	1,49	1,53	1,56	1,58	1,57	1,56
	s	0,05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02
	σ	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	6,89	6,87	7,08	7,19	7,28	7,23	7,2
	s	0,29	0,12	0,13	0,15	0,15	0,19	0,11
	σ	0,09	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,03

Obr. 43: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PA 12

Tab. 33: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 12

		PA 12; $T = 80^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_{200} [MPa]	\bar{x}	22,7	29,6	30,7	32,2	33,1	33,6	35,2
	s							
E [MPa]	\bar{x}	295,82	329,3	332,85	327,17	375,74	382,31	371,69
	s	16,36	37,44	46,81	33,05	28,98	27,38	46,41
	σ	5,17	11,84	14,80	10,45	9,16	8,66	14,68
ε_M [%]	\bar{x}	307,61*	287,43	274,53	253,37	244,71	245,42	230,56
	s	0,02	8,13	9,4	19,89	9,74	17,07	18,38
	σ	0,01	2,57	2,97	6,29	3,08	5,40	5,81
ε_{F_m} [mm]	\bar{x}	61,53*	57,49	54,91	50,68	48,95	49,09	46,12
	s	0	1,63	1,88	3,98	1,95	3,41	3,68
	σ	0,00	0,52	0,59	1,26	0,62	1,08	1,16
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	276,92*	258,78	247,16	228,1	220,38	221	207,58
	s	0,02	7,32	8,44	17,92	8,77	15,35	16,55
	σ	0,01	2,31	2,67	5,67	2,77	4,85	5,23

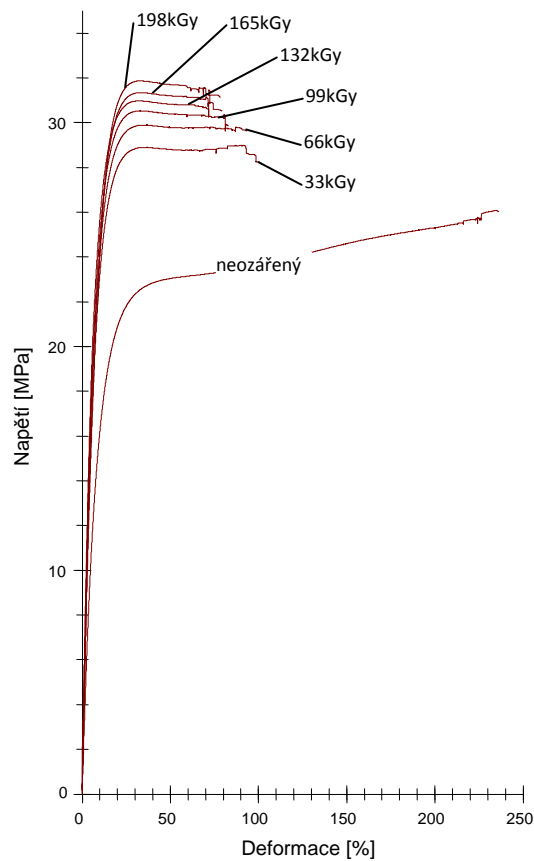
* hodnoty odečtené po dosažení maximálního rozpětí stroje



Obr. 44: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ – PA 6.6 plněný 25% skelných vláken

Tab. 34: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6.6 25% GF

		PA 6.6 25% GF; $T = 80^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	57,17	62,61	66,48	68,18	69,56	71,16	72,33
	s	0,65	1,27	0,67	0,7	0,73	1,16	0,61
	σ	0,21	0,40	0,21	0,22	0,23	0,37	0,19
E [MPa]	\bar{x}	3431,64	4087,01	4471,88	4737,01	4919,2	4749,31	5119,06
	s	226,19	237,06	301,98	146,89	293,29	550,38	313,83
	σ	71,53	74,96	95,49	46,45	92,75	174,05	99,24
ε_M [%]	\bar{x}	6,13	4,77	4,41	4,29	4,23	4,24	4,06
	s	0,09	0,12	0,08	0,05	0,11	0,18	0,1
	σ	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,06	0,03
ε_{F_m} [mm]	\bar{x}	1,23	0,96	0,88	0,86	0,85	0,85	0,81
	s	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02
	σ	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	6,05	5	4,69	4,65	4,65	4,77	4,62
	s	0,08	0,1	0,06	0,07	0,1	0,32	0,16
	σ	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,10	0,05



Obr. 45: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ – PA 11 plněný 25% skelných kuliček

Tab. 35: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 11 25% GK

		PA 11 25% GK; $T = 80^{\circ}\text{C}$						
		neozářený	33kGy	66kGy	99kGy	132kGy	165kGy	198kGy
σ_M [MPa]	\bar{x}	25,57	28,96	29,9	30,54	30,98	31,37	31,9
	s	0,26	0,51	0,27	0,4	0,47	0,47	0,46
	σ	0,08	0,16	0,09	0,13	0,15	0,15	0,15
E [MPa]	\bar{x}	301,31	485,71	499,06	527,56	566,72	541,31	595,47
	s	10,82	76,55	50,48	68,53	58,94	79,18	130,86
	σ	3,42	24,21	15,96	21,67	18,64	25,04	41,38
\mathcal{E}_M [%]	\bar{x}	217,24	57,17	39,62	37,21	31,94	35,57	32,16
	s	10,9	28,9	14,7	14,08	1,16	10,38	2,54
	σ	3,45	9,14	4,65	4,45	0,37	3,28	0,80
\mathcal{E}_{F_m} [mm]	\bar{x}	43,46	11,44	7,93	7,45	6,39	7,12	6,44
	s	2,18	5,78	2,94	2,82	0,23	2,08	0,51
	σ	0,69	1,83	0,93	0,89	0,07	0,66	0,16
ΔL_{σ_m} [mm]	\bar{x}	195,61	51,6	35,82	33,66	28,94	32,18	29,13
	s	9,8	26,03	13,22	12,68	1,05	9,36	2,34
	σ	3,10	8,23	4,18	4,01	0,33	2,96	0,74

10 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

10.1 Materiál PBT

10.1.1 Zkouška tahem za teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$

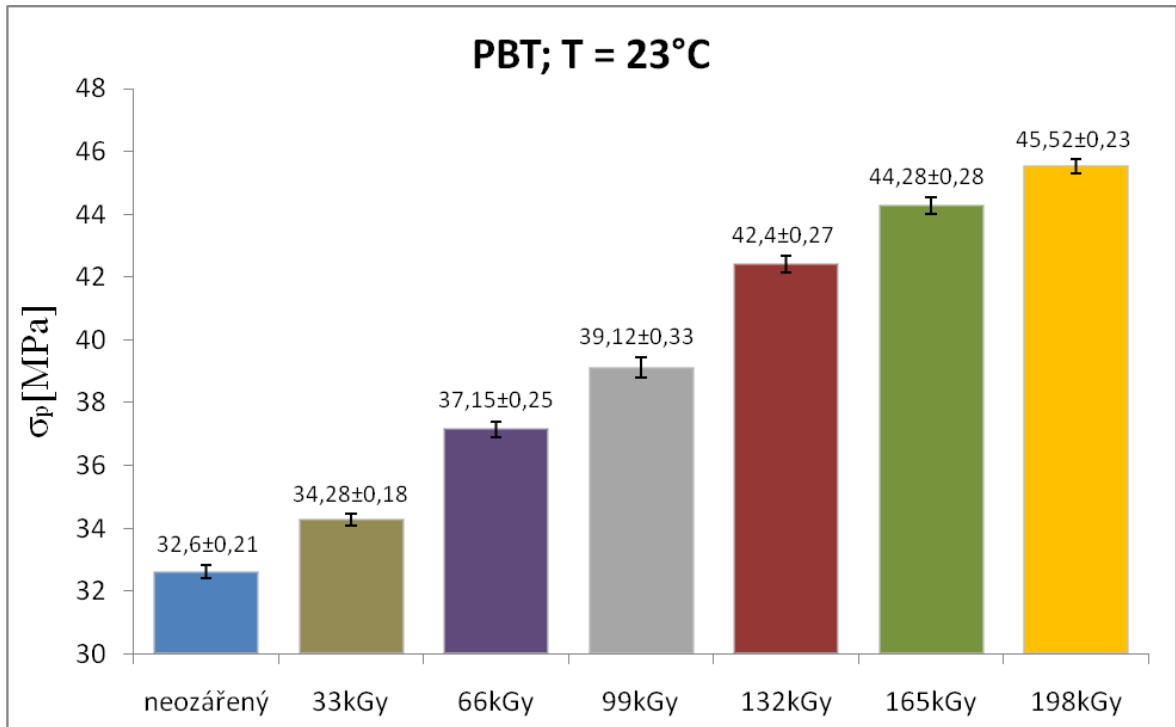
Tab. 36: Výsledné hodnoty PBT

Neozářený		
-	$\sigma_M = 32,6 \pm 0,21 \text{MPa}$	$E = 1090 \pm 11 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 34,28 \pm 0,18 \text{MPa}$	$E = 1127 \pm 16 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 37,15 \pm 0,25 \text{MPa}$	$E = 1393 \pm 22 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 39,12 \pm 0,33 \text{MPa}$	$E = 1534 \pm 28 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 42,4 \pm 0,27 \text{MPa}$	$E = 1670 \pm 24 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 44,28 \pm 0,28 \text{MPa}$	$E = 1697 \pm 22 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 45,52 \pm 0,23 \text{MPa}$	$E = 1719 \pm 26 \text{MPa}$

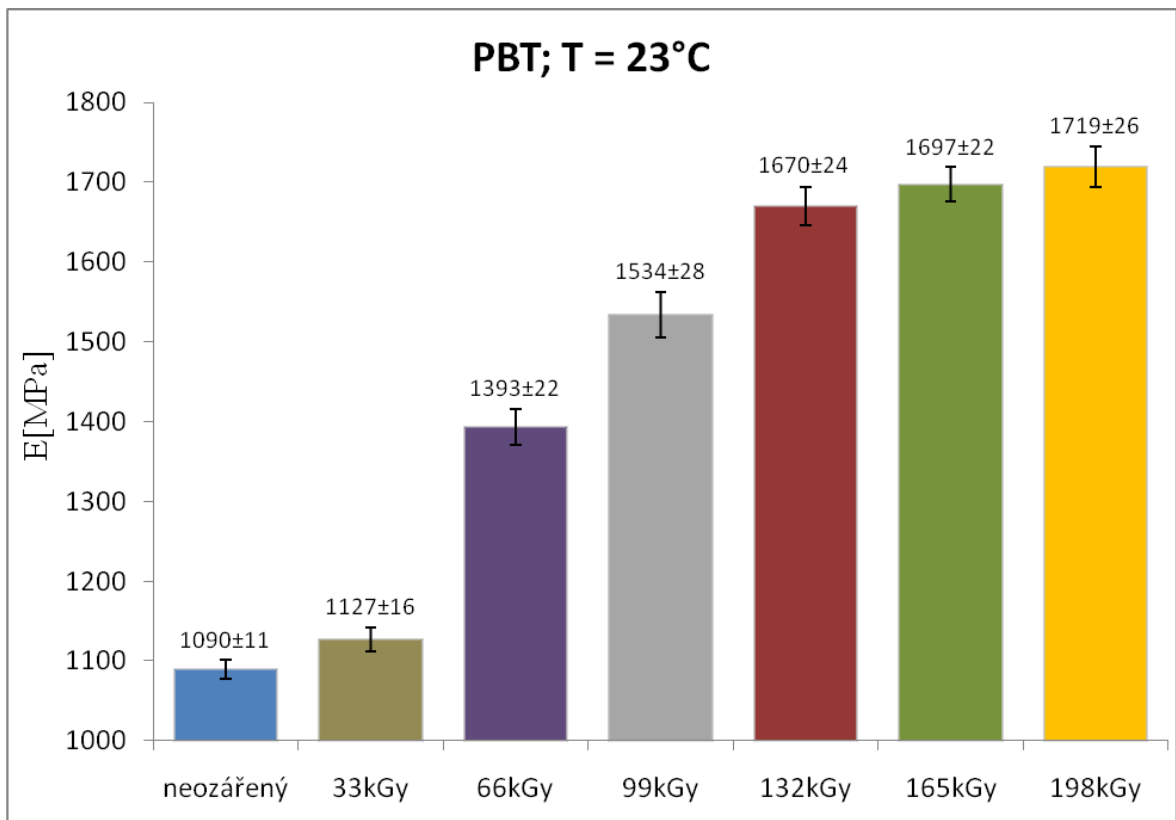
Při porovnání meze pevnosti v tahu neozářených zkušebních těles s tělesy ozářenými je patrné, že u tohoto materiálu mez pevnosti narůstá s velikostí ozařovací dávky (viz Obr. 46). Z původní hodnoty $\sigma_M = 32,6 \pm 0,21 \text{MPa}$ u neozářeného materiálu vzrostla mez pevnosti až na $\sigma_M = 45,52 \pm 0,23 \text{MPa}$ při ozáření dávkou 198 kGy. Ozáření touto dávkou tedy znamenalo nárůst meze pevnosti o bezmála 40%.

Došlo rovněž k nárůstu modulu pružnosti z původní hodnoty $E = 1090 \pm 11 \text{MPa}$ až na hodnotu $E = 1719 \pm 26 \text{MPa}$ (viz Obr. 47), tedy téměř o 58%. Této hodnoty bylo rovněž dosaženo při ozáření zkušebních těles ozařovací dávkou 198 kGy.

Naopak protažení materiálu při přetržení se s rostoucí dávkou ozáření snižovalo z původní hodnoty neozářeného materiálu $\Delta L_B = 58,38 \pm 3,91 \text{mm}$ až na hodnotu $\Delta L_B = 6,43 \pm 0,4 \text{mm}$. To znamená, že tažnost klesla o 89%.



Obr. 46: Porovnání meze pevnosti pro PBT



Obr. 47: Porovnání modulu pružnosti pro PBT

Jako nejvýhodnější dávka ozáření, tedy taková, která nejvíce zvýší mez pevnosti a modul pružnosti daného materiálu, se jeví nejvyšší testovaná dávka 198kGy. U této dávky došlo k navýšení meze pevnosti o 12,48 – 13,36MPa a modul pružnosti vzrostl o 592 – 666MPa.

10.1.2 Zkouška tahem za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$

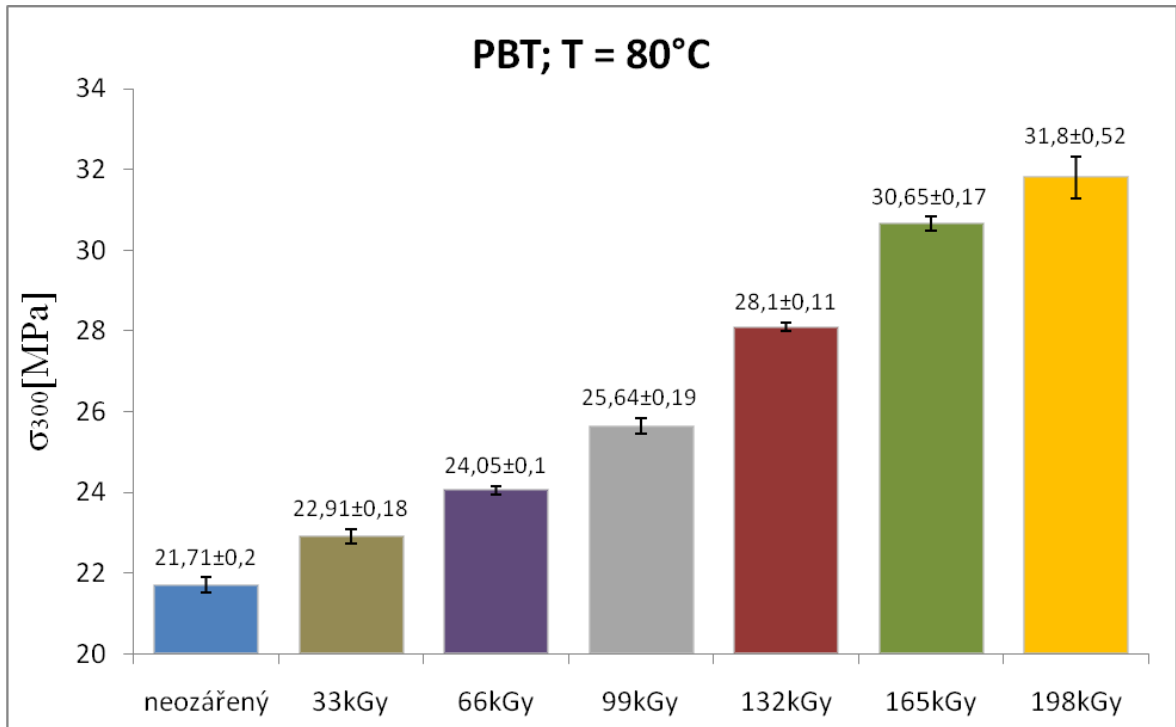
Tab. 37: Výsledné hodnoty PBT

Neozářený		
-	$\sigma_{300} = 21,71 \pm 0,20 \text{MPa}$	$E = 235 \pm 12 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_{300} = 22,91 \pm 0,18 \text{MPa}$	$E = 238 \pm 9 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_{300} = 24,05 \pm 0,10 \text{MPa}$	$E = 285 \pm 18 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_{300} = 25,64 \pm 0,19 \text{MPa}$	$E = 266 \pm 7 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_{300} = 28,1 \pm 0,11 \text{MPa}$	$E = 458 \pm 30 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_{300} = 30,65 \pm 0,17 \text{MPa}$	$E = 528 \pm 70 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_{300} = 31,80 \pm 0,52 \text{MPa}$	$E = 355 \pm 7 \text{MPa}$

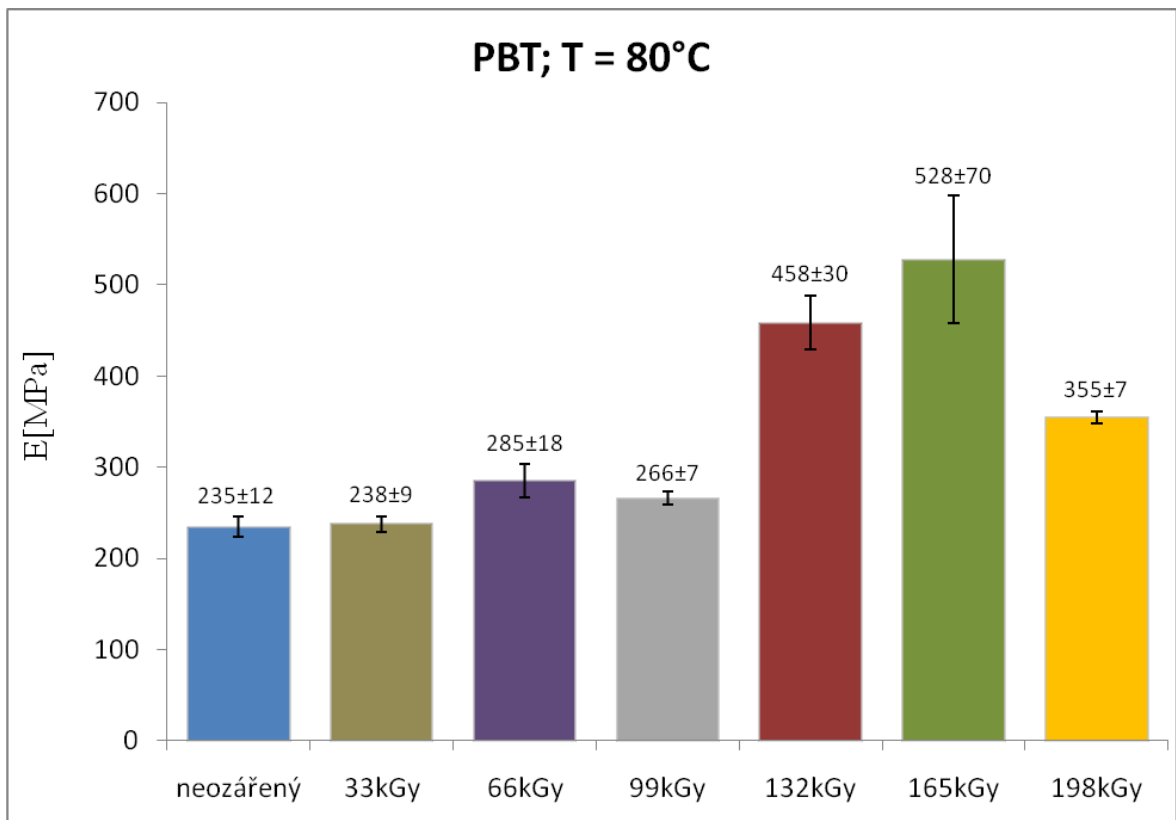
Za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$ nedocházelo u materiálu PBT k přetržení vzorku při rostoucím napětí, proto je posuzována hodnota napětí σ_{300} pro 300% protažení původního tělesa, což bylo maximální protažení, kterého bylo možno dosáhnout při měření v temperační komoře.

Napětí se při zvyšující se dávce ozáření zvyšuje z původní hodnoty $\sigma_{300} = 21,71 \pm 0,20 \text{MPa}$ až na $\sigma_{300} = 31,80 \pm 0,52 \text{MPa}$ při nejvyšší dávce ozáření 198kGy (viz Obr. 48). Dochází tedy k navýšení o bezmála 47%.

U modulu pružnosti došlo k výraznějšímu nárůstu až od dávky ozáření 132kGy (95%). U ozařovací dávky 165kGy bylo dosaženo maximální hodnoty modulu pružnosti, kdy se jeho hodnota $E = 235 \pm 12 \text{MPa}$ zvýšila na $E = 528 \pm 70 \text{MPa}$, což je navýšení téměř o 125% (viz Obr. 49).



Obr. 48: Porovnání napětí pro PBT při protažení 300%



Obr. 49: Porovnání modulu pružnosti pro PBT

Optimální dávka ozáření pro PBT testovaného za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$ byla 165kGy. Mez pevnosti vzrostla o 8,57 – 9,31MPa a modul pružnosti o 211 – 375MPa.

10.2 Materiál PA 6

10.2.1 Zkouška tahem za teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$

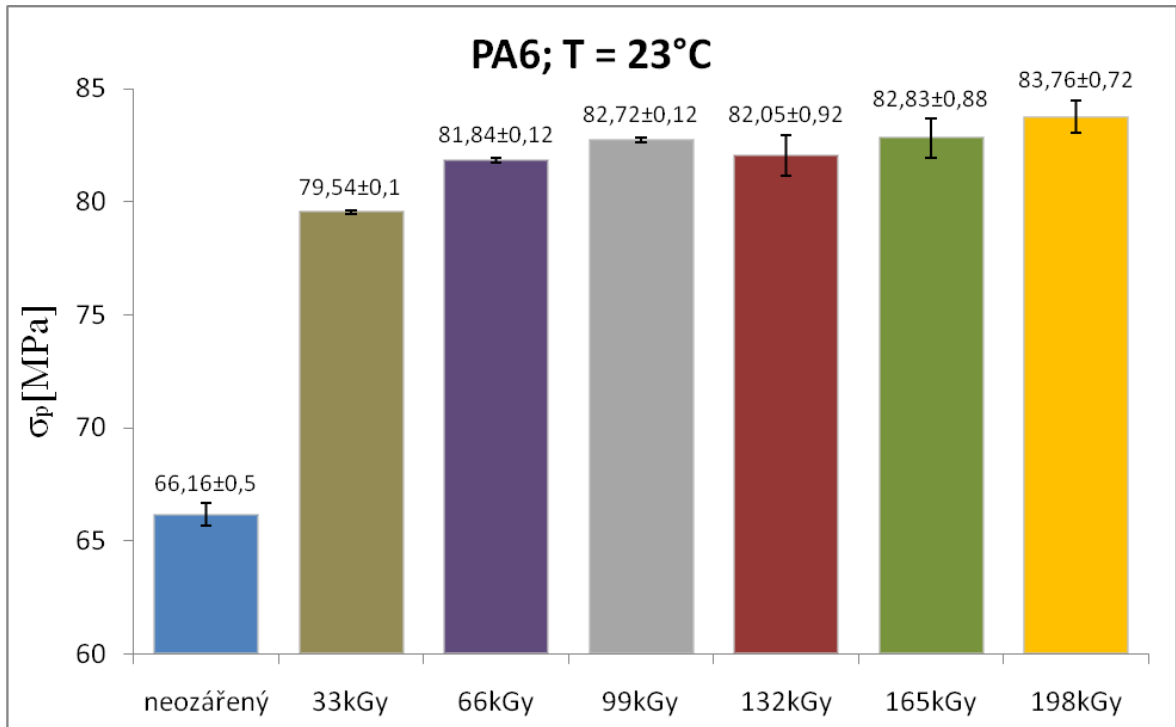
Tab. 38: Výsledné hodnoty PA 6

Neozářený		
-	$\sigma_M = 66,16 \pm 0,50 \text{MPa}$	$E = 2355 \pm 27 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 79,54 \pm 0,10 \text{MPa}$	$E = 3080 \pm 59 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 81,84 \pm 0,12 \text{MPa}$	$E = 2772 \pm 90 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 82,72 \pm 0,12 \text{MPa}$	$E = 2833 \pm 56 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 82,05 \pm 0,92 \text{MPa}$	$E = 2864 \pm 100 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 82,83 \pm 0,88 \text{MPa}$	$E = 2907 \pm 81 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 83,76 \pm 0,72 \text{MPa}$	$E = 3069 \pm 105 \text{MPa}$

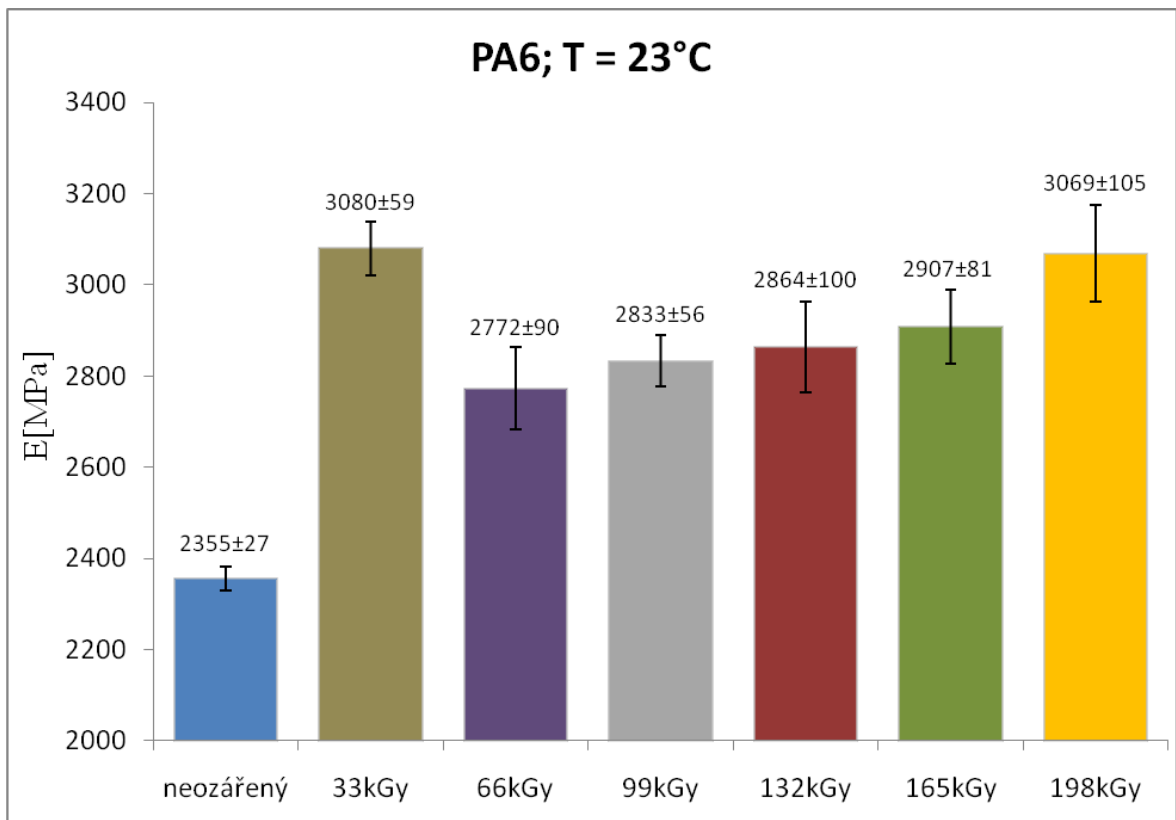
Mez pevnosti daného materiálu značně naroste již při ozáření nejnižší ozařovací dávkou 33kGy. Při zvyšování dávky ozáření dochází již pouze k mírnému nárůstu meze pevnosti (viz Obr. 50). Maximální hodnoty mez pevnosti dosahuje při ozáření nejvyšší dávkou 198kGy ($\sigma_M = 83,76 \pm 0,72 \text{MPa}$), což je navýšení až o 27% oproti původní hodnotě meze pevnosti neozářeného materiálu ($\sigma_M = 66,16 \pm 0,50 \text{MPa}$).

Modul pružnosti PA 6 dosahuje maximální hodnoty při ozáření nejnižší testovanou dávkou 33kGy ($E = 3080 \pm 59 \text{MPa}$), což je navýšení oproti původní hodnotě ($E = 2355 \pm 27 \text{MPa}$) o 30%. U dávky 66kGy není navýšení modulu pružnosti tak velké, dalším zvyšováním ozařovací dávky dochází k jeho pozvolnému nárůstu až na hodnotu $E = 3069 \pm 105 \text{MPa}$ při ozáření dávkou 198kGy (viz Obr. 51).

Protážení materiálu při přetržení se u všech dávek ozáření snížilo asi na polovinu.



Obr. 50: Porovnání meze pevnosti pro PA 6



Obr. 51: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6

Jako optimální dávka ozáření u materiálu PA 6 se jeví nejnižší dávka 33kGy, při které došlo ke zvýšení meze pevnosti o 12,78 – 13,98MPa a zároveň vzrostl modu pružnosti o 639 – 810MPa.

10.2.2 Zkouška tahem za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$

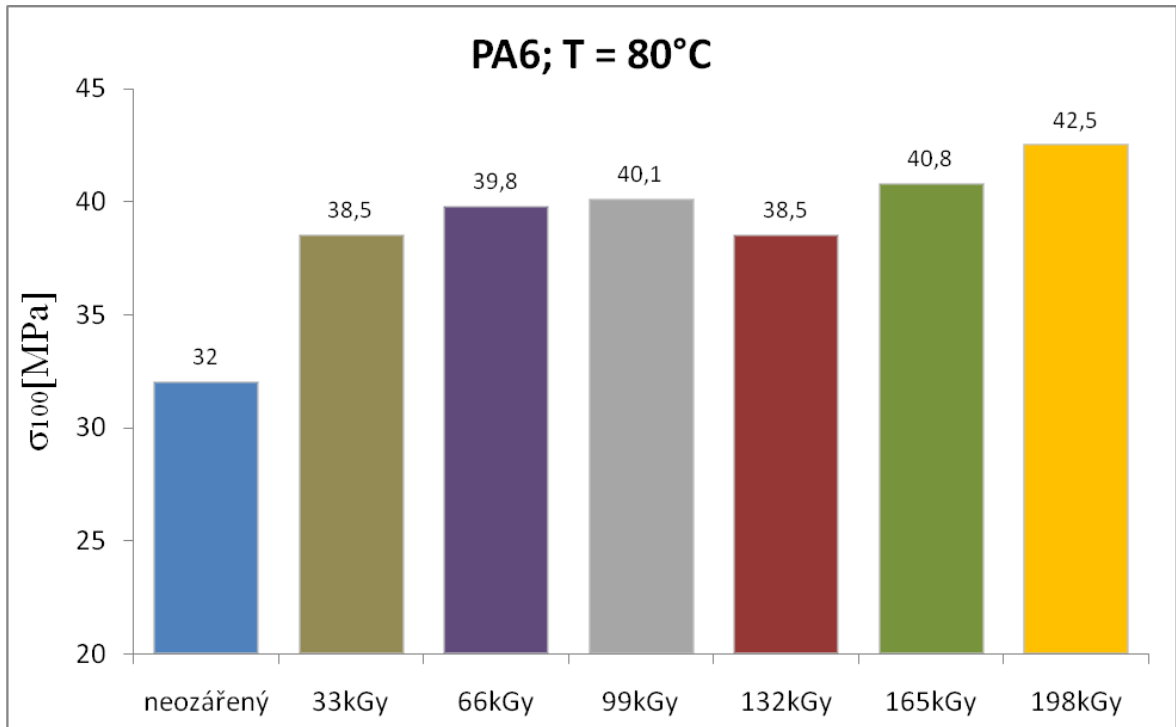
Tab. 39: Výsledné hodnoty PA 6

Neozářený		
-	$\sigma_{100} = 32\text{MPa}$	$E = 491 \pm 22\text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_{100} = 38,5\text{MPa}$	$E = 670 \pm 10\text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_{100} = 39,8\text{MPa}$	$E = 672 \pm 14\text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_{100} = 40,1\text{MPa}$	$E = 700 \pm 24\text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_{100} = 38,5\text{MPa}$	$E = 683 \pm 40\text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_{100} = 40,8\text{MPa}$	$E = 735 \pm 32\text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_{100} = 42,5\text{MPa}$	$E = 811 \pm 54\text{MPa}$

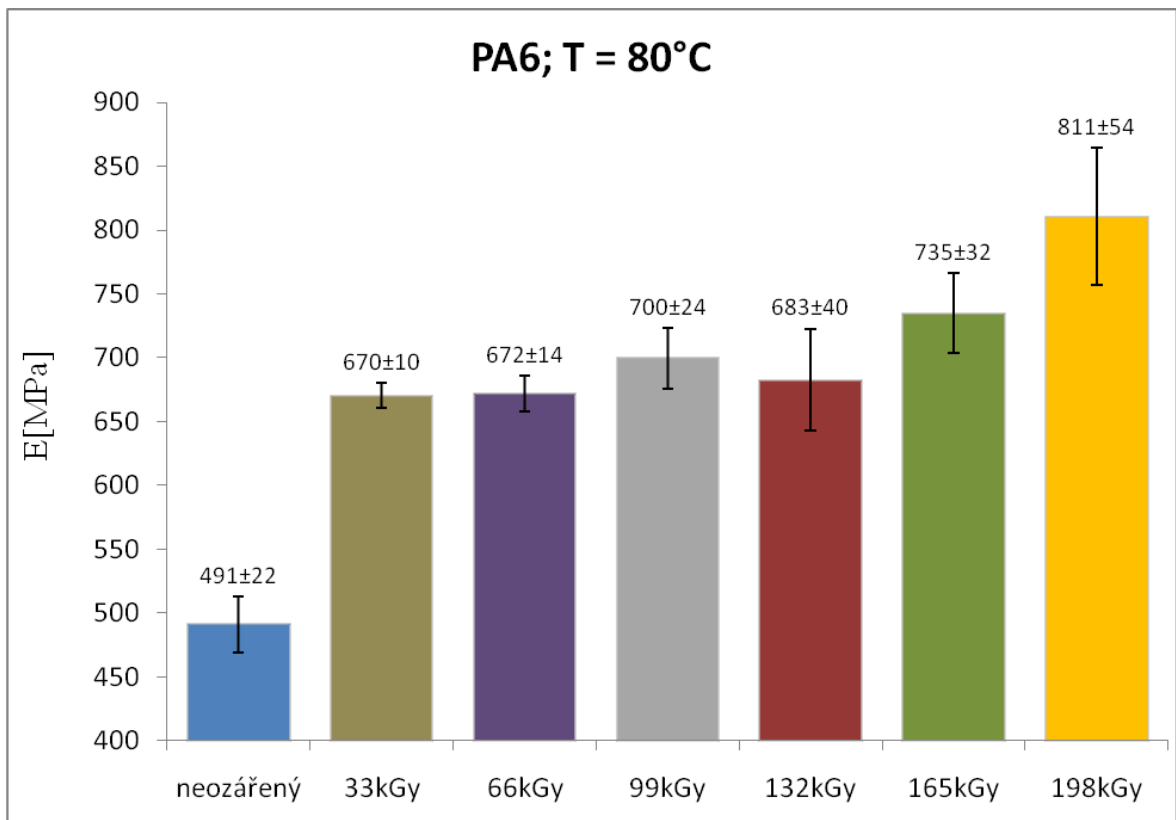
Jelikož u tohoto materiálu při zkoušce za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$ nedošlo k přetržení všech zkušebních těles (zejména neozářených) ani po dosažení maximálního protažení při rostoucím napětí, byla posuzována hodnota napětí při protažení o 100% (σ_{100}).

Při ozáření zkušebních těles dávkami 33kGy – 165kGy došlo k navýšení σ_{100} o 20 – 28%. Aplikací nejvyšší dávky ozáření 198kGy se napětí při protažení o 100% zvýšilo z původní hodnoty $\sigma_{100} = 32\text{MPa}$ na hodnotu $\sigma_{100} = 42,5\text{MPa}$, tedy o bezmála 33% (viz Obr. 52).

Modul pružnosti zaznamenal při ozáření dávkami 33kGy – 165kGy zvýšení o 37 – 50% (viz Obr. 53). Ozářením nejvyšší dávkou 198kGy došlo k jeho zvýšení o 65%. Při aplikaci této dávky ozáření by tedy hodnota modulu pružnosti vzrostla z původní hodnoty $E = 670 \pm 10\text{MPa}$ na hodnotu $E = 811 \pm 54\text{MPa}$.



Obr. 52: Porovnání napětí pro PA 6 při protažení 100%



Obr. 53: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6

10.3 Materiál PA 6.6

10.3.1 Zkouška tahem za teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$

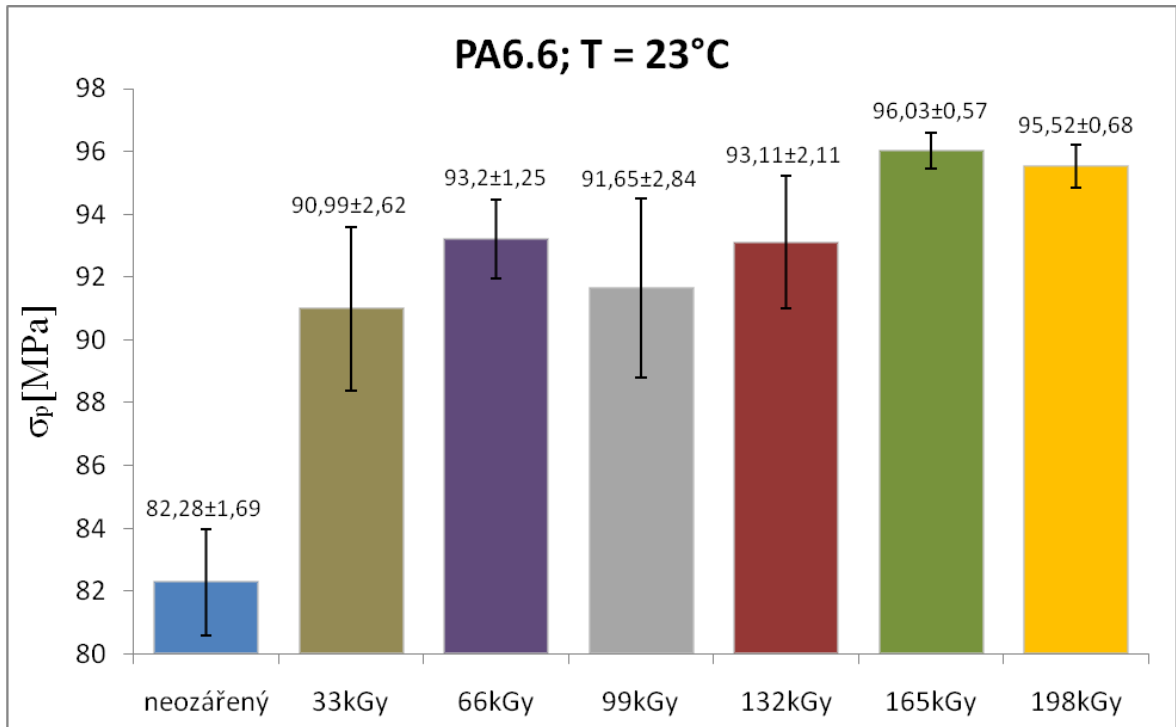
Tab. 40: Výsledné hodnoty PA 6.6

Neozářený		
-	$\sigma_M = 82,28 \pm 1,69 \text{MPa}$	$E = 3180 \pm 49 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 90,99 \pm 2,62 \text{MPa}$	$E = 3106 \pm 110 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 93,2 \pm 1,25 \text{MPa}$	$E = 3357 \pm 144 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 91,65 \pm 2,84 \text{MPa}$	$E = 3202 \pm 89 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 93,11 \pm 2,11 \text{MPa}$	$E = 3313 \pm 91 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 96,03 \pm 0,57 \text{MPa}$	$E = 3294 \pm 106 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 95,52 \pm 0,68 \text{MPa}$	$E = 3562 \pm 72 \text{MPa}$

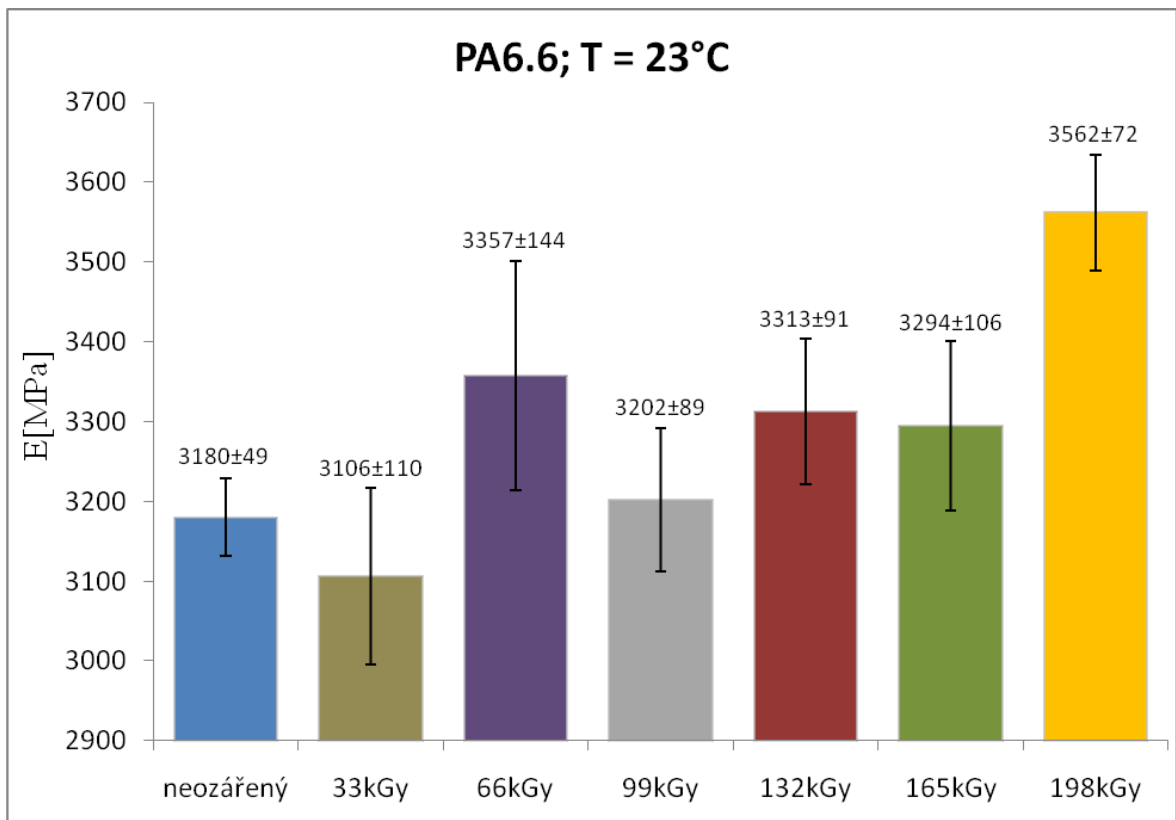
Pokud porovnáme hodnotu meze pevnosti neozářeného PA 66 s hodnotami naměřenými po ozáření, lze pozorovat nárůst meze pevnosti u dávek 33-132kGy o 11-13%. Při ozáření dávkami 165kGy a 198kGy je nárůst až o 17% (viz Obr. 54). Nejvyšší hodnotu meze pevnosti dosahuje materiál ozářený dávkou 165kGy, u které došlo ke zvýšení o 11,49 – 16,01MPa.

Modul pružnosti dosahuje maximálního navýšení při nejvyšší dávce ozáření 198kGy (viz Obr. 55). U této dávky ozáření došlo ke zvýšení modulu pružnosti z původní hodnoty $E = 3180 \pm 49 \text{MPa}$ až na hodnotu $E = 3562 \pm 72 \text{MPa}$, tedy o 12%.

Protažení materiálu do přetržení se snížilo u všech dávek ozáření v rozmezí 21 – 41%.



Obr. 54: Porovnání meze pevnosti pro PA 6.6



Obr. 55: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6.6

Pro tento materiál se jeví jako nejvýhodnější nejvyšší ozařovací dávka 198kGy. Při její aplikaci vzrůstá mez pevnosti o 10,88 – 15,6MPa, modul pružnosti vzrůstá o 260 – 504MPa.

10.3.2 Zkouška tahem za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$

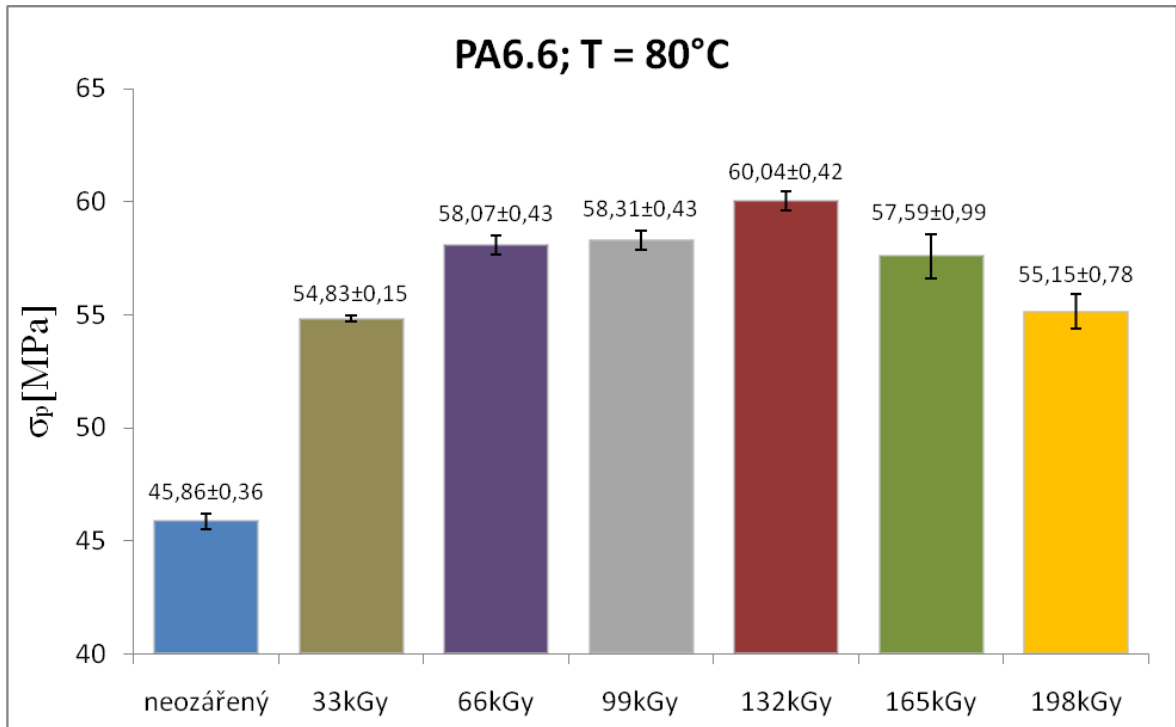
Tab. 41: Výsledné hodnoty PA 6.6

Neozářený		
-	$\sigma_M = 45,86 \pm 0,36 \text{MPa}$	$E = 770 \pm 30 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 54,83 \pm 0,15 \text{MPa}$	$E = 1073 \pm 20 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 58,07 \pm 0,43 \text{MPa}$	$E = 1219 \pm 23 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 58,31 \pm 0,43 \text{MPa}$	$E = 1229 \pm 15 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 60,04 \pm 0,42 \text{MPa}$	$E = 1333 \pm 28 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 57,59 \pm 0,99 \text{MPa}$	$E = 1246 \pm 42 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 55,15 \pm 0,78 \text{MPa}$	$E = 1129 \pm 41 \text{MPa}$

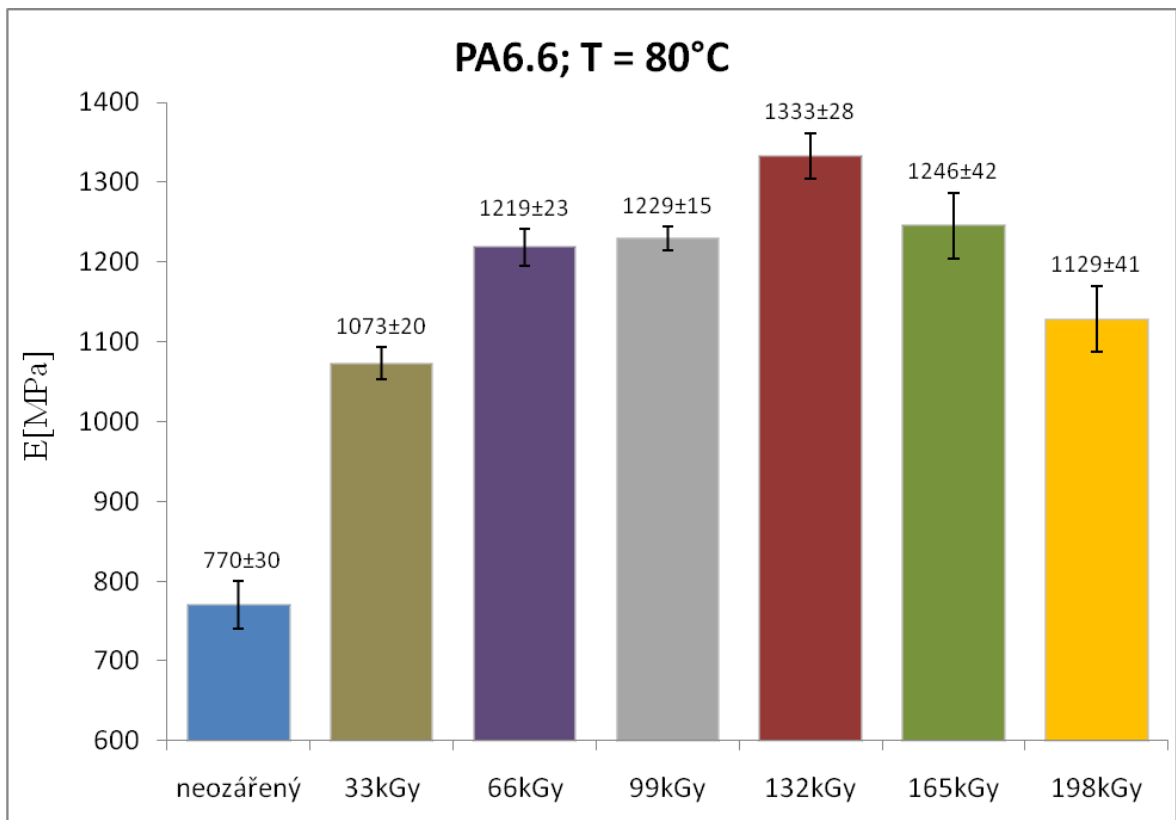
Porovnání meze pevnosti neozářeného a ozářených těles pozorujeme nárůst meze pevnosti s maximální hodnotou u dávky 132kGy (viz Obr. 56). U této dávky ozáření vzrostla mez pevnosti z původní hodnoty $\sigma_M = 45,86 \pm 0,36 \text{MPa}$ až na hodnotu $\sigma_M = 60,04 \pm 0,42 \text{MPa}$. Mez pevnosti se tedy zvýšila o 31%.

U modulu pružnosti dochází k nárůstu s podobnou tendencí jako u meze pevnosti (viz Obr. 57). Nejvýrazněji vzroste modul pružnosti u dávky 132kGy, kdy se z původní hodnoty $E = 770 \pm 30 \text{MPa}$ pro neozářený materiál vyšplhá až na hodnotu $E = 1333 \pm 28 \text{MPa}$. Pozorujeme tedy nárůst o 73%.

Vlivem ozáření došlo ke snížení protažení materiálu do přetržení u všech dávek z původní hodnoty $\Delta L_B = 26,95 \text{mm}$ o 61 – 70%.



Obr. 56: Porovnání meze pevnosti pro PA 6.6



Obr. 57: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6.6

Pro PA 6.6 testovaný při $T = 80^{\circ}\text{C}$ se jeví jako nejvýhodnější dávka 132kGy. Mez pevnosti při této dávce vzrostla o 13,4 – 14,96MPa a modul pružnosti o 505 – 620MPa.

10.4 Materiál PA 11

10.4.1 Zkouška tahem za teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$

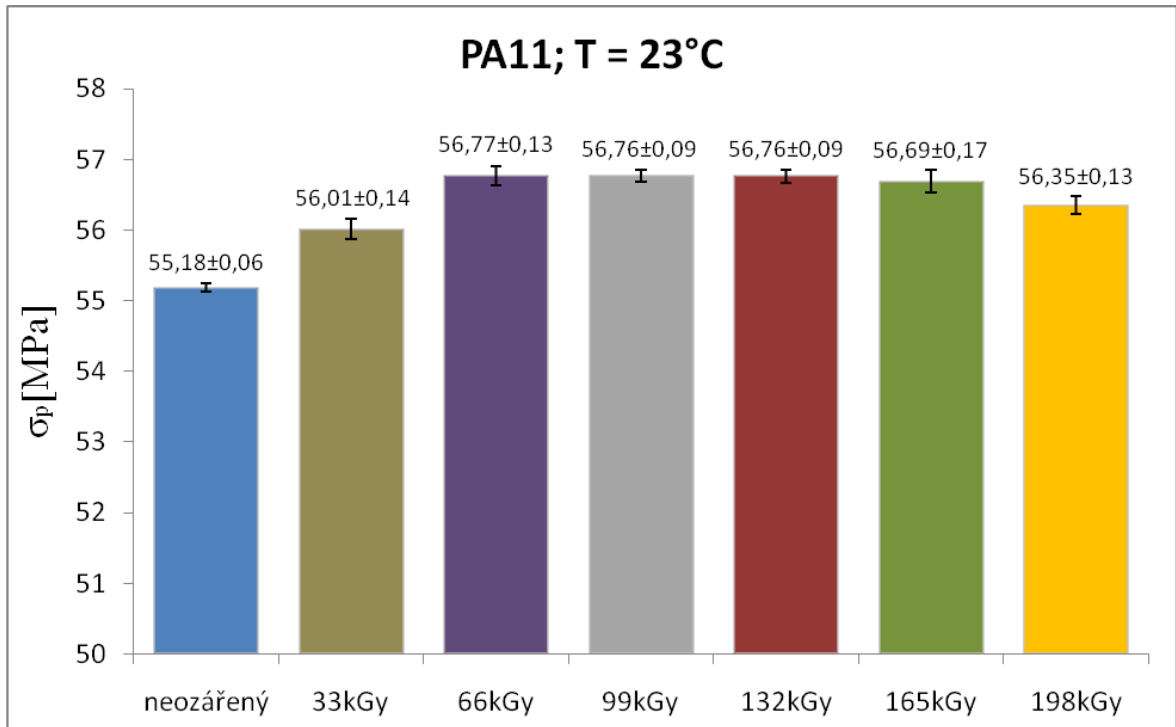
Tab. 42: Výsledné hodnoty PA 11

Neozářený		
-	$\sigma_M = 55,18 \pm 0,06 \text{MPa}$	$E = 1419 \pm 9 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 56,01 \pm 0,14 \text{MPa}$	$E = 1491 \pm 11 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 56,77 \pm 0,13 \text{MPa}$	$E = 1530 \pm 16 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 56,76 \pm 0,09 \text{MPa}$	$E = 1515 \pm 9 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 56,76 \pm 0,09 \text{MPa}$	$E = 1510 \pm 21 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 56,69 \pm 0,17 \text{MPa}$	$E = 1518 \pm 9 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 56,35 \pm 0,13 \text{MPa}$	$E = 1500 \pm 29 \text{MPa}$

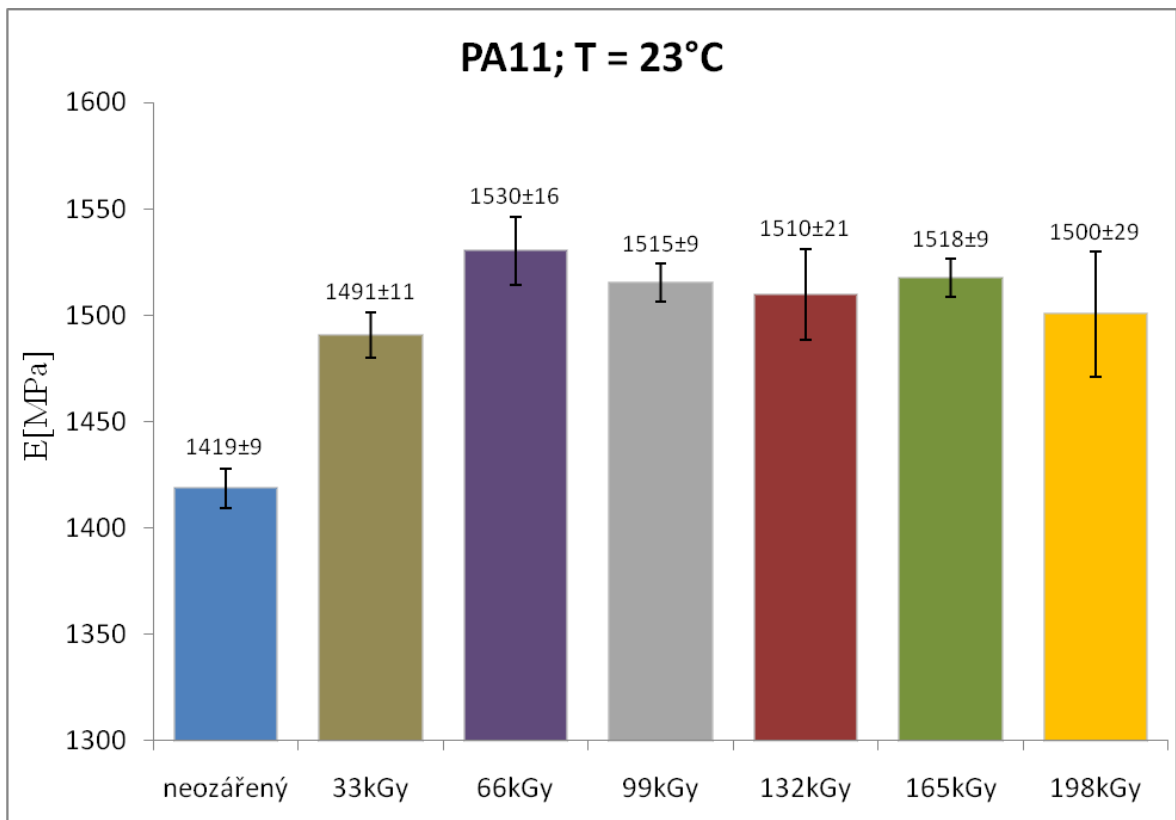
U materiálu PA 11 došlo při pokojové teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ u všech ozařovacích dávek pouze k mírnému nárůstu meze pevnosti (viz Obr. 58). Velikost navýšení se pohybovala od 1 – 3 %.

Modul pružnosti se vlivem ozařování zvýšil u všech ozařovacích dávek (viz Obr. 59). K největšímu nárůstu došlo u dávky 66kGy, kdy se jeho hodnota zvýšila z původní hodnoty $E = 1419 \pm 9 \text{MPa}$ na hodnotu $E = 1530 \pm 16 \text{MPa}$. Modul pružnosti při aplikaci této dávky tedy zaznamenal nárůst o téměř 8%.

Protažení materiálu při přetržení se u nejnižší dávky ozáření snížilo o zhruba 8%. U dávek 66, 99 a 132kGy bylo snížení mezi 47 – 55%, dávky 165 a 198kGy měly protažení při přetržení dokonce o 64 – 66% menší než původní hodnota $\Delta L_B = 18,83 \text{mm}$.



Obr. 58: Porovnání meze pevnosti pro PA 11



Obr. 59: Porovnání modulu pružnosti pro PA 11

Jako optimální by se jevílo ozařování materiálu PA 11 dávkou 66kGy. Při aplikaci této dávky se zvýšila mez pevnosti o 1,4 – 1,78MPa a modul pružnosti se zvýšil o 87 – 137MPa.

10.4.2 Zkouška tahem za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$

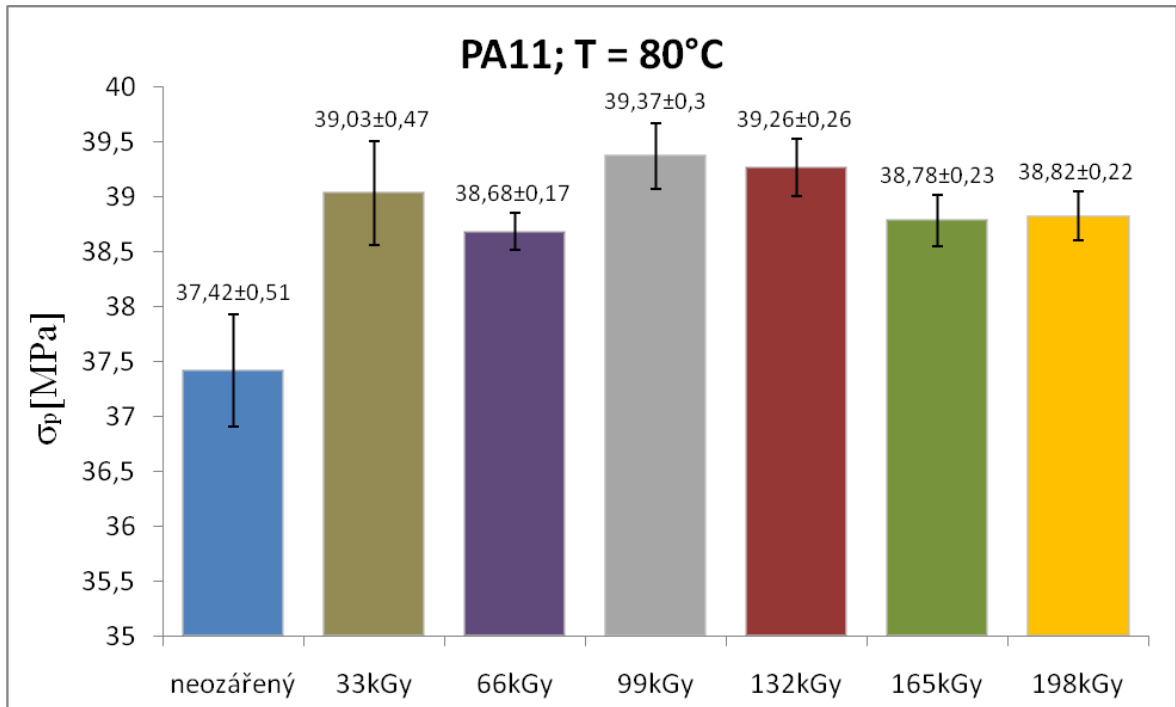
Tab. 43: Výsledné hodnoty PA 11

Neozářený		
-	$\sigma_M = 37,42 \pm 0,51 \text{MPa}$	$E = 995 \pm 15 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 39,03 \pm 0,47 \text{MPa}$	$E = 1050 \pm 19 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 38,68 \pm 0,17 \text{MPa}$	$E = 1035 \pm 14 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 39,37 \pm 0,30 \text{MPa}$	$E = 1041 \pm 22 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 39,26 \pm 0,26 \text{MPa}$	$E = 1005 \pm 27 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 38,78 \pm 0,23 \text{MPa}$	$E = 994 \pm 19 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 38,82 \pm 0,22 \text{MPa}$	$E = 1064 \pm 23 \text{MPa}$

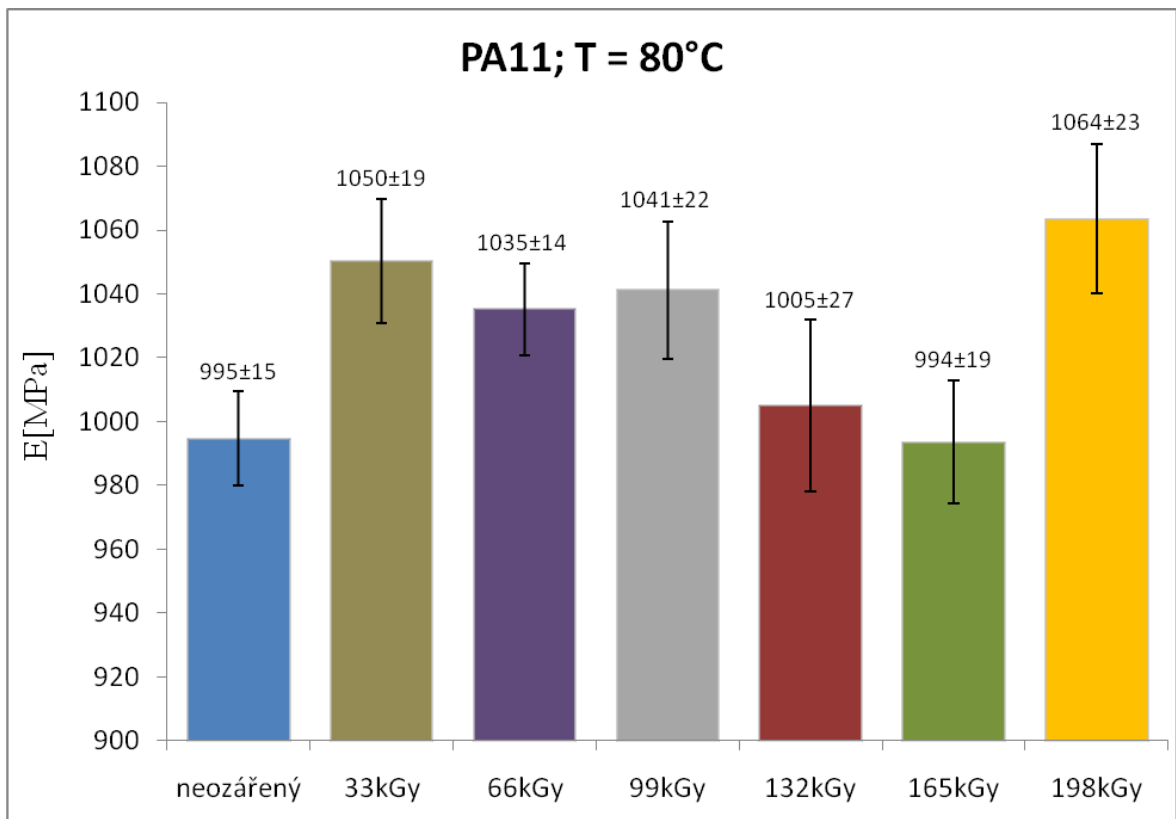
Při porovnávání meze pevnosti ozářených a neozářených těles za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$ můžeme pozorovat podobný trend chování jako za pokojové teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$. Mez pevnosti mírně naroste u všech ozařovacích dávek (viz Obr. 60). Navýšení se pohybuje mezi 3 – 5 %.

Modul pružnosti dosahuje maximálního zvýšení u nejvyšší dávky ozáření 198kGy, kdy jeho hodnota $E = 995 \pm 15 \text{MPa}$ vzroste na hodnotu $E = 1064 \pm 23 \text{MPa}$. Jedná se o nárůst o bezmála 7% (viz Obr. 61).

S velikostí ozařovací dávky se snižovalo protažení materiálu při přetržení. Největší snížení však bylo dosaženo u dávky 165kGy, kdy se původní hodnota $\Delta L_B = 39,55 \text{mm}$ snížila na $\Delta L_B = 22,76 \text{mm}$, tedy o více než 42%.



Obr. 60: Porovnání meze pevnosti pro PA 11



Obr. 61: Porovnání modulu pružnosti pro PA 11

10.5 Materiál PA 12

10.5.1 Zkouška tahem za teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$

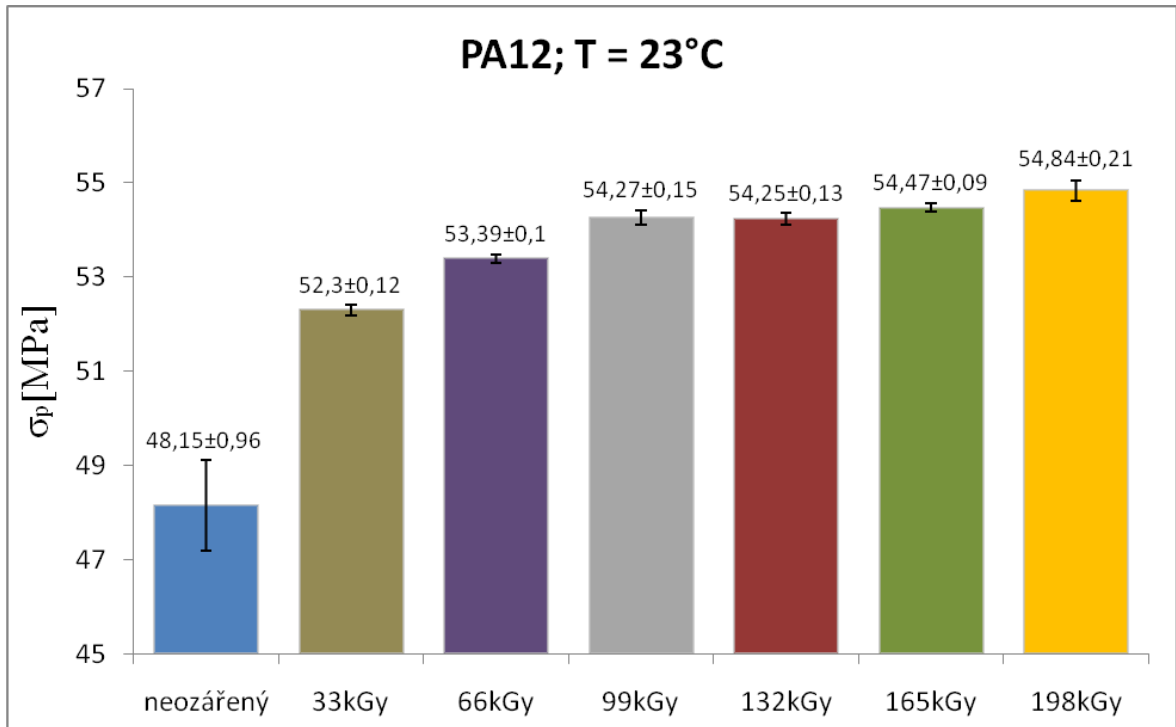
Tab. 44: Výsledné hodnoty PA 12

Neozářený		
-	$\sigma_M = 48,15 \pm 0,96 \text{MPa}$	$E = 1054 \pm 9 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 52,30 \pm 0,12 \text{MPa}$	$E = 1615 \pm 24 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 53,39 \pm 0,10 \text{MPa}$	$E = 1634 \pm 42 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 54,27 \pm 0,15 \text{MPa}$	$E = 1692 \pm 47 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 54,25 \pm 0,13 \text{MPa}$	$E = 1731 \pm 53 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 54,47 \pm 0,09 \text{MPa}$	$E = 1795 \pm 45 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 54,84 \pm 0,21 \text{MPa}$	$E = 1839 \pm 29 \text{MPa}$

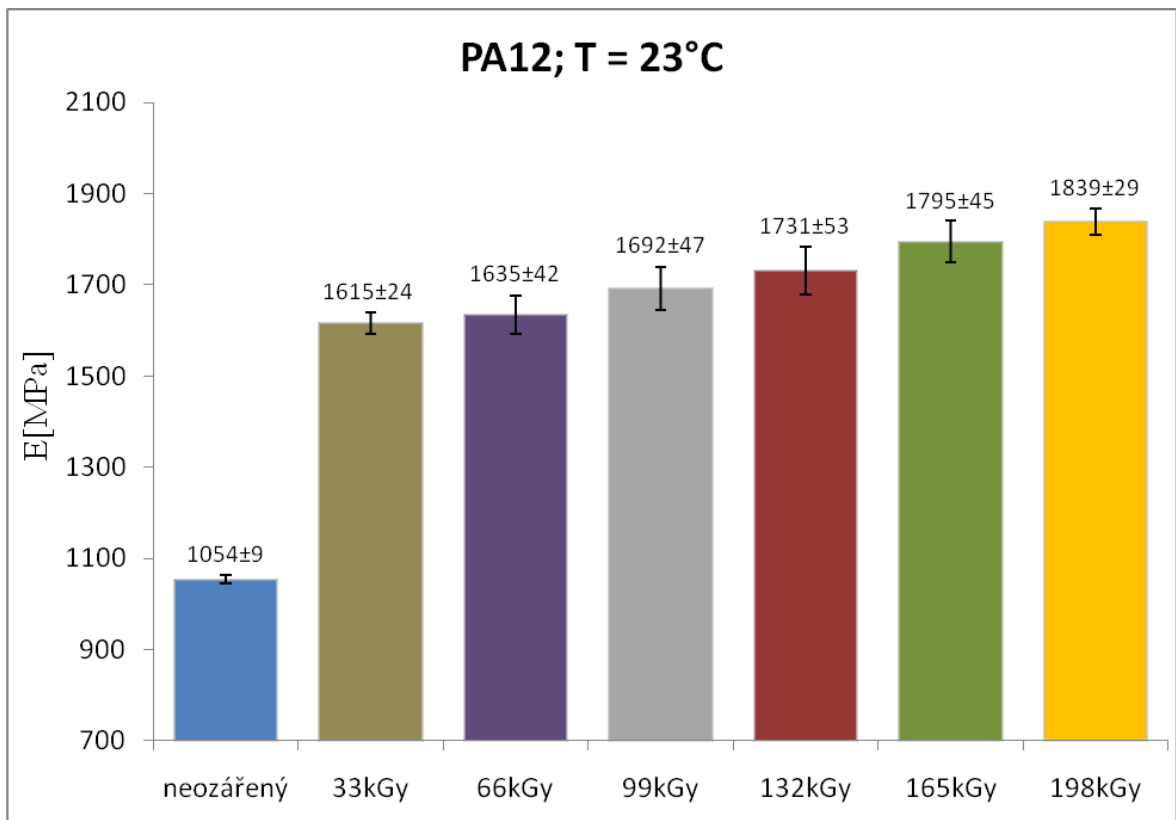
Z výsledků měření je patrné, že již při nejnižší dávce 33kGy dojde k výraznému zvýšení meze pevnosti a to o bezmála 9%. Dalším zvyšováním ozařovací dávky dochází již pouze k mírnému navýšení až na maximální dosaženou hodnotu meze pevnosti $\sigma_M = 54,84 \pm 0,21 \text{MPa}$ při nejvyšší testované dávce 198kGy, která o 14% vyšší než původní hodnota $\sigma_M = 48,15 \pm 0,96 \text{MPa}$ pro neozářený materiál (viz Obr. 62).

Podobný trend chování můžeme pozorovat i u nárůstu modulu pružnosti u ozařovaného materiálu (viz Obr. 63). Se zvyšující se dávkou ozáření roste velikost modulu pružnosti až na hodnotu $E = 1839 \pm 29 \text{MPa}$ (dávka 198kGy), která je o 75% vyšší než původní hodnota modulu pružnosti ($E = 1053 \pm 9 \text{MPa}$).

Všechny dávky ozáření snížily protažení materiálu při přetržení z původní hodnoty $\Delta L_B = 70,94 \text{mm}$ o 52 – 72%.



Obr. 62: Porovnání meze pevnosti pro PA 12



Obr. 63: Porovnání modulu pružnosti pro PA 12

K nejvyššímu nárůstu meze pevnosti a modulu pružnosti dojde při aplikaci nejvyšší testované dávky ozáření 198kGy. Mez pevnosti se zvýší o 7,86 – 13,89MPa a zároveň vzroste modul pružnosti o 748 – 823MPa.

10.5.2 Zkouška tahem za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$

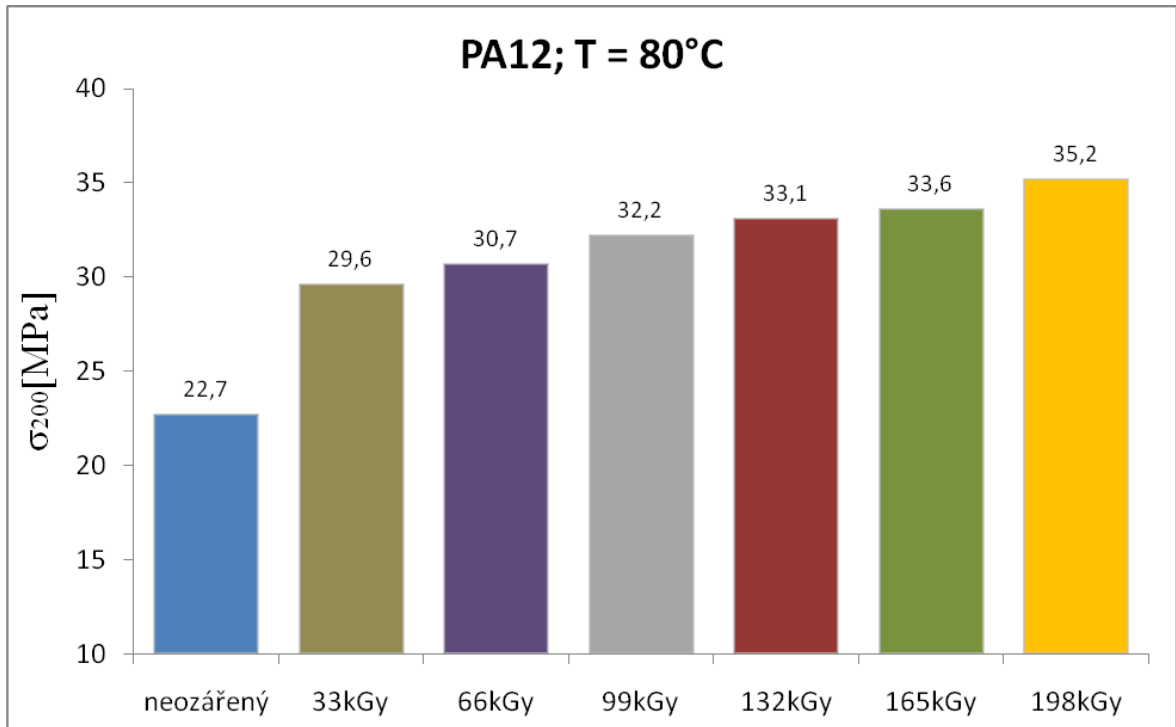
Tab. 45: Výsledné hodnoty PA 12

Neozářený		
-	$\sigma_{200} = 22,7\text{MPa}$	$E = 296\pm 5\text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_{200} = 29,6\text{MPa}$	$E = 329\pm 12\text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_{200} = 30,7\text{MPa}$	$E = 333\pm 15\text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_{200} = 32,2\text{MPa}$	$E = 327\pm 10\text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_{200} = 33,1\text{MPa}$	$E = 376\pm 9\text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_{200} = 33,6\text{MPa}$	$E = 382\pm 9\text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_{200} = 35,2\text{MPa}$	$E = 372\pm 15\text{MPa}$

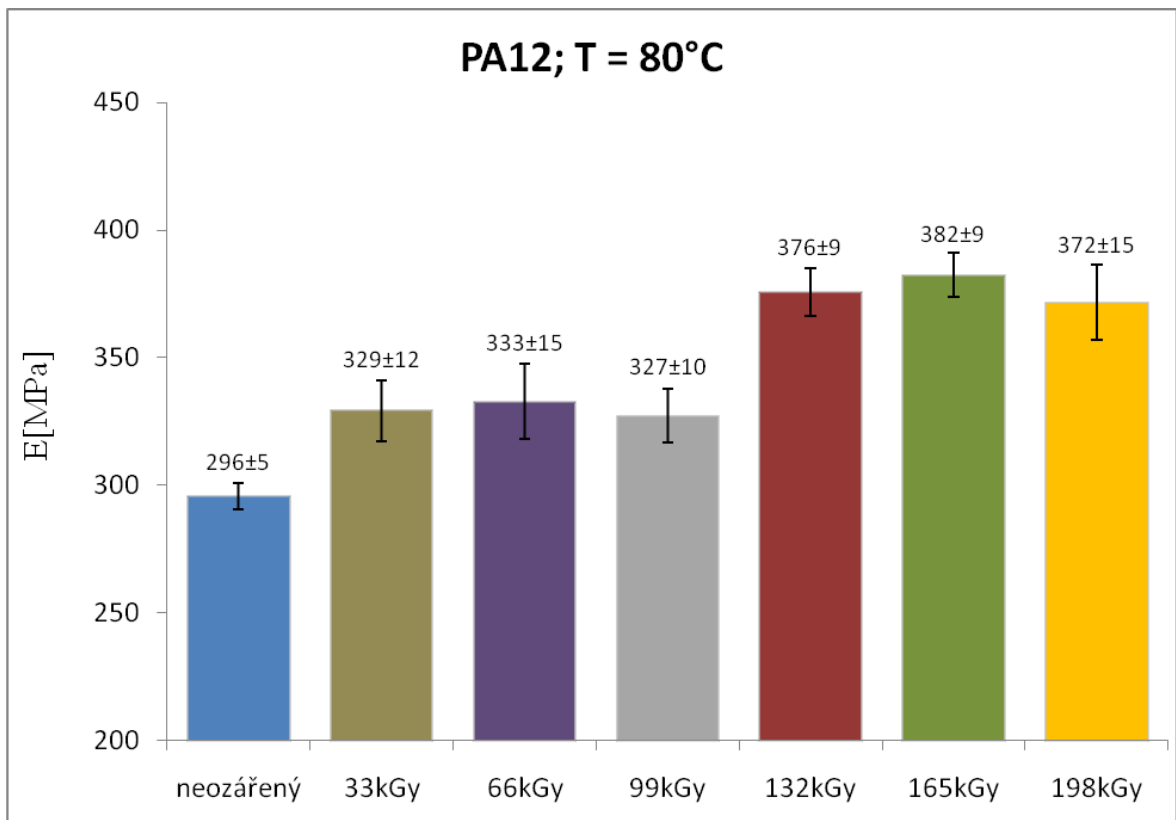
U tohoto materiálu nedošlo při dosažení maximálního protažení k přetržení všech zkušebních těles (především neozářených). Jelikož napětí stále rostlo, bylo posouzeno napětí dosažené při protažení o 200% (σ_{200}).

Napětí při tomto protažení se zvyšuje s velikostí aplikované ozařovací dávky (viz Obr. 64). Při ozáření nejnižší dávkou 33kGy došlo ke zvýšení z 22,7MPa na hodnotu 29,6MPa, tedy o 30%. Zvyšováním dávky ozáření docházelo k pozvolnému nárůstu σ_{200} , svého maxima dosáhlo u materiálu ozářeného nejvyšší dávkou 198kGy, kdy napětí dosáhlo hodnoty $\sigma_{200} = 35,2\text{MPa}$. Došlo tedy k jeho zvýšení o 55%.

Modul pružnosti vzrostl při ozáření dávkami 33, 66, a 99kGy z původní hodnoty $E = 296\pm 5\text{MPa}$ o 11 – 13%. Při aplikaci vyšších dávek ozáření 132, 165 a 198kGy došlo k jeho zvýšení o 27 – 29% (viz Obr. 65). Nejvyšší hodnotu dosáhl při ozáření dávkou 165kGy a to $E = 382\pm 9\text{MPa}$.



Obr. 64: Porovnání napětí pro PA 12 při protažení 200%



Obr. 65: Porovnání modulu pružnosti pro PA 12

10.6 Materiál PA 6.6 25% GF

10.6.1 Zkouška tahem za teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$

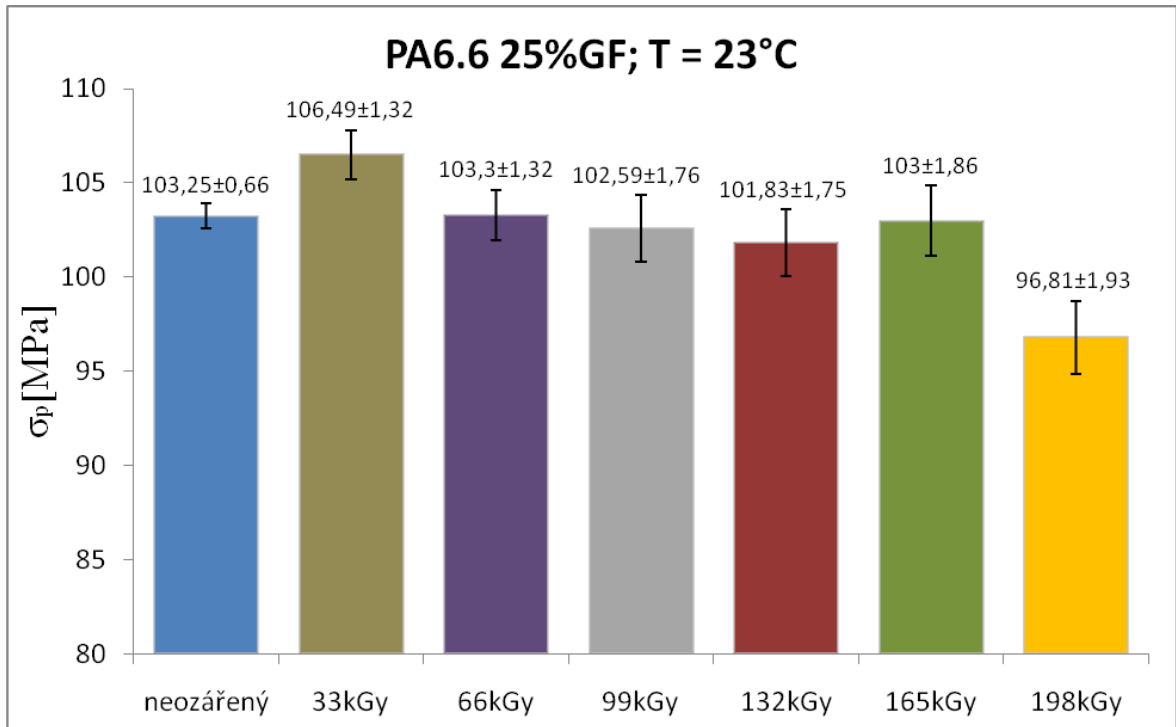
Tab. 46: Výsledné hodnoty PA 6.6 25% GF

Neozářený		
-	$\sigma_M = 103,25 \pm 0,66 \text{MPa}$	$E = 8756 \pm 147 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 106,49 \pm 1,32 \text{MPa}$	$E = 9551 \pm 142 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 103,30 \pm 1,32 \text{MPa}$	$E = 10393 \pm 195 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 102,59 \pm 1,76 \text{MPa}$	$E = 9819 \pm 249 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 101,83 \pm 1,75 \text{MPa}$	$E = 10696 \pm 371 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 103 \pm 1,86 \text{MPa}$	$E = 10506 \pm 333 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 96,81 \pm 1,93 \text{MPa}$	$E = 11104 \pm 223 \text{MPa}$

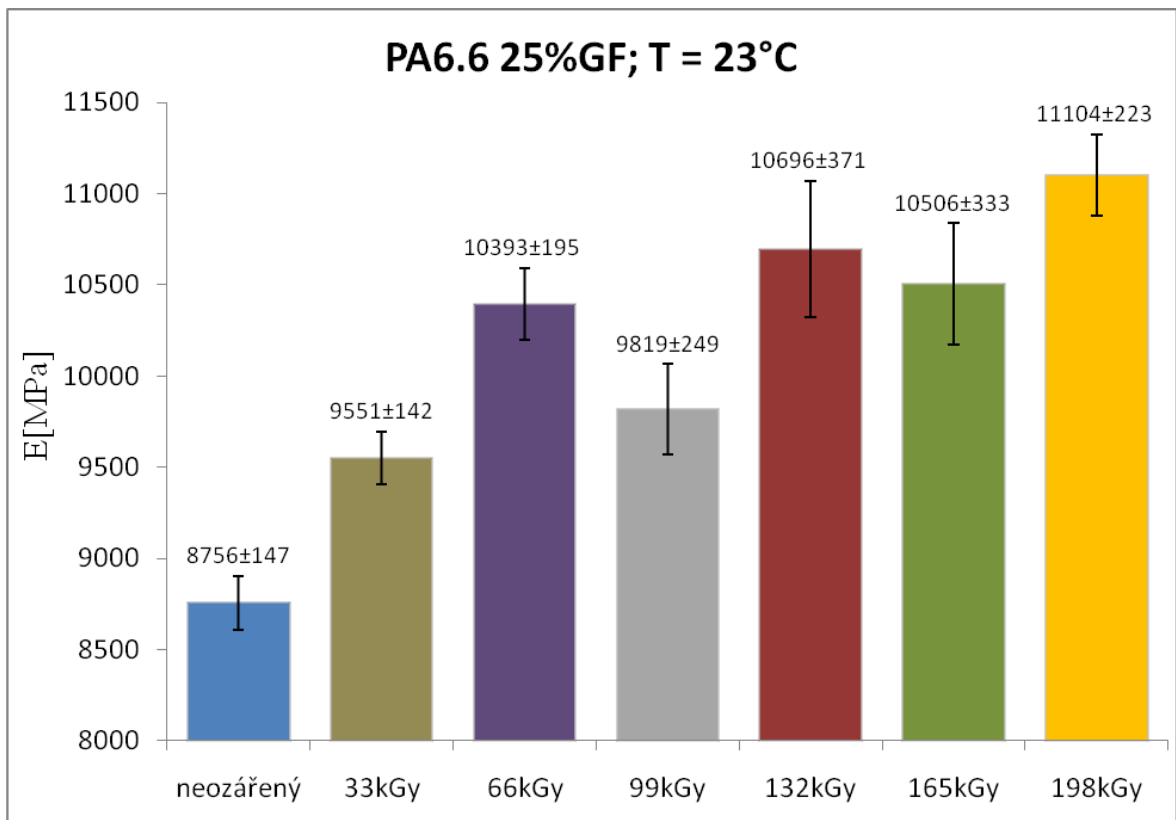
Polyamid 6.6 plněný 25% skelných vláken vykazuje zvýšení meze pevnosti vlivem ozařování pouze u nejnižší ozařované dávky, kdy se mez pevnosti zvýšila z původní hodnoty $\sigma_M = 103,25 \pm 0,66 \text{MPa}$ na hodnotu $\sigma_M = 106,49 \pm 1,32 \text{MPa}$, tedy asi o 3%. Při dalším zvyšování ozařovací dávky se mez pevnosti pohybovala okolo hodnoty neozářeného materiálu, u poslední dávky dokonce klesla o více než 6% (viz Obr. 66).

U modulu pružnosti došlo vlivem ozáření ke zvýšení. Nejvyšší hodnotu dosáhl po ozáření nejvyšší ozařovací dávky 198kGy (viz Obr. 67). Jeho hodnota ($E = 11104 \pm 223 \text{MPa}$) byla o 27% vyšší než hodnota modulu pružnosti neozářeného materiálu ($E = 8756 \pm 147 \text{MPa}$).

Protážení při přetržení se snižovala s velikostí ozařovací dávky z původní hodnoty $\Delta L_B = 0,72 \text{mm}$ na hodnotu $\Delta L_B = 0,46 \text{mm}$ při ozáření nejvyšší testovanou dávkou 198kGy.



Obr. 66: Porovnání meze pevnosti pro PA 6.6 25% GF



Obr. 67: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6.6 25% GF

V tomto případě není zcela jednoznačné, která dávka ozáření by byla nejvýhodnější. K nárůstu meze pevnosti došlo pouze u nejnižší dávky ozáření 33kGy, naproti tomu modul pružnosti nejvíce narostl u nejvyšší dávky ozáření 198kGy.

10.6.2 Zkouška tahem za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$

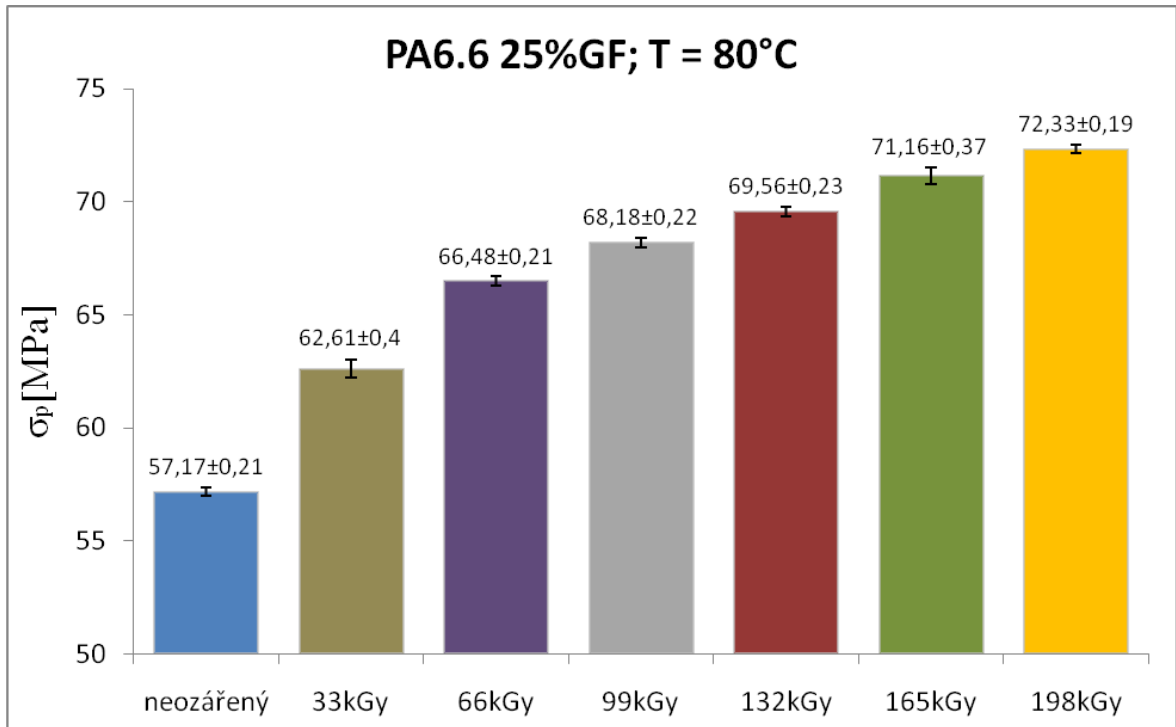
Tab. 47: Výsledné hodnoty PA 6.6 25% GF

Neozářený		
-	$\sigma_M = 57,17 \pm 0,21 \text{MPa}$	$E = 3432 \pm 72 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 62,61 \pm 0,40 \text{MPa}$	$E = 4087 \pm 75 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 66,48 \pm 0,21 \text{MPa}$	$E = 4472 \pm 95 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 68,18 \pm 0,22 \text{MPa}$	$E = 4737 \pm 46 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 69,56 \pm 0,23 \text{MPa}$	$E = 4919 \pm 93 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 71,16 \pm 0,37 \text{MPa}$	$E = 4749 \pm 174 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 72,33 \pm 0,19 \text{MPa}$	$E = 5119 \pm 99 \text{MPa}$

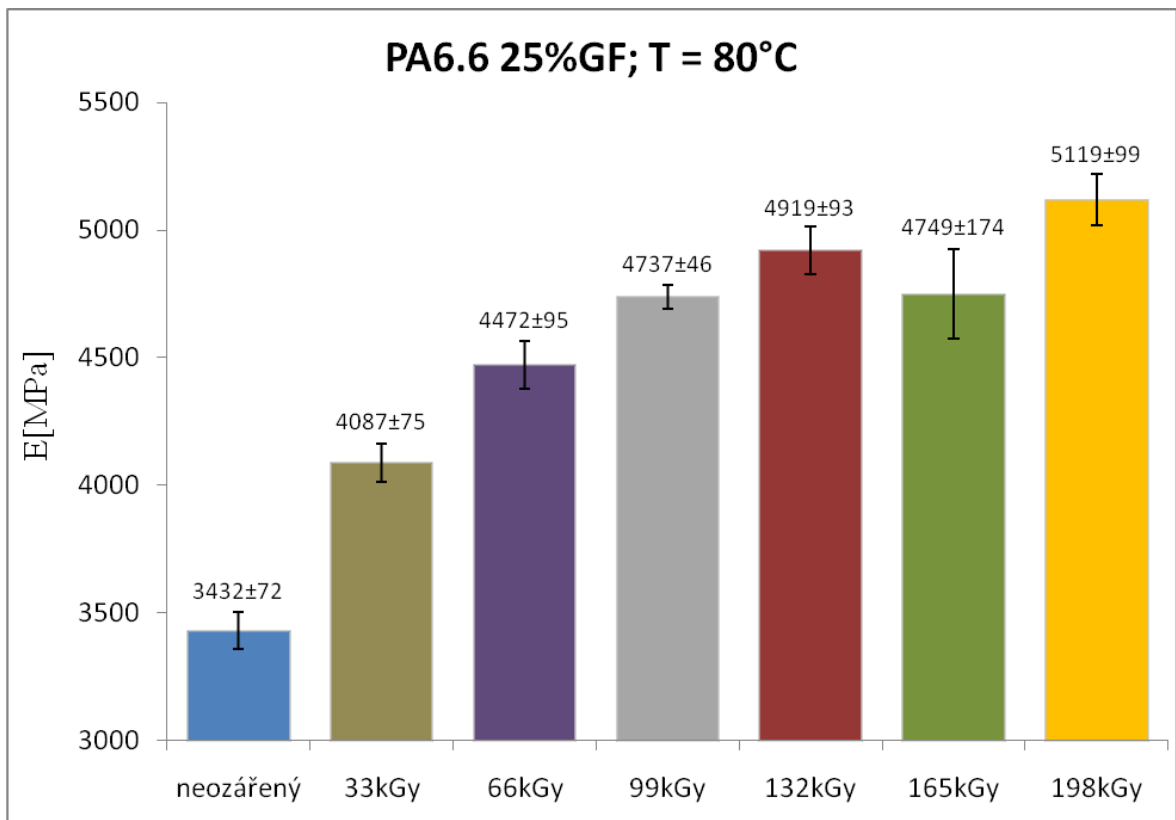
Za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$ se při zvyšující se dávce ozáření mez pevnosti zvyšuje (viz Obr. 68). Největší navýšení dosahuje při nejvyšší ozařovací dávce 198kGy. Z původní hodnoty $\sigma_M = 57,17 \pm 0,21 \text{MPa}$ se mez pevnosti zvýší až na hodnotu $\sigma_M = 72,33 \pm 0,19 \text{MPa}$, což je navýšení o téměř 27%.

Modul pružnosti má podobnou tendenci, nejvyšší hodnota navýšení je opět u ozařovací dávky 198kGy (viz Obr. 69). Hodnota modulu pružnosti u této dávky je $E = 5119,06 \pm 99,24 \text{MPa}$, což je navýšení až o 49% oproti původní hodnotě $E = 3431,64 \pm 71,53 \text{MPa}$, kterou vykazoval neozářený materiál.

Protážení materiálu při přetržení se snižovalo s velikostí ozařovací dávky z původní hodnoty $\Delta l_B = 1,37 \text{mm}$ na hodnotu $\Delta l_B = 0,82 \text{mm}$ při nejvyšší testované dávce ozáření 198kGy.



Obr. 68: Porovnání meze pevnosti pro PA 6.6 25% GF



Obr. 69: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6.6 25% GF

Pro tento materiál se při zkoušce za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$ jeví jako nejvýhodnější nejvyšší ozařovací dávka 198kGy. Při její aplikaci vzrůstá mez pevnosti o 14,76 – 15,56MPa, modul pružnosti vzrůstá o 1517 – 1858MPa.

10.7 Materiál PA 11 25% GK

10.7.1 Zkouška tahem za teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$

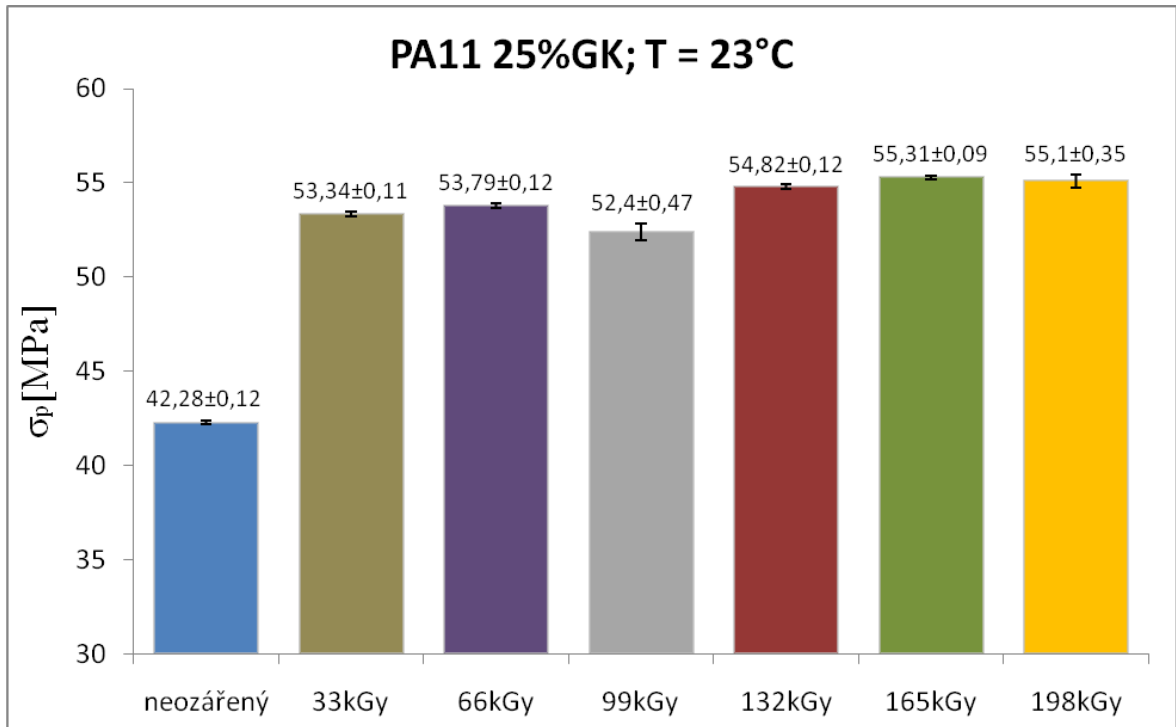
Tab. 48: Výsledné hodnoty PA 11 25% GK

Neozářený		
-	$\sigma_M = 42,28 \pm 0,12 \text{MPa}$	$E = 1357 \pm 13 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 53,34 \pm 0,11 \text{MPa}$	$E = 2192 \pm 88 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 53,79 \pm 0,12 \text{MPa}$	$E = 2271 \pm 60 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 52,40 \pm 0,47 \text{MPa}$	$E = 2194 \pm 85 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 54,82 \pm 0,12 \text{MPa}$	$E = 2300 \pm 123 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 55,31 \pm 0,09 \text{MPa}$	$E = 2110 \pm 83 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 55,10 \pm 35 \text{MPa}$	$E = 1932 \pm 79 \text{MPa}$

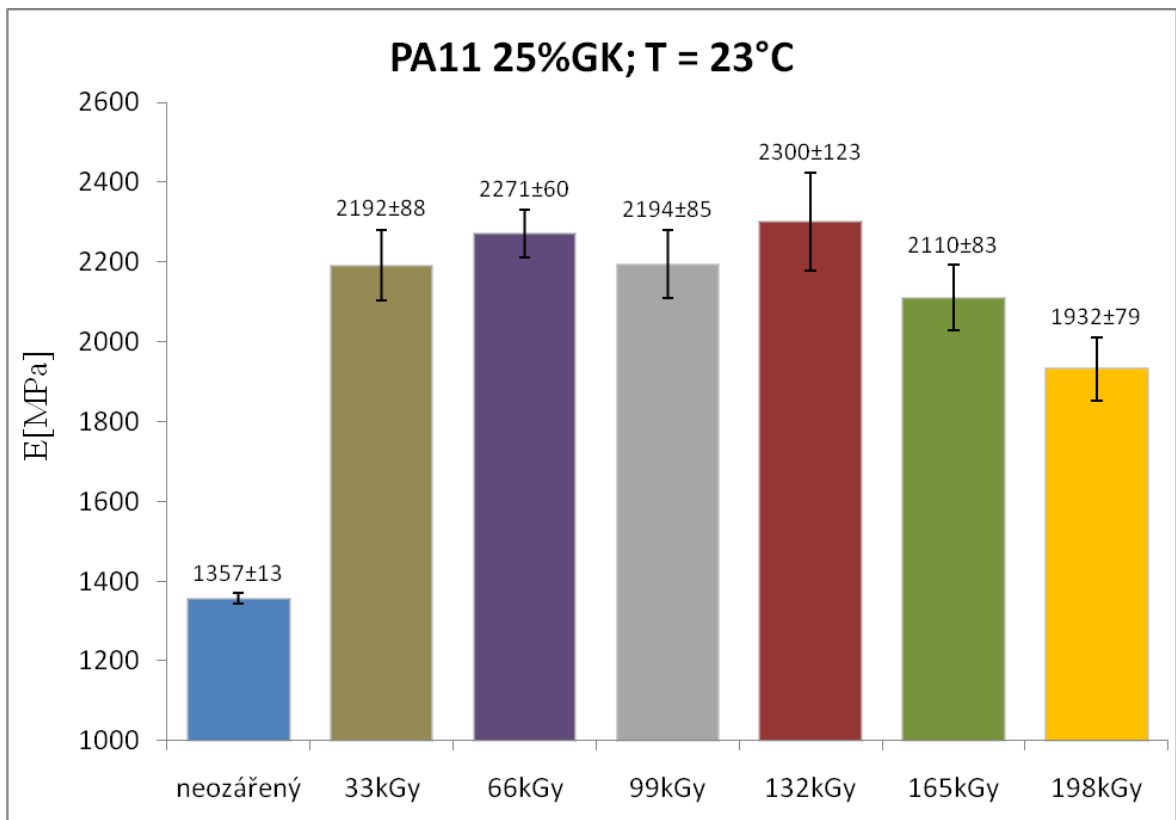
Hodnota meze pevnosti se u tohoto materiálu výrazně zvýšila již při nejnižší dávce ozáření 33kGy, s velikostí ozařovací dávky se mění pouze mírně (viz Obr. 70). Nejvyšší hodnotu dosahujeme při ozáření materiálu dávkou 165kGy ($\sigma_M = 55,31 \pm 0,09 \text{MPa}$). Oproti původní hodnotě naměřené pro neozářený materiál ($\sigma_M = 42,28 \pm 0,12 \text{MPa}$) došlo k nárůstu o 31%.

Modul pružnosti se zvýšil při všech testovaných ozařovacích dávkách, maximální hodnota je $E = 2300 \pm 123 \text{MPa}$ u ozařovací dávky 132kGy (viz Obr. 71). Nárůst je tedy až o 70% oproti původní hodnotě $E = 1357 \pm 13 \text{MPa}$.

U všech ozařovacích dávek došlo rovněž ke snížení protažení při přetržení z původní hodnoty $\Delta L_B = 10,19 \text{mm}$ o 36 – 42%.



Obr. 70: Porovnání meze pevnosti pro PA 11 25% GK



Obr. 71: Porovnání modulu pružnosti pro PA 11 25% GK

Jako optimální dávka ozáření se tedy jeví ozařovací dávka 132kGy, při jejíž aplikaci došlo ke zvýšení meze pevnosti o 12,78 – 29,66MPa a modul pružnosti vzrostl o 808 – 1078MPa.

10.7.2 Zkouška tahem za teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$

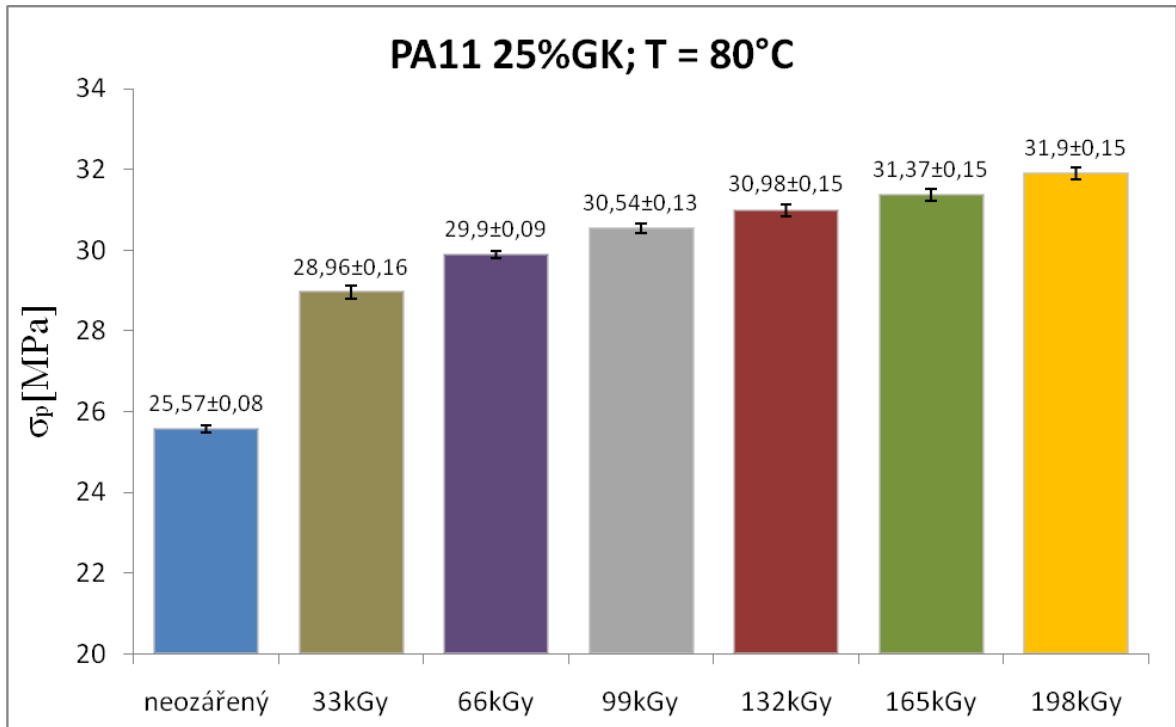
Tab. 49: Výsledné hodnoty PA 11 25% GK

Neozářený		
-	$\sigma_M = 25,57 \pm 0,08 \text{MPa}$	$E = 301 \pm 3 \text{MPa}$
Ozařovaný		
- 33 kGy	$\sigma_M = 28,96 \pm 0,16 \text{MPa}$	$E = 486 \pm 24 \text{MPa}$
- 66 kGy	$\sigma_M = 29,9 \pm 0,09 \text{MPa}$	$E = 499 \pm 16 \text{MPa}$
- 99 kGy	$\sigma_M = 30,54 \pm 0,13 \text{MPa}$	$E = 528 \pm 22 \text{MPa}$
- 132 kGy	$\sigma_M = 30,98 \pm 0,15 \text{MPa}$	$E = 567 \pm 19 \text{MPa}$
- 165 kGy	$\sigma_M = 31,37 \pm 0,15 \text{MPa}$	$E = 541 \pm 25 \text{MPa}$
- 198 kGy	$\sigma_M = 31,90 \pm 0,15 \text{MPa}$	$E = 595 \pm 41 \text{MPa}$

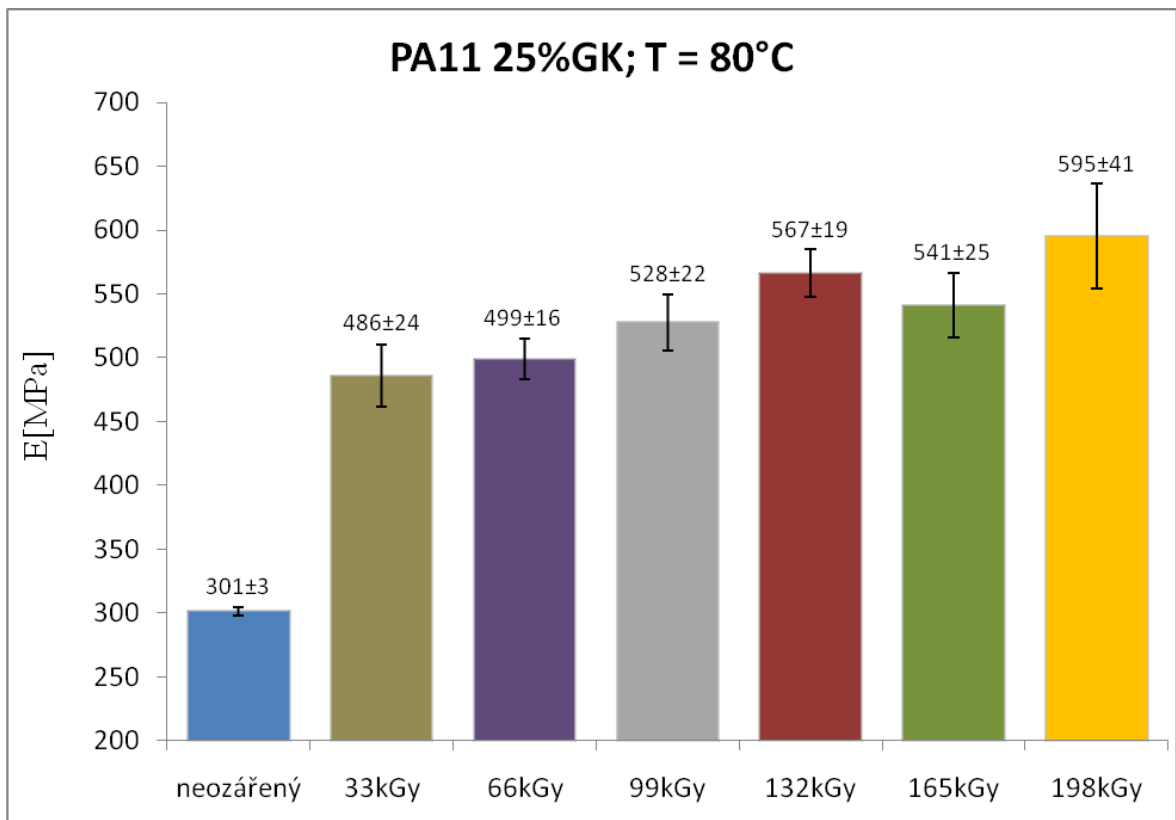
Za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$ se mez pevnosti daného materiálu zvyšuje s velikostí ozařovací dávky (viz Obr. 72). Hodnota meze pevnosti $\sigma_M = 31,90 \pm 0,15 \text{MPa}$ byla dosažena při nejvyšší ozařovací dávce 198kGy. Tato hodnota je o 25% vyšší než hodnota $\sigma_M = 25,57 \pm 0,08 \text{MPa}$ pro neozářený materiál.

Modul pružnosti vykazuje nejvyšší nárůst opět u dávky ozáření 198kGy (viz Obr. 73). V tomto případě došlo k navýšení původní hodnoty modulu pružnosti $E = 301 \pm 3 \text{MPa}$ o bezmála 98% na hodnotu $E = 595 \pm 41 \text{MPa}$.

Vlivem ozáření se protažení při přetržení materiálu snižovalo s velikostí ozařovací dávky. Došlo ke snížení o 61 – 70%.



Obr. 72: Porovnání meze pevnosti pro PA 11 25% GK



Obr. 73: Porovnání modulu pružnosti pro PA 11 25% GK

Nejlepších výsledků dosahuje materiál zkoušený při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ ozářený dávkou 198kGy. Díky ozáření touto dávkou došlo ke zvýšení meze pevnosti o 6,1 – 6,56MPa a modul pružnosti vzrostl o 249 – 339MPa.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo porovnat účinky jednotlivých dávek ozáření elektronovým beta zářením na mechanické vlastnosti vybraných plastů. Testované materiály byly PBT, PA 6, PA 6.6, PA 11, PA 12, PA 6.6 plněný 25% skelných vláken a PA 11 plněný 25% skelných kuliček. Materiály zpracované vstřikováním pro tahovou zkoušku (tvaru lopatek) a pro zkoušku rázové houževnatosti (tyčinky) byly ozářeny elektronovým zářením energií 10MeV dávkami 33, 66, 99, 132, 165 a 198kGy.

Z časových důvodů byla provedena pouze tahová zkouška při pokojové teplotě 23°C a při zvýšené teplotě 80°C. Zkušební tělesa pro zkoušku rázové houževnatosti byla ozářena a budou využita pro další posuzování vlivu ozáření na jednotlivé materiály.

Vyhodnocení výsledků spočívalo v porovnání meze pevnosti, modulu pružnosti a protažení při přetržení mezi neozářeným materiálem a materiálem ozářeným vybranými dávkami ozáření s cílem stanovit optimální dávku ozáření pro jednotlivé materiály.

Výsledky tahové zkoušky:

Materiál PBT:

Zkouška za pokojové teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$:

Mez pevnosti i modul pružnosti narůstá s velikostí ozařovací dávky. Při ozáření nejvyšší testovanou dávkou 198kGy došlo k nárůstu meze pevnosti o 40%, modul pružnosti se zvýšil dokonce o 58%. Naproti tomu protažení při přetržení se s velikostí ozařovací dávky snižovalo. U dávky 198kGy bylo snížení protažení při přetržení 89% oproti původní hodnotě naměřené pro neozářený materiál. (str. 79 - 81) Jako optimální se vzhledem k nárůstu meze pevnosti a modulu pružnosti jevila dávka 198kGy.

Zkouška za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$:

Vzhledem k tomu, že u tohoto materiálu nedocházelo k přetržení a napětí stále rostlo, byla porovnávána hodnota napětí při protažení 300%. Toto napětí opět narůstalo s velikostí ozařovací dávky, svého maxima tedy dosáhlo při ozáření nejvyšší testovanou dávkou 198kGy. Při této dávce bylo napětí o 47% vyšší než u neozářeného materiálu. Modul pružnosti se výrazněji zvýšil pouze u dávek ozáření 132kGy a 165kGy. Maximální navýšení bylo u dávky 165kGy, a to o 125%. (str. 81 - 83) U dávky 198kGy

nebylo navýšení již tak velké. Při zkoušce za teploty 80°C se tedy jako nejvýhodnější jevila dávka 165kGy.

Materiál PA 6:

Zkouška za pokojové teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$:

Po ozáření došlo u tohoto materiálu k výraznému zvýšení meze pevnosti již u nejnižší dávky ozáření 33kGy, dále se mez pevnosti zvyšovala pouze nepatrně. U všech dávek došlo k jejímu zvýšení o 20 – 27%. Modul pružnosti se nejvýrazněji zvýšil u dávky 33kGy, další dávka 66kGy nezaznamenala tak výrazné zvýšení, poté modul pružnosti narůstal s velikostí ozařovací dávky, až dosáhl při ozáření 198kGy hodnotu srovnatelnou s hodnotou dosaženou u dávky 33kGy. Protahování při přetržení se u všech dávek ozáření snížilo zhruba na polovinu. (str. 83 - 85) Za optimální dávku optimální dávku ozáření byla v tomto případě vybrána nejnižší dávka ozáření 33kGy.

Zkouška za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$:

U tohoto materiálu nedocházelo za zvýšené teploty 80°C k přetržení všech zkušebních těles (zejména neozářených), přičemž napětí stále rostlo. Z grafu byla proto odečtena hodnota napětí při protažení o 100% (σ_{100}). Toto napětí vzrostlo při ozáření dávkami 33 – 165kGy o 20 – 28% oproti původní hodnotě. Maximální napětí dosahovaly tělesa ozářená nejvyšší ozařovací dávkou 198kGy. U této dávky došlo ke zvýšení o 33%. Podobné chování pozorujeme i u modulu pružnosti, který vzrostl při ozáření dávkami 33 – 165kGy o 37 – 50%, při ozáření nejvyšší ozařovací dávkou 198kGy vzrostl dokonce o 65%. (str. 85, 86)

Materiál PA 6.6

Zkouška za pokojové teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$:

U PA 6.6 došlo k největšímu nárůstu meze pevnosti u dávek ozáření 165kGy a 198kGy, a to o 17%. Modul pružnosti se nejvíce zvýšil u ozařovací dávky 198kGy. Jeho nárůst byl u této dávky 12%. Protahování při přetržení materiálu se snížilo u všech dávek ozáření v rozmezí 21 – 41%. (str. 87 - 89) Tento materiál by tedy bylo nejvýhodnější ozařovat dávkou 198kGy.

Zkouška za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$:

Za zvýšené teploty 80°C se mez pevnosti i modul pružnosti materiálu zvyšovali do ozařovací dávky 132kGy, kdy dosáhli svého maxima, které bylo o 31% vyšší u meze pevnosti a o 73% vyšší u modulu pružnosti oproti neozářenému materiálu. U vyšších dávek ozáření již mez pevnosti i modul pružnosti dosahovaly menší hodnoty než u dávky 132kGy. U všech dávek ozáření došlo rovněž ke snížení tažnosti o 61 – 70%. (str. 89 - 91) Dávka 132kGy se tedy při zvýšené teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ jeví jako optimální.

Materiál PA 11***Zkouška za pokojové teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$:***

Mez pevnosti PA 11 se u všech dávek ozáření zvýšila pouze nepatrně v rozmezí 1 – 3%. Modul pružnosti se po ozáření také zvýšil u všech dávek. K největšímu nárůstu došlo u dávky 66kGy a to o 8%. Protážení při přetržení se výrazněji snižovalo až od dávky ozáření 66kGy. Po ozáření dávkami 66, 99 a 132kGy došlo ke snížení protážení při přetržení o 47 – 55%, při aplikaci dávek 165kGy a 198kGy bylo snížení dokonce 64 – 66%. (str. 91 - 93) Především s ohledem na zvýšení modulu pružnosti byla jako optimální ozařovací dávka vybrána dávka 66kGy.

Zkouška za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$:

Při zkoušce za zvýšené teploty 80°C došlo u materiálu ke zvýšení meze pevnosti o 3 – 5% u všech dávek. Modul pružnosti dosáhl největšího navýšení po ozáření nejvyšší testovanou dávkou 198kGy (7%), ke značnému zvýšení však došlo také při ozáření nejnižší dávkou 33kGy. U ostatních dávek nebylo navýšení tak výrazné. Protážení materiálu při přetržení se snižovalo s velikostí ozařovací dávky. K největšímu snížení protážení při přetržení však došlo u dávky 165kGy, a to o 42%. (str. 93, 94)

Materiál PA 12***Zkouška za pokojové teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$:***

U materiálu PA 12 došlo ke zvýšení meze pevnosti o 9 – 14% v závislosti na velikosti ozařovací dávky. S rostoucí dávkou ozáření rostl rovněž modul pružnosti, maximální nárůst byl u nejvyšší dávky ozáření 198kGy, a to 75%. Protážení při přetržení se po ozáření snížilo v rozmezí 52 – 72%. (str. 95 - 97) Jako optimální bychom tedy v tomto případě mohli označit ozařovací dávku 198kGy.

Zkouška za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$:

Jelikož u tohoto materiálu nedošlo při zkoušce za zvýšené teploty 80°C k přetržení všech zkušebních těles (zejména neozářených) a napětí stále rostlo, byla z grafu odečtena a porovnána hodnota napětí při protažení o 200% (σ_{200}). Hodnota tohoto napětí se zvětšovala s velikostí ozařovací dávky. Navýšení se pohybovalo mezi 30% (pro ozáření dávkou 33kGy) a 55% u nejvyšší dávky ozáření 198kGy. Modul pružnosti vzrostl při ozáření dávkami 33, 66 a 99kGy o 11 – 13%. Při aplikaci vyšších dávek 132, 165 a 198kGy vzrostl o 27 – 29%. (str. 97, 98)

Materiál PA 6.6 25% GF***Zkouška za pokojové teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$:***

U polyamidu 6.6 plněného 25% skelných vláken došlo ke zvýšení meze pevnosti pouze po aplikaci nejnižší testované ozařovací dávky 33kGy (3%). Zvyšováním hodnoty ozáření se mez pevnosti příliš neměnila, po ozáření nejvyšší testovanou dávkou 198kGy hodnota meze pevnosti dokonce klesla o 6%. Modul pružnosti po ozáření vzrostl, největšího nárůstu zaznamenal po ozáření dávkou 198kGy, a to o 27%. Protažení při přetržení materiálu se snižovala s velikostí dávky ozáření. U nejvyšší ozařovací dávky 198kGy došlo ke snížení tažnosti materiálu o 36%. (str. 99 - 101)

Zkouška za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$:

Při zkoušce provedené za zvýšené teploty 80°C došlo k nárůstu meze pevnosti s velikostí ozařovací dávky. Při dávce 198kGy bylo navýšení 27%. Modul pružnosti se také zvyšoval s velikostí hodnoty ozáření (kromě dávky 165kGy, u které bylo navýšení podobné jako u dávky 99kGy). Nejvíce se hodnota modulu pružnosti zvýšila u dávky 198kGy, a to o 49%. Protažení materiálu při přetržení se snižovalo s velikostí ozáření. U nejvyšší dávky ozáření 198kGy došlo ke snížení o 40%. Při zvýšené teplotě 80° se tedy jeví jako optimální ozařování materiálu dávkou 198kGy. (str. 101 - 103)

Materiál PA 11 25% GK***Zkouška za pokojové teploty $T = 23^{\circ}\text{C}$:***

U tohoto materiálu došlo k výraznému navýšení meze pevnosti již po aplikaci nejnižší dávky ozáření 33kGy. Se zvyšováním ozařovací dávky se mění pouze mírně. Nejvyšší hodnotu mez pevnosti dosahuje po ozáření dávkou 165kGy, její nárůst byl

o 31%. Modul pružnosti se zvýšil při všech dávkách ozáření, nejvýrazněji po ozáření dávkou 132kGy. Protahování při přetržení se vlivem ozáření snížila o 36 – 42% u všech ozařovacích dávek. (str. 103 - 105) Nejvýhodnější by tedy bylo ozařovat tento materiál dávkou 132kGy.

Zkouška za zvýšené teploty $T = 80^{\circ}\text{C}$:

U meze pevnosti pozorujeme nárůst s velikostí ozáření. Nejvyšší hodnota byla dosažena při dávce ozáření 198kGy, a to o 25% vyšší než u neozářeného materiálu. Modul pružnosti se také zvyšoval s velikostí ozáření. Při dávce 198kGy vzrostl o 98%. Vlivem ozáření klesla tažnost materiálu v závislosti na velikosti ozařovací dávky o 61 – 70%. (str. 105 - 107) Při zvýšené teplotě 80°C se nejvýhodněji jeví velikost ozáření 198kGy.

Hodnoty naměřené při tahové zkoušce dokazují, že se mechanické vlastnosti materiálů po ozáření zlepšily. Zlepšení těchto vlastností je však u jednotlivých materiálů značně odlišné. Zatímco u materiálů PBT a polyamidů PA 6, PA 6.6 (neplněného i plněného) a PA 12 došlo k poměrně razantnímu zvýšení hodnot sledovaných mechanických vlastností, u materiálu PA 11 (neplněného i plněného) došlo pouze k mírnému zlepšení. Tento materiál se však využívá zejména pro své vynikající chemické vlastnosti a odolnost proti korozi. Za účelem zlepšení těchto vlastností se také ozařuje. Zkoumání těchto vlastností však nebylo náplní této diplomové práce.

Dalším závěrem měření je, že optimální dávka ozáření pro jednotlivé materiály nemusí být nutně ta nejvyšší. Za pokojové teploty by se u materiálu PA 6 jevílo jako nejvýhodnější ozařování dávkou 33kGy, materiál PA 11 (neplněný) vykazoval nejvyšší nárůst sledovaných mechanických vlastností po ozáření dávkou 66kGy a PA 11 plněný 25% skelných kuliček nejvíce zlepšil své mechanické vlastnosti po ozáření dávkou 132kGy. U PA 6.6 plněného 25% skelných vláken dosáhla mez pevnosti zvýšení pouze u dávky 33kGy, poté byla její hodnota okolo hodnoty neozářeného materiálu a při ozáření nejvyšší dávkou 198kGy dokonce klesla. Modul pružnosti naopak u této dávky vzrostl nejvíce. Materiál PBT dosáhl největšího zlepšení mechanických vlastností při zkoušce za pokojové teploty po ozáření dávkou 198kGy. Pokud by byly materiály určeny

k aplikacím za zvýšené teploty, jevílo by se jako optimální ozařovat materiál PBT dávkou 165kGy a polyamid PA 6.6 dávkou 132kGy.

Výsledkem měření tedy je tedy určení nejvýhodnější dávky ozáření pro jednotlivé materiály. Stanovení optimální dávky je však také závislé na ekonomických nárocích a požadavcích na zlepšení mechanických vlastností dle různých aplikací těchto materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LENFELD, P. *Technologie II : Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2009-12-13]. Dostupný z WWW: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [2] TURJAP, V. *Fyzika atomového jádra* [online]. [cit. 2009-12-22]. Dostupný z WWW: <<http://atomovejadro.wz.cz/stranky/infoWeb.html>>
- [3] Ducháček V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [4] ULLMANN, V. *Astro Nukl Fyzika : - jaderná fyzika - astrofyzika - kosmologie - filosofie* [online]. [cit. 2009-12-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.astronuklfyzika.cz/index.htm>>
- [5] REICHL, J., VŠETIČKA, M. *FYZIKA MIKROSVĚTA: JADERNÁ FYZIKA* [online]. 2006 [cit. 2009-12-22]. Dostupný z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=796>>
- [6] *PTS - Plastic Technology Service* [online]. 2009 [cit. 2009-12-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.pts-marketing.de/>>
- [7] *Identifikace typu záření: Fakulta biomedicínského inženýrství*. [online]. [cit. 2008-11-10]. Dostupný z WWW: <<http://nw.fbmi.cvut.cz/e/04-identifilacetypu-zareni/1937.pdf>>
- [8] Technická norma: ČSN EN ISO 527 (640604)
- [9] Technická norma: ČSN EN ISO 179 (640612)
- [10] RYBNÍKÁŘ, F., et al. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha, SNTL, MÍR, 1965. 420 s. ISBN 04-628-65
- [11] BGS – Beta gama service. [online]. [cit. 2009-12-22]. Dostupný z WWW: <<http://bgs.de>>
- [12] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2009-12-22]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org>>
- [13] *FyzVlast3: Pedagogická fakulta* [online]. [cit. 2009-12-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm>>

- [14] JARUŠEK, J. Metody zkoumání polymerů. 2.vyd. Pardubice: VŠCHT, 1989. 105 s. ISBN 80-85113-01-5
- [15] The Welding Institute [online]. [cit. 2009-12-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.twiprofessional.com/content/jk71.html>>
- [16] Bureš, J. Converter: Jednotky působení ionizujícího záření [online]. [cit. 2009-1-4]. Dostupný z WWW: <<http://www.converter.cz/prevody/dozimetrie-detekce.htm>>
- [17] Adámek, R. Diplomová práce – Vliv záření na vlastnosti vybraných plastů. Zlín: UTB, 2008. 183 s.
- [18] Lamborová, R. Diplomová práce – Recyklace ozářených polymerů. Zlín: UTB, 2008. 95 s.
- [19] Válek, M. Diplomová práce – Vliv ozařování na mechanické a termomechanické vlastnosti polypropylenu. Zlín: UTB, 2006. 133 s.
- [20] *Arburg*. [online]. [cit. 2010-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.arburg.com>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PBT	polybutylentereftalát
PA 6	polyamid 6
PA 6.6	polyamid 6.6
PA 6.6 25% GF	polyamid 6.6 plněný 25% skelných vláken
PA 11	polyamid 11
PA 11 25% GK	polyamid 11 plněný 25% skelných kuliček
PA 12	polyamid 12
ρ	hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
σ_U	mez úměrnosti [MPa]
σ_E	mez pružnosti [MPa]
σ_K	mez kluzu [MPa]
\mathcal{E}_U	poměrná deformace na mezi úměrnosti [%]
\mathcal{E}_E	poměrná deformace na mezi pružnosti [%]
\mathcal{E}_K	poměrná deformace na mezi kluzu [%]
b_1	šířka pracovní části [mm]
b_2	šířka upínací části [mm]
l_1	délka pracovní části [mm]
l_2	vzdálenost mezi širokými částmi [mm]
l_3	celková vzdálenost [mm]
L_0	počáteční měřená délka [mm]
L	vzdálenost čelistí na počátku [mm]
h	tloušťka tělíška [mm]
R	poloměr [mm]

\bar{x}	aritmetický průměr
s^2	rozptyl
s	směrodatná odchylka
σ	střední kvadratická odchylka aritmetického průměru
E	modul pružnosti [MPa]
σ_M	mez pevnosti materiálu v tahu [MPa]
σ_{100}	napětí při protažení 100% [MPa]
σ_{200}	napětí při protažení 200% [MPa]
σ_{300}	napětí při protažení 300% [MPa]
ε_M	poměrná deformace při maximálním napětí [%]
ε_{F_m}	deformace při maximální síle [mm]
ΔL_{σ_m}	protažení při maximálním napětí [mm]
ΔL_B	protažení při přetržení [mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Rozdělení přírodních a syntetických polymerů [18].....	13
Obr. 2: Rozdělení polymerů dle jejich aplikace a ceny [18].....	14
Obr. 3: Tvary molekul [13].....	16
Obr. 4: Trojrozměrný vláknový kompozit [13]	19
Obr. 5: Síťování PE pomocí peroxidů [19].....	21
Obr. 6: Schéma radiačního síťování elektronovým zářením [11].....	23
Obr. 7: Některé vlastnosti plastů v závislosti na dávce ozáření [11].....	26
Obr. 8: Záření α [12]	30
Obr. 9: Záření β [12]	31
Obr. 10: Záření γ [12]	32
Obr. 11: Schéma kapsle Co^{60} [11]	32
Obr. 12: Schéma pronikání beta a gama záření do materiálu [11].....	33
Obr. 13:Schopnost pronikání elektronů a gama kvant záření [11]	34
Obr. 14: Zkušební těleso pro tahovou zkoušku	36
Obr. 15: Rozměry zkušební tělesa pro zkoušku tahem [8]	36
Obr. 16: Typy pracovních diagramů plastických hmot [10]	37
Obr. 17: Pracovní digram tahové zkoušky [10]	38
Obr. 18: Sušící zařízení ARBURG THERMOLIFT 100 - 2.....	46
Obr. 19: Vstříkovací stroj Arburg Allrounder 420C.....	48
Obr. 20: Zkušební stroj ZWICK ROELL 1456	50
Obr. 21: Vstříkovací stroj Arburg Allrounder 420C [20].....	52
Obr. 22: Ozařovací linka firmy BGS	57
Obr. 23: Paleta se zkušebními tělesy a identifikátory.....	57
Obr. 24: Identifikátory pro určení počtu průjezdů ozařovacím zařízením.....	58
Obr. 25: Stupeň zesítnění pro materiál PA 6	59
Obr. 26: Stupeň zesítnění pro neplněný PA 6.6.....	60
Obr. 27: Stupeň zesítnění pro PA 6.6 plněný 25% skelných vláken.....	60
Obr. 28: Stupeň zesítnění pro neplněný PA 11	61
Obr. 29: Stupeň zesítnění pro PA 11 plněný 25% skelných kuliček	61
Obr. 30: Stupeň zesítnění pro materiál PA 12	62
Obr. 31: Čelisti zkušebního stroje ZWICK ROELL 1456.....	63

Obr. 32: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ - PBT	65
Obr. 33: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 6.....	66
Obr. 34: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 6.6.....	67
Obr. 35: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 11.....	68
Obr. 36: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 12.....	69
Obr. 37: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 6.6 plněný 25% skelných vláken	70
Obr. 38: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 23^{\circ}\text{C}$ – PA 11 plněný 25% skelných kuliček	71
Obr. 39: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PBT	72
Obr. 40: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PA 6	73
Obr. 41: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PA 6.6	74
Obr. 42: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PA 11	75
Obr. 43: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ - PA 12	76
Obr. 44: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ – PA 6.6 plněný 25% skelných vláken	77
Obr. 45: Zkouška tahem pro různé dávky ozáření při teplotě $T = 80^{\circ}\text{C}$ – PA 11 plněný 25% skelných kuliček	78
Obr. 46: Porovnání meze pevnosti pro PBT	80
Obr. 47: Porovnání modulu pružnosti pro PBT	80
Obr. 48: Porovnání napětí pro PBT při protažení 300%.....	82
Obr. 49: Porovnání modulu pružnosti pro PBT	82
Obr. 50: Porovnání meze pevnosti pro PA 6	84
Obr. 51: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6	84
Obr. 52: Porovnání napětí pro PA 6 při protažení 100%.....	86
Obr. 53: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6	86
Obr. 54: Porovnání meze pevnosti pro PA 6.6	88
Obr. 55: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6.6	88
Obr. 56: Porovnání meze pevnosti pro PA 6.6	90
Obr. 57: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6.6	90
Obr. 58: Porovnání meze pevnosti pro PA 11	92
Obr. 59: Porovnání modulu pružnosti pro PA 11	92
Obr. 60: Porovnání meze pevnosti pro PA 11	94

Obr. 61: Porovnání modulu pružnosti pro PA 11	94
Obr. 62: Porovnání meze pevnosti pro PA 12	96
Obr. 63: Porovnání modulu pružnosti pro PA 12	96
Obr. 64: Porovnání napětí pro PA 12 při protažení 200%.....	98
Obr. 65: Porovnání modulu pružnosti pro PA 12	98
Obr. 66: Porovnání meze pevnosti pro PA 6.6 25% GF.....	100
Obr. 67: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6.6 25% GF.....	100
Obr. 68: Porovnání meze pevnosti pro PA 6.6 25% GF.....	102
Obr. 69: Porovnání modulu pružnosti pro PA 6.6 25% GF.....	102
Obr. 70: Porovnání meze pevnosti pro PA 11 25% GK.....	104
Obr. 71: Porovnání modulu pružnosti pro PA 11 25% GK.....	104
Obr. 72: Porovnání meze pevnosti pro PA 11 25% GK.....	106
Obr. 73: Porovnání modulu pružnosti pro PA 11 25% GK.....	106

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vliv obsahu vázané síry ve vulkanizátech přírodního kaučuku na T _g [18]	22
Tab. 2: Radiačně síťovatelné polymery [11].....	25
Tab. 3: Přehled možných aplikací v průmyslu a vlastností po ozáření [18]	28
Tab. 4: Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku plastů [8]	37
Tab. 5: Vybrané vlastnosti polymeru PBT.....	43
Tab. 6: Vybrané vlastnosti polymeru PA 6.....	44
Tab. 7: Vybrané vlastnosti polymeru PA 6.6.....	44
Tab. 8: Vybrané vlastnosti polymeru PA 11	45
Tab. 9: Technické parametry sušícího zařízení [17].....	47
Tab. 10: Technické parametry vstřikovacího stroje [20]	49
Tab. 11: Technické parametry zkušebního stroje [17].....	51
Tab. 12: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro PBT.....	52
Tab. 13: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro PA 6	53
Tab. 14: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro neplněný a plněný PA 6.6.....	54
Tab. 15: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro neplněný a plněný PA 11	55
Tab. 16: Hodnoty nastavení vstřikovacího stroje pro PA 12	56
Tab. 17: Požadované a skutečné hodnoty ozáření	58
Tab. 18: Stupeň zesítnění jednotlivých dávek ozáření materiálu PA 6	59
Tab. 19: Stupeň zesítnění jednotlivých dávek ozáření materiálu PA 6.6	60
Tab. 20: Stupeň zesítnění jednotlivých dávek ozáření materiálu PA 11	61
Tab. 21: Stupeň zesítnění jednotlivých dávek ozáření materiálu PA 12	62
Tab. 22: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PBT	65
Tab. 23: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6	66
Tab. 24: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6.6	67
Tab. 25: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 11	68
Tab. 26: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 12	69
Tab. 27: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6.6 25% GF.....	70
Tab. 28: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 11 25% GK	71
Tab. 29: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PBT	72
Tab. 30: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6	73
Tab. 31: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6.6	74

Tab. 32: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 11	75
Tab. 33: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 12	76
Tab. 34: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 6.6 25% GF	77
Tab. 35: Hodnoty naměřené při tahové zkoušce pro PA 11 25% GK	78
Tab. 36: Výsledné hodnoty PBT	79
Tab. 37: Výsledné hodnoty PBT	81
Tab. 38: Výsledné hodnoty PA 6	83
Tab. 39: Výsledné hodnoty PA 6	85
Tab. 40: Výsledné hodnoty PA 6.6	87
Tab. 41: Výsledné hodnoty PA 6.6	89
Tab. 42: Výsledné hodnoty PA 11	91
Tab. 43: Výsledné hodnoty PA 11	93
Tab. 44: Výsledné hodnoty PA 12	95
Tab. 45: Výsledné hodnoty PA 12	97
Tab. 46: Výsledné hodnoty PA 6.6 25% GF	99
Tab. 47: Výsledné hodnoty PA 6.6 25% GF	101
Tab. 48: Výsledné hodnoty PA 11 25% GK	103
Tab. 49: Výsledné hodnoty PA 11 25% GK	105

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Certifikát 1/2
- P II Certifikát 2/2
- P III Dodací list
- P IV Materiálové listy jednotlivých materiálů (na CD)

PŘÍLOHA P I: CERTIFIKÁT 1/2

Zertifikat

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

BGS Industriestraße 9 93342 Saal
Tomas Bata University
Faculty of Technology
Assoc. Prof. Miroslav Manas
nam.T.G. Masaryka 275
762 72 Zlin
Tschechische Republik

Customer-no. : 330049
Date : 09.03.2010
Page : 1 of 2

Certificate-no.: 30300545**BGS-order-no.: 303.00410.01****Your order.: Testbars...**

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12

1 piece(s)

1 Box(es)

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

33,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 35,4 kGy

BGS-order-no.: 303.00410.02**Your order.: Testbars...**

Batch: PA6/66/11/12 +PBT

1 piece(s)

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

66,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 70,1 kGy

BGS-order-no.: 303.00410.03**Your order.: Testbars...**

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

1 piece(s)

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

99,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 105,5 kGy

Bestrahlungszertifikat - Certificate of irradiation - Certificat d'irradiation
BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE



PŘÍLOHA P II: CERTIFIKÁT 2/2

Zertifikat

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

Certificate-no.: 30300545
Page : 2 of 2**BGS-order-no.:** 303.00410.04**Your order.:** Testbars...

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

1 piece(s)

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

132,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 139,0 kGy

BGS-order-no.: 303.00410.05**Your order.:** Testbars...

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

1 piece(s)

PE für Rotation

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

165,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 173,2 kGy

BGS-order-no.: 303.00410.06**Your order.:** Testbars...

Batch: PA6/66/11/12

1 piece(s)

Article: irradiation of samples

Type of irradiation:

Electrons

Energy [MeV]:

10

Min. dose [kGy]:

198,00

Irradiation date:

08.03.2010

measured dose: 207,2 kGy

Bestrahlungszertifikat - Certificate of irradiation - Certificat d'irradiation
BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE BGS IDEEN PLUS ENERGIE

PŘÍLOHA P III: DODACÍ LIST

BGS

IDEEN PLUS ENERGIE

Telefon +49 (9441) 1777-0
Telefax +49 (9441) 1777-44

Internet: www.bgs.eu
E-Mail: info@bgs.eu

BGS Industriestraße 9 93342 Saal

Tomas Bata University
Faculty of Technology
nam.T.G. Masaryka 275
762 72 Zlin
Tschechische Republik

Original
Customer-no. : 330049
Date : 09.03.2010 / sg
Page : 1 of 2

Delivery note-no.: 30300592

BGS-order-no.: 303.00410.01

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12

1 piece(s) 1 Box(es)

Quantity delivered: 1 piece(s) 1 Box(es)

BGS-order-no.: 303.00410.02

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12 +PBT

1 piece(s)

Quantity delivered: 1 piece(s)

BGS-order-no.: 303.00410.03

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

1 piece(s)

Quantity delivered: 1 piece(s)

BGS-order-no.: 303.00410.04

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

1 piece(s)

Quantity delivered: 1 piece(s)

BGS-order-no.: 303.00410.05

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12 + PBT

1 piece(s)

PE für Rotation

Quantity delivered: 1 piece(s)

BGS-order-no.: 303.00410.06

Your order-no.: Testbars

Article: irradiation of samples

Batch: PA6/66/11/12

1 piece(s)

Quantity delivered: 1 piece(s)

Total quantity:

1 Box(es)

BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG · Sitz Wiehl · Registergericht Köln HRA 16938 · USt.-IdNr.: DE 122 533 721

Persönlich haftender Gesellschafter BGS Beteiligungs GmbH · Sitz Wiehl · Registergericht Köln HRB 38648 · Geschäftsführer: Dr. Andreas Ostrowicki

Volksbank Oberberg eG
Kto. 6 433 014 · BLZ 384 621 35
IBAN Nr. DE 54 38462135 0006433014
BIC Nr. GENODE33WIL

Deutsche Bank Gummersbach
Kto. 0 123 430 · BLZ 384 700 91
IBAN Nr. DE 61 38470091 0012343000
BIC Nr. DEUTDE33 384

Commerzbank Gummersbach
Kto. 7 865 777 · BLZ 384 400 16
IBAN Nr. DE 96 38440016 0786577700
BIC Nr. COBADE33 384