

Vliv ionizačního beta záření na mechanické vlastnosti vybraných typů polymerů pod teplotním zatížením

Ing. David Blaťák

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ing. David Blažák**

Osobní číslo: **T14794**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv ionizačního beta záření na mechanické vlastnosti vybraných typů polymerů pod teplotním zatížením**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **MAKUUCHI, Keizo a Song CHENG. Radiation processing of polymer materials and its industrial applications. Hoboken, N.J.: Wiley, c2012, xxviii, 415 s. ISBN 978-0-470-58769-0.**
2. **DROBNY, Jiri George. Ionizing radiation and polymers: principles, technology and applications. 1st pub. Oxford: Elsevier/William Andrew, 2013, xvi, 298 s. ISBN 978-1-4557-7881-2.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



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



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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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 10. 5. 2016



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 nevydělěčně 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 předpis vysoké školy.

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem ionizačního beta záření na mechanické vlastnosti (modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a poměrné prodloužení) vybraných typů polyolefinů pod teplotním zatížením. V teoretické části je na začátku uvedeno několik kapitol, které se týkají uvedení čtenáře do řešené problematiky. Obecně jsou zde popsány metody, které se vztahují k modifikaci polymerů, jaké existují metody a jaké jsou jejich vlastnosti. Dále jsou popsány jednotlivé druhy záření, které se týkají ionizačního záření, a na to následuje kapitola, která vysvětluje samotné radiační síťování polymerů. Poslední kapitola teoretické části se již samostatně věnuje konkrétně síťování polyetylenu. V praktické části je shrnut cíl diplomové práce a již konkrétní výsledky práce. To znamená naměřená data, jejich vyhodnocení a stanovení závěrů. V příloze jsou přiložena naměřená data.

Klíčová slova: modifikace polymerů, ionizační záření, radiační síťování, polyetylen

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the influence of ionizing beta radiation on the mechanical properties (tensile modulus, tensile strength and elongation) of selected types of polyolefin under thermal loads. At the beginning in the theoretical part is several chapters related to refer some information about this topic to the reader. Generally in these chapters are described methods, which are related to modifications of polymers, which methods exists and what are their properties. The following chapter describes the various types of radiation, which relate to the ionizing radiation and explains radiation cross-linking polymers. The last chapter in theoretical part is focused only on a cross-linking of polyethylene. In the practical part is summarized the aim of the diploma thesis and the results of the work. That means the measured data, evaluation and conclusions. There are also attached the measured data in the end of diploma thesis.

Keywords: Modification of Polymers, Ionizing Radiation, Radiation Cross-linking, Polyethylene

Rád bych poděkoval zejména vedoucímu práce Ing. Martinu Bednařikovi, Ph.D., který mi v mnohém poradil, nasměroval a poskytl věcné připomínky, které mi pomohly při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG. za technickou podporu a pomoc při modifikaci zkušebních těles.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 MODIFIKACE VLASTNOSTÍ POLYMERŮ	11
1.1 FYZIKÁLNÍ MODIFIKACE	11
1.2 MECHANOCHEMICKÁ MODIFIKACE.....	12
1.3 CHEMICKÁ MODIFIKACE	12
2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	14
2.1 CHARAKTERISTIKA ZÁŘENÍ	14
2.2 CHARAKTERISTIKA IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ	14
2.2.1 Záření alfa	15
2.2.2 Záření beta.....	16
2.2.3 Záření gama.....	17
2.2.4 Neutronové záření	18
2.2.5 Porovnání jednotlivých druhů záření	18
2.3 MĚRNÉ JEDNOTKY IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ.....	19
2.3.1 Kinetická energie elektronu	19
2.3.2 Dávka	19
2.3.3 Dávková intenzita.....	20
2.3.4 Aktivita.....	20
3 SÍŤOVÁNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	21
3.1 ZPŮSOBY TVOŘENÍ SÍTĚ	21
3.2 SÍŤOVACÍ PROSTŘEDKY	22
3.3 SÍŤOVÁNÍ PEROXIDY	23
3.4 SÍŤOVÁNÍ ELASTOMERŮ NA BÁZI 1, 3 – DIENŮ SÍROU.....	23
3.5 SÍŤOVÁNÍ KYSLÍKEM	24
3.6 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	24
3.6.1 Princip metody	25
3.6.2 Radiačně síťované polymerní materiály	25
3.6.3 Vliv radiačního síťování na vlastnosti polymerů	26
3.6.4 Použití v praxi	28
3.7 OZAŘOVÁNÍ POLYETYLENU	29
3.7.1 Možnosti uplatnění zesíťovaného polyetyleny	30
4 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYETYLENU	32
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	36
6 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ	37
6.1 POLYETYLEN	37
6.2 ROZDĚLENÍ POLYETYLENU	37
6.3 VLASTNOSTI POLYETYLENU	38
6.3.1 HDPE	39
6.3.2 LDPE.....	39
7 OZÁŘENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	40

8	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ	41
8.1	ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 1456.....	41
8.2	TEPLOTNÍ KOMORA ZWICK ROELL W91255.....	43
8.3	PRŮBĚH MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ.....	44
9	HLAVNÍ VÝSLEDKY	46
9.1	MODUL PRUŽNOSTI V TAHU	46
9.1.1	Nemodifikovaný (neozářený) materiál.....	48
9.1.2	Materiál modifikovaný dávkou záření 99 kGy	49
9.1.3	Materiál modifikovaný dávkou záření 132 kGy	50
9.1.4	Materiál modifikovaný dávkou záření 165 kGy	51
9.1.5	Materiál modifikovaný dávkou záření 198kGy	53
9.2	MEZ PEVNOSTI V TAHU	54
9.2.1	Nemodifikovaný (neozářený) materiál.....	56
9.2.2	Materiál modifikovaný dávkou záření 99 kGy	57
9.2.3	Materiál modifikovaný dávkou záření 132 kGy	58
9.2.4	Materiál modifikovaný dávkou záření 165 kGy	59
9.2.5	Materiál modifikovaný dávkou záření 198 kGy	61
9.3	POMĚRNÉ PRODLOUŽENÍ PŘI MEZI PEVNOSTI V TAHU	62
9.3.1	Nemodifikovaný (neozářený) materiál.....	64
9.3.2	Materiál modifikovaný dávkou záření 99 kGy	65
9.3.3	Materiál modifikovaný dávkou záření 132 kGy	67
9.3.4	Materiál modifikovaný dávkou záření 165 kGy	68
9.3.5	Materiál modifikovaný dávkou záření 198 kGy	69
10	DISKUZE VÝSLEDKŮ	70
10.1	MODUL PRUŽNOSTI V TAHU - HDPE	70
10.2	MODUL PRUŽNOSTI V TAHU - LDPE.....	71
10.3	MEZ PEVNOSTI V TAHU - HDPE	73
10.4	MEZ PEVNOSTI V TAHU - LDPE.....	74
10.5	POMĚRNÉ PRODLOUŽENÍ PŘI MEZI PEVNOSTI V TAHU - HDPE.....	76
10.6	POMĚRNÉ PRODLOUŽENÍ PŘI MEZI PEVNOSTI V TAHU - LDPE	77
	ZÁVĚR	80
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	81
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
	SEZNAM TABULEK.....	89
	SEZNAM PŘÍLOH.....	90

ÚVOD

Primární efekt při jakémkoliv ionizačním záření je založen na jeho schopnosti vzbudit a ionizovat molekuly, což má za následek vznik volných radikálů, které následně vyvolají reakci zvanou jako radiační síťování.

Jakmile je energie v ozářeném materiálu větší než energie elektronu, elektron ustoupí a atom je ionizován. Pokud energie není pro ozáření dostatečná, elektron zvýší svou energetickou hodnotu a to má za následek opačný jev – excitaci. Ionizační potenciál pro většinu molekul je menší než 15 eV, zatímco energetický výkon průmyslových zářičů je v rozmezí od 100 keV až do 10 MeV, což znamená, že ionizace je dominující proces.

Obecně tedy, změny v materiálu nejvíce záleží na množství absorbované energie, bez ohledu na to, zda to bylo vyvoláno přírodním zdrojem nebo přirozeně urychlenými elektrony. Oba druhy komerčně používaných záření snižují intenzitu při průchodu materiálu. Stane se to z toho důvodu, že se energie rozptýlí a přemění do ozářených materiálů.

Střední hodnota absorbované energie je uváděna v jednotkách a bývá označována buď jako absorbovaná dávka anebo pouze dávka. Jednotka, která se vztahuje k absorbované dávce je 1 gray (Gy), což odpovídá 1 J/kg. V praxi je poté nejčastěji udávaná hodnota 1 kGy, který se rovná 1 J/g. Dříve používaná jednotka, oficiálně do roku 1986, je 1 megarad (Mrad), který odpovídá 10 kGy. S touto jednotkou se lze ještě občas setkat, převážně v literatuře. Za energetickou hranici ionizujícího záření se obvykle považuje energie 5 eV.

K tomuto použití se vztahují tři druhy záření, je to fotonové (rentgenové a gama), alfa záření a elektronové záření (beta).

Zdroje elektronového záření produkují elektronové paprsky, které dodávají a urychlují proud elektronů skrz elektromagnetické a elektrostatické pole. Síla elektronových paprsků, jakožto záření je řízena přes napětí a proud paprsků. Proud paprsků určuje počet urychlených elektronů. Nejčastěji používané energetické rozpětí je od 100 keV do 10 MeV a energie paprsků v rozmezí od 0,5 do 200 kW.

Když elektronové záření vstoupí do materiálu, energie urychlených elektronů se významně změní, ztratí energii a téměř nepřetržitě se zpomalí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MODIFIKACE VLASTNOSTÍ POLYMERŮ

Modifikací polymerů se rozumí záměrná přeměna polymerů prováděna za účelem získání nového polymerního materiálu s odlišnými vlastnostmi. Jedná se o velmi široký pojem, který zahrnuje velký počet způsobů fyzikálních a chemických přeměn polymerů. Vlastnosti polymerů závisejí na jejich fázovém stavu, molekulové hmotnosti a chemickém složení. K získání modifikovaných polymerů se používají tyto základní způsoby:

- fyzikální modifikace mechanickým smícháním dvou nebo více polymerů,
- mechanochemická modifikace, při níž se mechanickou cestou, např. intenzivním hnětením, za podmínek a přítomnosti látek usnadňujících destrukci, vzniknou reaktivní úseky polymerních řetězců, které se buď navzájem propojí, nebo zreagují s přítomným monomermem schopným polymerace,
- chemická modifikace na základě chemických reakcí účinných látek s reaktivními skupinami polymerních řetězců. [1][2]

1.1 Fyzikální modifikace

Jde o nejjednodušší způsob modifikace polymerů a v současné době bývá stále více používán. Mechanickým smícháním dvou nebo více polymerů se mnohdy získají směsi s vynikajícími mechanickými vlastnostmi. [1]

Modifikující látky se fyzikální modifikací do polymerních řetězců nezabudovávají, ale zůstávají rozptýlené ve hmotě polymerů. Mezi fyzikální modifikace polymerů patří:

- mísení dvou a více polymerů: jednoduchá metoda, jenž je ve většině případů vede k vynikajícím mechanickým vlastnostem vzniklé polymerní směsi, např. u houževnatého polyvinylchloridu připraveného smíšením s butadienakrilonitrilovým kaučukem,
- použití přísad: přísady ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti polymerů, makromolekulární látky fungují jako pojivo a určují základní a fyzikální vlastnosti polymerů, přísady mohou být organické anebo anorganické podstaty, jsou to plniva, stabilizátory, maziva, barviva, změkčovadla, nadouvadla, tvrdidla a podobně. [1][3]

1.2 Mechanochemická modifikace

K mechanochemické modifikaci polymerů dochází reakcí aktivních částic, které vznikají při mechanické destrukci makromolekulárních řetězců. Používá se při ní v podstatě dvou základních metod:

- mechanické degradace směsi polymerů,
- mechanické degradace polymeru v přítomnosti monomeru. [1][2]

V prvním případě vznikají modifikované polymery kombinací makroradikálů, eventuálně reakcí makroradikálů s mechanicky aktivovanými polymerními řetězci. Ve druhém případě vznikající makroradikály iniciují polymeraci přítomného monomeru. V obou případech probíhá současně řada reakcí, které vedou mimo jiné ke vzniku roubovaných nebo blokových kopolymerů, lišících se strukturou a délkou bloků. Výsledný produkt není ze strukturního hlediska ani zdaleka jednotný a jednoznačně definovatelný. Obvykle je pro tento druh kopolymeru, obsahujícího různé zastoupení uvedených struktur kopolymeru, obsahujícího různé zastoupení uvedených struktur spolu s homopolymery, používán název interpolymery. [1][2]

K mechanochemické modifikaci polymerů patří tzv. plastikace kaučuků, což je hnětení na dvouválcích, hnětacích strojích za přítomnosti tzv. plastikačních činidel a při zvýšené teplotě, nebo ve speciálních vytlačovacích strojích. Touto operací se příliš velké kaučukové makromolekuly štěpí na poněkud menší tím, že makroradikály vzniklé intenzivním hnětením se zakončí vzdušným kyslíkem nebo radikály vzniklými z plastikačních činidel. Tím klesne střední molekulová hmotnost kaučuku, čímž se uvede do snáze zpracovatelného stavu. [1][2]

1.3 Chemická modifikace

Chemická modifikace polymeru je úmyslná přeměna chemické struktury polymerů působením účinných chemických látek nebo reakčních podmínek. Chemické reakce polymerů lze z hlediska délky makromolekulárních řetězců rozdělit na reakce, při kterých:

- polymerační stupeň zůstává zachován: nazývají se též polymeranalogické a patří sem reakce jako například halogenace, esterifikace a hydrolýza,

- polymerační stupeň se mění: zvětšováním nebo snižováním velikostí makromolekul
 - roubováním, síťováním, degradací nebo depolymerací, záměrné snižování polymeračního stupně se příliš nevyužívá, pouze ojediněle. [1][2]

2 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Polymery byly již od počátku užívání v obecné praxi podrobovány podrobnému výzkumu a zkouškám, prostřednictvím kterých se zjišťovalo, jak se určité materiály chovají při určitém zatížení daného druhu a jak tyto podmínky snášejí. Avšak výzkum degradace a odolnosti makromolekulárních látek při působení ozáření o vysoké energii nabral na intenzitě až koncem první poloviny dvacátého století v souvislosti s nezadržitelným rozvojem atomové energie. [2]

2.1 Charakteristika 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.
- 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 β (proud rychle letících elektronů) nebo α (proud héliových jader). Jedná se o záření korpuskulární. [4][5]

2.2 Charakteristika ionizujícího záření

Ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. Záření se může šířit ve vakuu, volné šíření vln a volný pohyb částic podle zákona setrvačnosti; nebo v látkovém prostředí, kde částice může projít původním směrem, avšak větší či menší část záření bývá rozptýlena či absorbována. [1][6]

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. [5]

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 . [5][7]

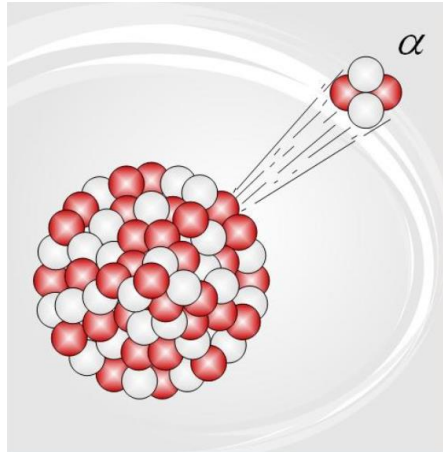
S ohledem na charakter ionizačního procesu je možno ionizující záření rozdělit na přímo ionizující a nepřímo ionizující. Přímě ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi (protony, elektrony, pozitrony atp.). Nepřímě ionizující záření zahrnuje nenabitě částice (neutrony, fotony atp.), které prostředí 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. [5][7]

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. [5][7]

2.2.1 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 $+2e$). [5]



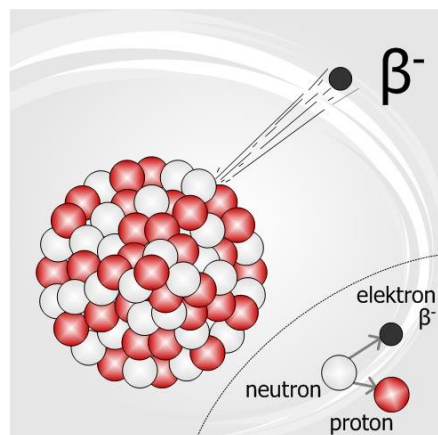
Obr. 1. Záření alfa. [5]

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

Záření alfa se vychyluje jak v elektrickém tak v magnetickém poli. Částice alfa letí velkou rychlostí a mají silné ionizační účinky. Jejich kinetická energie se pohybuje mezi 2 MeV a 8 MeV. [5]

2.2.2 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. [5]



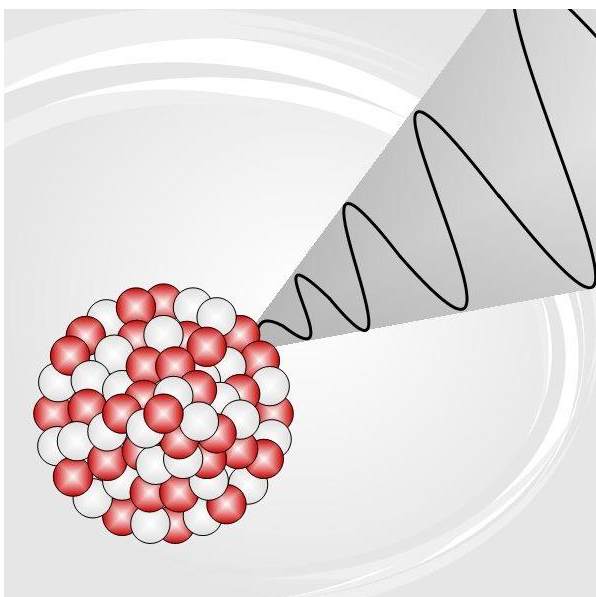
Obr. 2. Záření beta. [5]

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.

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. [5]

2.2.3 Záření gama

Záření gama (γ) je vysoce energetické elektromagnetické záření vznikající při radioaktivních a jiných jaderných a subjaderných dějích. [5]



Obr. 3. Záření gama. [5]

Gama záření silně ionizuje, uvolňuje z látky nabitě částice v důsledku fotoefektu. Zdrojem záření je jádro izotopu, který vznikl přeměnou radionuklidu. Toto jádro je excitované, v krátké době však přechází do základního stavu a tento přechod je spojen s vyzářením fotonů záření gama. [5]

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

2.2.4 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 nenesení elektrický náboj, a nemůže tak ztrácet energii přímou ionizací. [5]

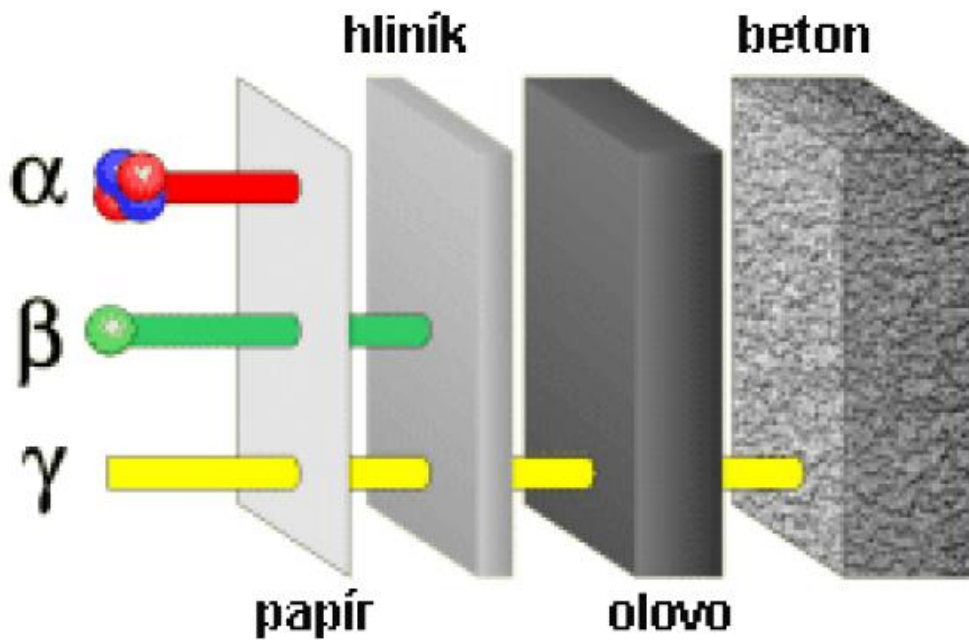
2.2.5 Porovnání jednotlivých druhů záření

Hlavní rozdíl mezi již zmiňovanými druhy záření je především v intenzitě dávky ozáření a ve schopnosti pronikat materiálem.

Alfa částice mají velmi malý průnik do jakéhokoliv typu materiálu. Zdroj záření musí být navíc umístěn co nejbližší k ozařovanému materiálu a to z důvodu zpomalení částic již při průchodu vzduchem.

Co se týká beta záření, tak je na tom z hlediska schopnosti pronikat materiálem o poznání lépe než záření alfa. Hloubka vniknutí je však omezená a především závislá na energii urychlených elektronů. Vzhledem k nepravidelné trase elektronu v materiálu nelze jejich hloubku průniku přesně definovat. Lze však maximální hloubku odhadnout a to v závislosti na velikosti napětí urychlovače. K ozařování beta zářením jsou zapotřebí vysoké intenzity dávek záření.

Gama záření se vyznačuje největší schopností penetrace ze všech zmiňovaných druhů záření. Oproti beta záření pracuje s relativně nízkými intenzitami dávek záření. 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. [8][9]



Obr. 4. Porovnání pronikavosti jednotlivých druhů záření. [8]

2.3 Měrné jednotky ionizačního záření

2.3.1 Kinetická energie elektronu

Jednotkou této veličiny je elektron-volt (eV). Jeden elektronvolt odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu. [8][10]

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

2.3.2 Dávka

Dávka je vyjádřena jako poměr střední energie předané ionizujícím zářením látce o dané hmotnosti. Dříve tuto veličinu charakterizovala jednotka rad. Nyní používáme jako základní jednotkou absorbované dávky Gray (Gy). Je to energie jednoho joulu absorbovaná v kilogramu látky. [10]

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 100 \text{ rad}$$

2.3.3 Dávková intenzita

Dávková intenzita je definována jako přírůstek dávky za časový interval. Dříve se používal pojem dávková rychlost. Jednotkou dávkové intenzity je $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$. [10]

$$1 \text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1} = 1 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$$

2.3.4 Aktivita

Aktivita charakterizuje množství radioaktivní látky. Představuje počet radioaktivních přeměn v látce vztažený na jednotku času. Pro tuto veličinu se používá jednotka Becquerel (Bq). [10]

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad/s}$$

3 SÍŤOVÁNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

Pod tímto pojmem rozumíme vzájemné spojování polymerních řetězců za vzniku trojrozměrné prostorové sítě. Vzhledem k ohromné délce makromolekulárních řetězců stačí přidavek zcela malého množství síťovacího činidla, aby molekulová hmotnost polymeru vzrostla nekonečně, to znamená, že se celý výrobek stává jednou molekulou.

O vulkanizaci mluvíme v případě síťování lineárních polymerů, jenž je charakteristické pro kaučuky. V poslední době se síťování uplatňuje i u jiných lineárních polymerů. Např. u polyetyleny, polypropylenu a polyvinylchloridu, kterým tento proces propůjčuje některé výhodné vlastnosti, např. tvarovou stálost za zvýšených teplot a zlepšení fyzikálně mechanických vlastností.

Lineární polymer, který obsahuje v řetězci reaktivní místa, je schopen reagovat se síťovacím činidlem za vzniku chemických příčných vazeb. Ty spojují strukturální jednotky různých řetězců. V praxi je nejčastější případ funkční příčná vazba, která spojuje dvě strukturální jednotky. Pokud má molekula síťovacího činidla více reaktivních míst, vznikne polyfunkční příčná vazba.

Zesíťované polymery nejsou rozpustné v rozpouštědlech, většinou nimi jenom bobtnají a jsou netavitelné, proto je účelnější vytvořit síťovou strukturu až v hotovém výrobku. Do určitého, malého stupně zasíťování si zachovávají jistou tepelnou tvarovatelnost, jež se vzrůstající koncentrací příčných vazeb prudce klesá. Čím hustěji je polymer zesíťován, tím obtížněji do něj vnikají nízkomolekulární látky a tím více klesá jeho navlhavost. [1][3]

3.1 Způsoby tvoření sítě

Prostorově zesíťované struktury vznikají různými způsoby, zejména to je:

- 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.

Trojrozměrná struktura (prostorová síť – gel) vzniká větvením v průběhu reakce u polymerů, které mají více než dvě funkční jednotky. V případě že má polymer pouze dvě funkční jednotky, vzniká lineární polymer.

Při síťování se v první fázi zvětšují rozměry molekul a polydisperzita systému vzrůstá. V určitém stádiu reakce dojde systém do bodu gelace. V bodě gelace vzroste molekulová hmotnost nad veškeré meze a v systému se objeví první stopy nekonečné struktury (gelu). Po překročení bodu gelace se systém skládá z části nekonečné struktury a z molekul konečné velikosti. Molekuly konečné velikosti lze oddělit od gelu extrakcí, protože gel v rozpouštědle pouze bobtná. V dalším průběhu reakce obsah konečně dlouhých molekul klesá a molární hmotnost i polydisperzita systému se zmenšuje. V poslední fázi reakce v gelu vznikají tzv. elasticky aktivní řetězce sítě, které určují velikost modulu pružnosti a rovnovážný stupeň nabobtnání gelu. [1][11]

3.2 Síťovací prostředky

Látky účastnící se síťovacích reakcí se nazývají síťovací prostředky. Síťovací reakce je spojování lineárních nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců příčnými vazbami do struktury prostorové sítě.

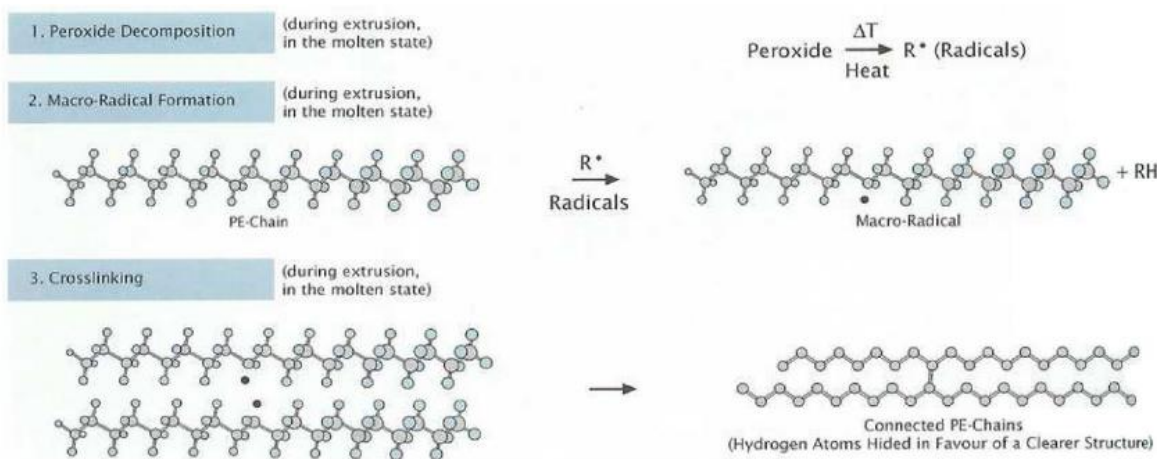
Mezi síťovací prostředky patří:

- síťovací činidla – mnoho polymerů bez nich nemůže zesíťovat, proto jsou pro síťovací reakci nejdůležitější, jsou průvodcem příčných vazeb, v průmyslu jsou nejdůležitější síťovací prostředky pro termoplasty organické peroxidy a záření o vysoké energii, nejúčinnější je záření gama anebo svazky urychlených elektronů,
- aktivátory síťování – zmenšují aktivační energii a tím aktivují síťovací reakci, v jejich přítomnosti vniká hustší síť (více příčných vazeb) z určitého množství síťovacího činidla.

V polymerech, ve kterých mají malou síťovací účinnost radikály vzniklé rozpadem organických peroxidů, se používají přísady vícefunkčních monomerů, které síťovací účinnost výrazně zvětšují. Nejčastěji používané aktivátory tohoto typu jsou triallylcyanuran (TAC) a triallylizocyanuran (TAIC). Zvýšení síťovacího účinku bývá více než 20 %. [1][3][11]

3.3 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., jenž dále reaguje polymerním řetězcem. Při této rekombinaci polymerních radikálů dochází ke spojení řetězce přes C-C vazbu. [5][11]



Obr. 5. Síťování polyetyleny pomocí peroxidu. [5]

3.4 Síťování elastomerů na bázi 1, 3 – dienu 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 nenasycených 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 zesíťení. [5][11]

S rostoucím obsahem vázané síry u vulkanizátů přírodního kaučuku se zvyšuje teplota skelného přechodu (Tab. 1). [5]

Tab. 1. Vliv obsahu vázané síry ve vulkanizátech přírodního kaučuku na T_G . [5]

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

3.5 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. [5][11]

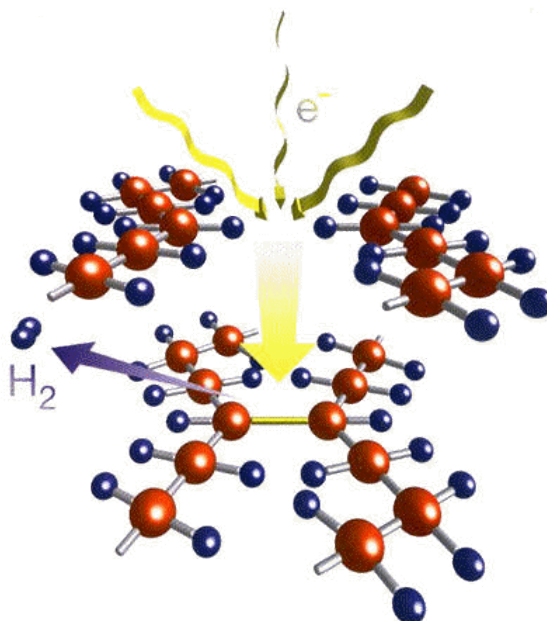
3.6 Radiační síťování

Radiační síťování je poměrně nová rozvíjející se technologie zlepšování mechanických, chemických a teplotních vlastností plastů za použití beta nebo gama záření. To umožňuje v

některých případech použití levnějších masových nebo konstrukčních plastů, které tímto zesíťováním dosahují vlastností drahých konstrukčních a speciálních termoplastů. [2][11]

3.6.1 Princip metody

Radiační síťování je proces, při kterém je materiál vystaven ionizujícímu záření za vzniku volných radikálů. Tento proces zahrnuje formování chemických vazeb mezi částmi jedné molekuly nebo mezi jednotlivými molekulami. Základním předpokladem je, že nedochází vlivem ionizačního záření ke štěpení makromolekul, tzv. degradaci, ale k síťování. Jak degradace, tak síťování probíhají paralelně. Podle chemické struktury polymeru se odvíjí spíše síťovací nebo degradační proces. Zatím co během ozařování vodíkově-uhlíkové polymery se strukturou $-\text{CH}_2\text{-CHR}-$ převážně síťují a polymery se strukturou $-\text{CH}_2\text{-CR}_1\text{R}_2-$ degradují. R_1 a R_2 představují radikály, které nejsou ani vodíkové ani halogenové atomy. Za výjimku se považuje polyvinylalkohol (PVA) který při ozařování degraduje. [3][7]

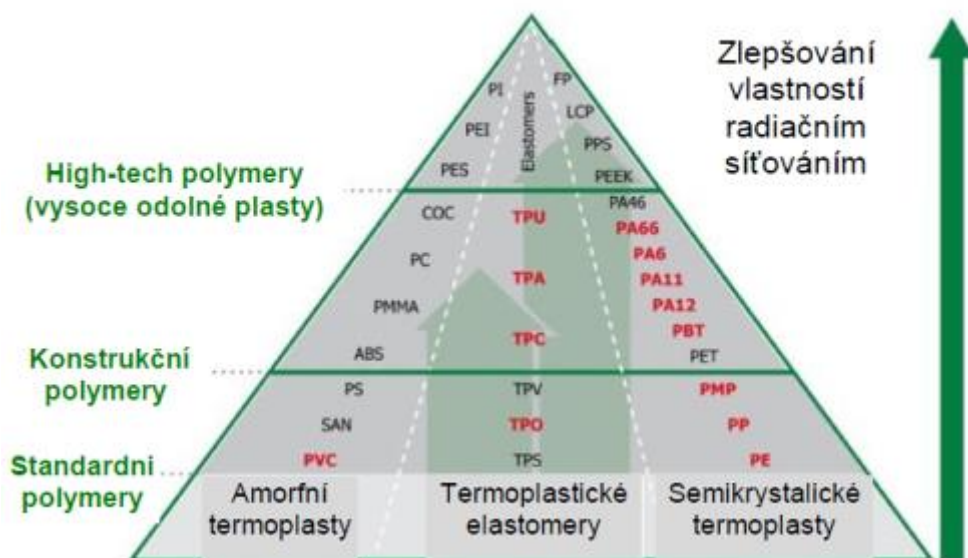


Obr. 6. Princip radiačního síťování. [12]

3.6.2 Radiačně síťované polymerní materiály

Při volbě vhodného materiálu jsou rozhodující užité vlastnosti a oblasti použití výrobků. Pomocí radiačního síťování mohou vzniknout ekonomicky výhodnější výrobky srovnatel-

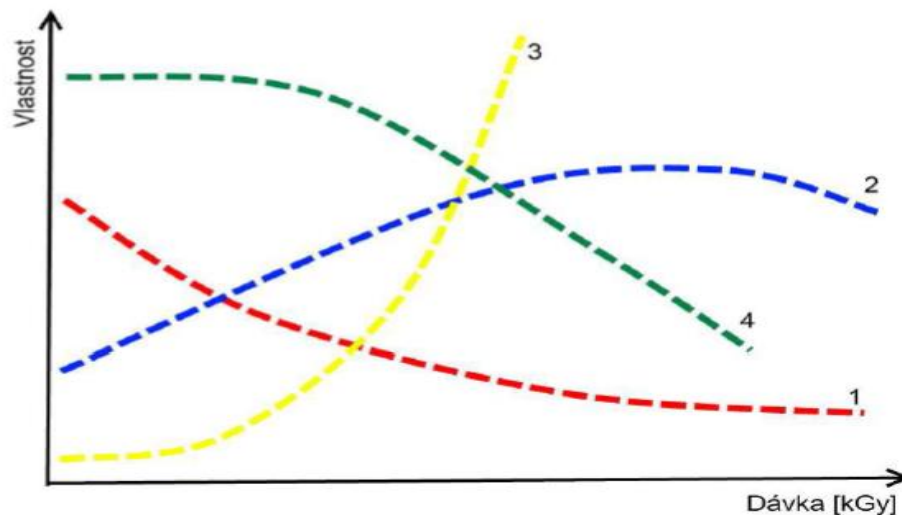
né s dražšími high-tech polymerními materiály. V technické praxi jsou hlavními zástupci síťovaných polymerů polyetylen (PE), polyamidy (PA), polyvinylchlorid (PVC), polybutylentereftalát (PBT) a termoplastické elastomery. Pro některé polymery je třeba přítomnost síťovacích činidel. [3][9]



Obr. 7. Polymery vhodné pro radiační síťování. [13]

3.6.3 Vliv radiačního síťování na vlastnosti polymerů

Od druhu materiálu a dávky záření se odvíjí změny mechanických, teplotních a chemických vlastností ozařovaného materiálu. Některé termoplasty získávají především nad teplotou skelného přechodu neupraveného materiálu po poměrně širokou teplotní oblast vlastnosti elastomerů. [3]



Obr. 8. Závislost ozařující dávky na některých vlastnostech polymerů. [3]

1. Tažnost, 2. Pevnost v tahu, 3. Tvarová stálost za tepla, 4. Bobtnání

Vliv u mechanických vlastností:

- nárůst Youngova modulu pružnosti,
- zvýšení pevnosti (zejména z dlouhodobého hlediska),
- pokles poměrného prodloužení při přetržení (tažnosti),
- redukce studeného tečení (creep),
- nárůst tvrdosti (Shore),
- zlepšení meze únavy (při střídavém ohybu),
- zlepšení povrchové pevnosti vůči otiskům a nespojitosti vstříkovaných dílů,
- zlepšení odolnosti proti vnitřnímu pnutí a redukce přenosu a růstu,
- zlepšení zotavení materiálu „memory effect“,
- zlepšení ošetrivostnosti (podmíněně),
- zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem.

Vliv u 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 žhavou smyčkou
- vyšší odolnost proti stárnutí.

Vliv u chemických vlastností:

- výrazné zvýšení odolnosti proti působení chemických látek,
- snížení rozpustnosti,
- zlepšení odolnosti proti bobtnání,
- zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin způsobených pnutí,
- zlepšení odolnosti vůči hydrolýze,
- zvýšení oleji vzdornosti.

3.6.4 Použití v praxi

Míra zlepšení všech zmiňovaných vlastností ozářených polymerů závisí na dávce ozáření a především na typu polymeru. Každý polymerní materiál se po ozáření chová jinak. Nelze čekat, že dojde ke zlepšení ve všech oblastech, ať už v oblasti mechanických, tepelných či chemických. Vlivem ozáření u některých polymerů dochází k degradaci a tím ke zhoršení vlastností, proto některé polymery nemá smysl ozařovat. [8][14]

Tab. 2. Přehled možných použití v průmyslu a vlastností po ozáření. [5]

Aplikace	Materiál	Zlepšené vlastnosti
Palivová potrubí pro automobilový průmysl	Polyamidy 6, 66, 11, 22	Tepelná odolnost Odolnost proti hydrolýze Pevnost v tlaku
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 effect“
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

3.7 Ozařování polyetylenů

Polyetylen byl jedním z prvních polymerů, jejichž chování při ozáření vykazovalo jisté odchylky a to vzbudilo velký zájem. Nejprve byly vyjádřeny pochybnosti o možnosti chemické reakce, jako je síťování, vyžadující interakci dvou sousedních radikálů, vzhledem k názorům, že se jedná o plně nasycený polymer, ale již brzy se ukázalo, že k této reakci dochází s relativně vysokou účinností. [9][11][15]

Důležitou část při ozařování polyolefinu představuje zejména zpracování polyetylenu. Nízko a vysoko hustotní síťovaný polyetylen je v současné době běžně používán v průmyslových oborech. Polyetyleny mohou být ozařovány v mnoha formách, jako jsou granule a prášky, folie, extrudované a lisované díly anebo jako izolace vodičů a kabelů.

Účinky ionizujícího záření na polyetylén ve všech jeho podobách lze shrnout:

- uvolňování vodíku,
- vznik vazby uhlík-uhlík (síťování),
- snížení krystaličnosti,
- změna barvy subjektu,
- oxidace povrchu při ozařování ve vzduchu.

Tvorba vazby uhlík-uhlík je nejvýznamnější vlastností pro aplikaci ozařování v průmyslu při úpravě drátů, kabelů a teplem smrštitelných produktů. Mezi faktory, které ovlivňují změny v polyetylenu zářením, patří molekulová hmotnostní distribuce, větvení, stupeň nenasycení a morfologie. [9][11][15]

U vinylových polymerů vystavené ionizujícímu záření (ať už to jsou fotony, elektrony, protony či neutrony) se objevují dva hlavní typy reakcí: síťování a degradace. Obecně platí, že se tyto reakce vyskytují současně, i když s vysokými záření převažuje degradace, s nízkými dávkami záření určuje struktura polymeru, jaká z těchto reakcí bude dominantní.

Nízko-hustotní polyetylén (LDPE), vyrobený vysokotlakou polymerací, obsahuje dlouhé větve připojené k hlavnímu řetězci. Lineární nízko-hustotní polyetylén (LLDPE) se vyznačuje poměrně pravidelným střídáním krátkých vláken na řetězci. Oba tyto typy jsou v malém množství nenasyceny, ale lineární vysoko-hustotní polyetylén (HDPE) obsahuje jeden terminál vinylové skupiny na molekulu. Při nízkých dávkách záření má tato vinylová skupina za následek zvyšování molekulové hmotnosti HDPE změnou řetězce díky tvorbě Y-vazby mezi vinyl a sekundární alkyl radikály produkované zářením. [9][11][15]

Ve srovnání s chemickým síťováním polyetylénu je radiačně vytvrzený produkt v mnoha ohledech jiný. Chemické síťování se provádí při teplotách blízké 125 °C, kdy je polymer v roztaveném stavu. Z toho vyplývá, že hustota síťování je téměř rovnoměrně rozložena. Radiační síťování polyetylénu vyžaduje podstatně nižší celkovou energii, je rychlejší, efektivnější a je ekologicky přijatelnější. Chemicky síťovaný polyetylen obsahuje chemické látky, ty mají často nežádoucí účinky na dielektrické vlastnosti a v některých případech jsou prostě nepřijatelné.

Teplota vzorku v době působení záření je důležitá. Například snížení teploty pomocí tekutého dusíku se zabraňuje vzniku allyl dvojných vazeb formující se během ozařování v polyetylénu a vzniklé volné radikály, které jsou výsledkem ozařování, zůstanou zamrzlé v materiálu a nemůžou reagovat, dokud se materiál nezahřeje na vyšší teplotu. Ozařování polyetylénu v tekutém stavu způsobuje větší stupeň síťování než při pokojové teplotě. Stupeň zesíťování se s rostoucí teplotou na T_g (~ -40 °C) neustále zvyšuje a pod teplotou T_g se polyetylen stává necitlivý.

Existují studie dokazující velké rozdíly ve vzniku sítí vlivem ozařování při ozařování lineárního polyetylen v tuhém stavu a v tavenině.

Pokud se nezamezí přítomnost molekul kyslíku při ozařování, bude u polyetylénu probíhat zvýšený výskyt degradace. To povede ke křehnutí a štěpení řetězců. [9][11][15]

3.7.1 Možnosti uplatnění zesíťovaného polyetylénu

Následující odstavce popisují stručně některé z vlastností modifikovaného polyetylénu radiačním síťováním. Ačkoliv síťování může být způsobeno čistě chemickými prostředky, radiační síťování má značné výhody, které nelze dosáhnout jiným způsobem. Některé příklady použití těchto výhod jsou zmíněny v následujících odstavcích. [9][11][15]

Paměťový efekt

Při pokojové teplotě je polyetylen převážně krystalický. Při zahřátí na teplotu přibližně 120 °C až 145 °C tyto krystaly zmizí a polymer se přemění na vysoce viskózní taveninu. Při opětovném ochlazení dojde ke krystalizaci a polymer začne tuhnout do tvaru podobného tomu, který měl před teplotou tání krystalu. Velmi rychlé či na druhou stranu velmi pomalé chlazení, může ovlivnit jeho konfiguraci a následné chování.

U polyetylénu podrobeného ozařování se fyzikální chování při pokojové teplotě moc nemění, i bod tání zůstává zhruba na stejné úrovni. Nicméně při vyšší teplotě působí na mo-

lekuly omezující síly zapříčiněné vzniklou strukturou sítě, díky tomu polymer na místo tání na viskózní kapalinu, získává vlastnosti elastické sítě. Pokud se tato elastická síť ochladí a rekrystalizuje v nějakém deformovaném stavu, zachová si tvar nově vzniklé krystalické struktury a to i po dobu několika let. Nicméně pokud znovu dojde k zahřátí polymeru na teplotu tání a dojde k odstranění těchto krystalů, elastické vlastnosti se stanou dominantní a polymer se pokusí vrátit do svého původního tvaru čistě z termodynamických důvodů. Tento paměťový efekt je výborným příkladem teorie vysoce elastického síťového systému, ale je také široce používán i pro praktické účely (např. smršťovací hadice). [9][11][15]

Vysokoteplotní provoz

Přetrvávání vazeb mezi molekulami u ozářeného polyetyleny nad obvyklou teplotou tání, brání polymeru v roztečení, ale ne deformaci, takže může být použit pro kabely, teplovodní potrubí atd., ale při mnohem vyšší teplotě. Hlavní námitky jsou, že pevnost v tahu je nízká ve srovnání s neozářeným polyetylenem při pokojové teplotě, a že daleko více oxiduje při těchto vyšších teplotách. Proto musí být v rámci dlouhodobého používání ozářeného polyetyleny vystaveného vyšším teplotám prováděny přísnější kontroly, ale při působení krátkodobých vyšších teplot dokáže nabídnout ozářený polyetylen značné bezpečnostní vlastnosti. [9][11][15]

4 RADIČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYETYLENU

Ozařování skupiny polyolefinů představuje důležitou část v celé technologii ozařování materiálů. Polyolefiny mohou být ozařovány v různých podobách, od granulátu a prášků, přes lisované a vytlačované díly až po izolace vodičů. [7][11]

Granuláty a prášky jakožto malé částice jsou snadno dopravovány přes dopravníkový pás nebo vzduchové trubice do zařízení pro nepřetržité elektronové ozařování. Dráty a vodiče vyžadují speciální zacházení. Často ozařování pouze z jedné strany není dostatečně efektivní, z důvodu nestejně rozložené velikosti dávky. Kvůli tomu musí být produkt otáčen, aby jeho celý obvod byl pod zářením a získal pokud možno stejné množství dávky. Vícenásobný průchod skrz ozáření je také způsob, jak omezit tento problém. Tenké plátky a vytlačované profily musí být častěji ozařovány z obou stran a procházet skrz záření vícekrát. Velké a silné části zase vyžadují točení skrz předdefinované osy a úhly, aby se zajistilo jejich rovnoměrné ozáření. [7][11]

Vliv ionizačního záření na polyetylen může být shrnut takto:

- vývoj vodíku,
- vznik vazby karbon-karbon,
- zvýšení nenasycenosti do rovnovážného stavu,
- snížení krystalinity
- povrchová oxidace během ozařování ve vzduchu

Vznik vazby karbon-karbon je nejdůležitější efekt a je založen na použití v kabelovém průmyslu a pro teplem smrštitelné produkty. Faktory ovlivňující změny polyetyleny skrz záření jsou distribuce molekulové hmotnosti, větvení, stupeň nenasycenosti a morfologie.

Nízko-hustotní polyetylen (LDPE) vyráběný vysokotlakou polymerizací, obsahuje dlouhé větve uvnitř hlavního řetězce. Lineární nízko-hustotní polyetylen (LLDPE) má spíše pravidelné posloupnosti krátkých řetězců. Oby tyto druhy polyetyleny mají malé množství nenasycenosti, naopak vysoko-hustotní polyetylen (HDPE) obsahuje jednu konečnou vinylovou skupinu na molekulu. Při nízkých dávkách ozáření dojde ve vinylové skupině ke zvýšení molekulové hmotnosti HDPE skrz uskupení řetězců mezi vinylem a alkylem, který je produkován zářením. [7][11]

Při běžných teplotách je polyetylen vždy v semikrystalické podobě. Amorfní část má hustotu 800 kg/m^3 a hustota krystalické části je o 25 % větší. Komerčně dostupný polyetylen

má hustotu v rozmezí od 920 do 960 kg/m³. Tento relativně malý rozdíl v hustotě koresponduje se značně velkým rozdílem v amorfním podílu. U LDPE má váhu 40 % a u HDPE okolo 20 %. Síťování má tedy především význam v amorfních částech a ve spojení mezi dvěma fázemi.

Síťování polyetyleny ozařováním probíhá při teplotách nižších než 70 °C, což je teplota o dost nižší než je teplota tání krystalické látky. Ozařování nemá žádný významný dopad na velikost amorfní a krystalické části. Jakmile je síťovaný polymer ohříván na teplotu tání krystalické látky, krystalinita je významně snížena, protože síťování zasáhne supramolekulární část přes ochlazování z tání. Následující cykly tání a chlazení nevytvářejí žádné další změny v krystalinitě. [7][11]

Jádro krystalické oblasti ozářeného polyetyleny obsahuje volné zbytkové radikály. Ty se pomalu dále šíří ke spojení s amorfní částí, kde za přítomnosti rozplývajícího se kyslíku, jehož rovnováha je udržována rozptylováním, začnou antioxidační řetězce degradovat. Ozařování v inertní atmosféře při teplotě okolo 85 °C vede k rapidní vzájemné reakci volných radikálů.

Větší krystalická část ozářeného síťovaného polyetyleny po tomto cyklu tání a mrazení, má dobré technologické hodnoty pro teplem smrštitelné výrobky a konektory elektrických vodičů.

Při porovnání s chemickým síťováním polyetyleny produkuje záření jiné výsledky v mnoha ohledech. Chemické síťování se děje při teplotách okolo 125 °C, kdy je polymer v roztaveném stavu. Tudíž hustota při chemickém síťování polyetyleny je téměř rovnoměrná, na druhou stranu při tomto síťování vzniká relativně málo síťování v krystalické části polyetyleny. [7][11]

Síťování ozařováním vyžaduje značně méně celkové energie, ale také prostoru a je rychlejší, více efektivní a méně zatěžuje životní prostředí. Chemické síťování vyžaduje chemikálie, které jsou produkty zdravotnického průmyslu a ty často mají nepříznivé účinky na dielektrické vlastnosti a v některých případech jsou nepřijatelné.

Síťování polyetyleny zlepšuje jeho odpor proti toku a opotřebení. Odolnost proti opotřebení se u HDPE zlepšuje ozařováním ve vakuu a snižuje ozařováním ve vzduchu. Tento náleze se používá při zvýšení odolnosti proti opotřebení hlavně při UHMWPE (ultrahigh molecular weight polyethylene), který se používá pro ortopedické implantáty. Obecně se

tedy zvyšuje odolnost proti opotřebení u polyetylenu především radiační dávkou a síťovací hustou a je příznivý pro izolace drátů a vodičů na polyetylenové bázi.

Další výhoda při použití síťování polymerů je zlepšení jejich chemické odolnosti. Rozpustnost a nabobtnání se snižuje se zvyšujícím se obsahem gelu a to má dále za následek zvýšení odolnosti proti praskání. Zvýšení odolnosti proti popraskání je výhodné pro potrubí, které je permanentně pod tlakem.

Dielektrická stálost vlastností u LDPE je v podstatě nezávislá na úrovni ozáření. Takzvané studené tečení (creep) je u polyetylenu při vysokých teplotách potlačeno při vyšším stupni ozáření.

Nevýhoda elektronového síťování je nerovnoměrné ozáření. Stává se to zejména u tenčích materiálů. [7][11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Zadáním a cílem diplomové práce je zjistit, jaký vliv bude mít radiační síťování na mechanické vlastnosti vybraných polymerních materiálů v závislosti na různých dávkách záření a různých teplotách při tahové zkoušce.

V práci je použit materiál polyetylen ve dvou variantách – nízko-hustotní (LDPE) a vysoko-hustotní (HDPE). Zkušební tělíska byla ve tvaru lopatek podle normy pro tahovou zkoušku. Varianty materiálů jsou nesíťované i síťované. Síťované materiály byly ozářeny radiačním zářením beta o dávkách 99 kGy, 132 kGy, 165 kGy a 198 kGy ve firmě BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG. Následně byly provedeny tahové zkoušky všech materiálů při různých teplotách. Zkoušky proběhly na zkušebním stroji Zwick Roell 1456 s teplotní komorou a byly vyhodnoceny podle přiloženého softwaru TestXpert II.

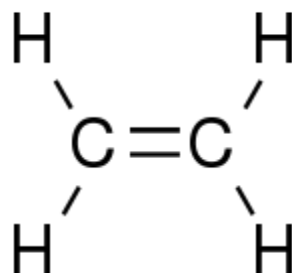
Po provedení tahových zkoušek je provedeno vyhodnocení a popsány změny vlastností vlivem vystavení ionizujícímu záření.

Při psaní diplomové práce bylo využito především čtyř hlavních metodik pro psaní akademických prací a to především analýzy, měření, popisu a komparace.

6 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

6.1 Polyetylen

Polyetylen (PE, polyethylen) se řadí do skupiny polyolefinů. Tento polymer se řadí díky své snadné dostupnosti a nízké ceně mezi nejrozšířenější skupinu syntetických polymerů v dnešní době. Pod pojmem polyetyleny rozumíme homopolymery a kopolymery etylenu, které obsahují ve svých molekulách jednu dvojnou vazbu mezi atomy uhlíku. [8][16]



Obr. 9. Strukturální vzorec etylenu C_2H_4 . [9]

6.2 Rozdělení polyetyleny

Existuje více druhů polyetylenů, které se dělí podle rozvětvení makromolekul. Mezi dva základní typy patří:

- HDPE – vysoko-hustotní, lineární polyetylen (High-Density Polyethylene).
- LDPE – nízko-hustotní, rozvětvený polyetylen (Low-Density Polyethylene),



Obr. 10. Rozdíl ve větvení makromolekul u HDPE a LDPE. [9]

Tab. 3. Srovnání vybraných vlastností HDPE a LDPE. [8]

	HDPE	LDPE
Hustota [kg/m^3]	940 – 960	915 – 930
Modul pružnosti [MPa]	700 – 1000	100 – 200
Pevnost v tahu [MPa]	20 – 30	8 – 10
Tažnost [%]	< 1000	< 1000
Krystalinita [%]	< 93	< 64
Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]	130 - 135	105 – 110

Mezi další druhy polyetylenů, které jsou běžně dostupné, jsou například:

- MDPE - polyetylen o střední hustotě (Middle-Density Polyethylene),
- LLDPE – nízko-hustotním, lineárním polyetylen (Linear-Low-Density Polyethylene),
- UHMWPE - polyetylen o velmi vysoké hustotě (Ultra High Molecular Weight Polyethylene).

Nejvíce poté záleží na stupni větvení, čímž se hlavně mění hustota a rozsah krystalinity, které dále definují rozdílné vlastnosti jednotlivých druhů polyetylenů. [8][16]

6.3 Vlastnosti polyetylenů

Jedná se o elastickou tuhou látku, která je téměř průhledná popř. mléčně zakalená. Teplotu tání má v rozmezí 105 $^{\circ}\text{C}$ a 136 $^{\circ}\text{C}$. Na omak se vyznačuje voskovitým charakterem. Vyznačuje vysokou tažnost, houževnatost a má vysoký stupeň krystalinity. [8][16]

Mezi hlavní přednosti polyetylenů patří především:

- zdravotní nezávadnost,
- dobrá chemická odolnost,
- přijatelná cena,
- jednoduchá zpracovatelnost,
- průhlednost tenkých vrstev,
- dobré elektroizolační vlastnosti,

- dobrá tuhost a vláčnost i při nízkých teplotách.

Naopak mezi nevýhodné vlastnosti polyetyleny můžeme zařadit jeho:

- nízkou pevnost v tahu,
- hořlavost,
- nízký bod měknutí,
- sklon k oxidaci,
- zakalení materiálu tlustších vrstev,
- voskovitý vzhled a náchylnost k poškrábání. [8][16]

6.3.1 HDPE

Vysoko-hustotní polyetylen má nejmenší ohebnost a největší tuhost oproti ostatním typům polyetyleny, což je dáno kvůli vysoké krystalinitě. Je tvořen převážně z nerozvětvených molekul s nízkou mírou větvení, což má za následek, že jeho hustota neklesne pod 940 kg/m^3 . Existují dva hlavní typy procesů, které se používají pro výrobu tohoto typu polyetyleny. Jedná se o výrobu v suspenzi nebo v plynné fázi. Při výrobě se obvykle používá buď Zieglerův typ katalyzátoru (založen na titanu) nebo Phillipsův typ (založen na chromu). Vysoko-hustotní polyetylen slouží především k výrobě potrubí nebo pro sportovní a domácí potřeby. [8][16]

6.3.2 LDPE

Jedná se o nejstarší typ polyetyleny. Má silně rozvětvený řetězec makromolekul. Jeho typická hustota se pohybuje mezi 915 a 935 kg/m^3 . Je měkký, pevný a ohebný. Pro výrobu LDPE jsou používány dva typy reaktorů, buď míchaná nádoba (autokláv) nebo trubkový reaktor. Výroba probíhá za použití vysokého tlaku (150 až 300 MPa), díky tomu se také dříve označoval jako vysokotlaký polyetylen. Nejvíce se používá pro výrobu folií, mezi další příklady použití patří dopravní pytle, balicí materiál nebo tenké zemědělské přikrývky. [8][16]

7 OZÁŘENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Ozařování zkušebních vzorků proběhlo v Německu ve spolupráci se společností BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co, KG v závodě v Saalu an der Donau.

Zdrojem elektronového beta záření byl vysokonapěťový urychlovač typu Rhodotron o maximální energii 10 MeV. Dávky záření byly 99, 132, 165 a 198 kGy. Níže (Obr. 14) je zobrazena linka pro ozařování a palety se zkušebními tělesy nachystanými pro ozařování. Jeden průjezd pod skenerem znamenal, že zkušební tělíska byla ozářena dávkou 33 kGy. Ozařování na požadovanou dávku je založeno tedy na postupných průjezdech zkušebních tělísek pod skenerem, a to z důvodu menší tepelné zátěže zkušebních tělísek. [10]



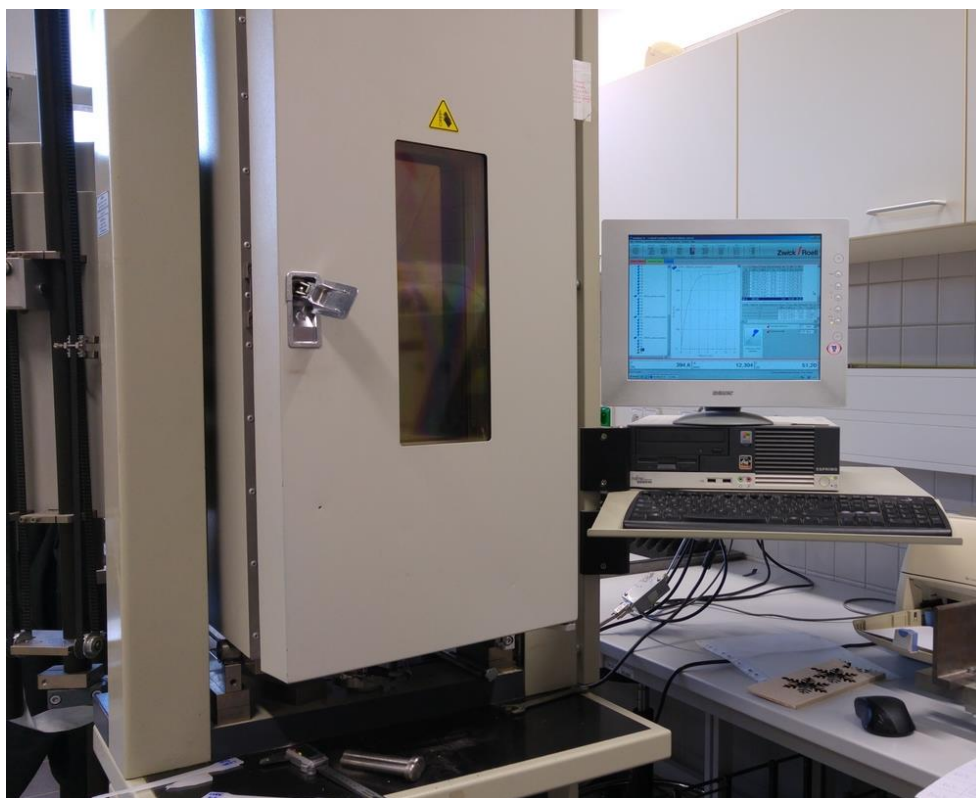
Obr. 11. Linka pro radiační síťování. [10]

8 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

Pro zjištění modulu pružnosti v tahu E (MPa), meze pevnosti v tahu σ_M (MPa) a poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\varepsilon_{\sigma M}$ (%) bylo využito tahové zkoušky, která byla realizována na trhacím stroji Zwick 1456 při rychlosti příčnicku 50 mm/min. Měření bylo uskutečněno při pokojové teplotě (23 °C) a při zvýšených teplotách (30 až 100 °C), u kterých bylo využito teplotní komory. Opakovatelnost jednotlivých měření byla minimálně 10 (pro každý materiál a každou dávku záření) a získaná data byla vyhodnocena pomocí softwaru TestXpert II.

8.1 Zkušební stroj Zwick Roell 1456

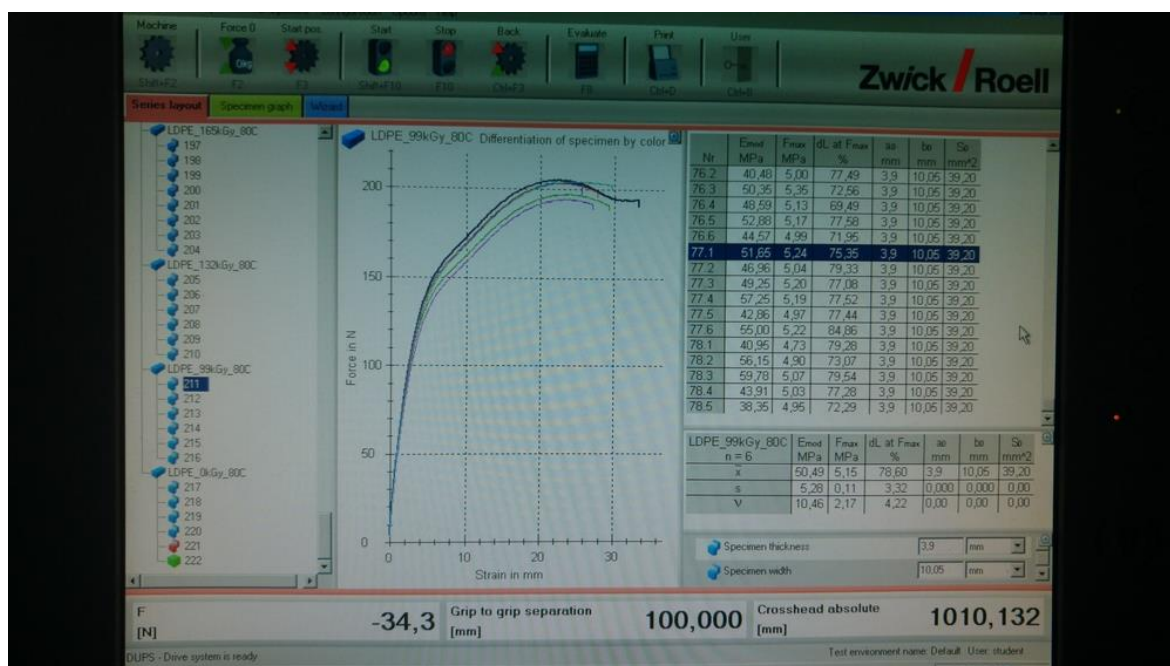
Pro realizaci zkoušky tahem byl použit zkušební stroj Zwick Roell 1456 (Obr. 15), který je umístěn v laboratořích Fakulty technologické a je používán pro praktické testování vzorků. Zkušební stroj lze použít na zkoušky tahem, tlakem, ohybem i cyklické zkoušky míjivým zatížením. Součástí přístroje je osobní počítač s programem pro vyhodnocování dat o prováděné zkoušce. Pro provedení zkoušky za zvýšené nebo snížené teploty je zařízení vybaveno temperační komorou, která je v případě potřeby instalována posunutím po kolejnicích. [17]



Obr. 12. Zkušební stroj Zwick Roell 1456.

Technické specifikace přístroje:

Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Teplotní komora	-80 / +250 °C
TextXpert software	Tah/ohyb/tlak
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg



Obr. 13. Uživatelské rozhraní s výsledky v programu TextXpert II.

8.2 Teplotní komora Zwick Roell W91255

Jedná se o standardní teplotní komoru, která je konstruována pro největší užívané rozmezí teplot. Je úsporná a vybavena vnitřním osvětlením. Má průmyslové osvědčení Eurotherm a sériové rozhraní pro komunikaci s testovacím počítačem.

Optimální přizpůsobení lokálním ověřovacím požadavkům může být dosaženo skrz stacionární umístění zařízení do testovacího stroje nebo připevněním na kolejnice. Připevnění na kolejnice umožňuje přisunutí a odsunutí teplotní komory do zkušební oblasti stroje.

Při použití optického extenzometru spolu s teplotní komorou je teplotní gradient velmi nízký díky plně zahřátému, průhlednému oknu. [17]



Obr. 14. Teplotní komora Zwick Roell W91255.

Technické specifikace přístroje:

Teplotní rozmezí	-80 °C až + 250 °C
Maximální teplotní odchylka	± 3,5 °C
Čas ohřevu na +250 °C	< 30 min
Čas ochlazení na -60 °C	< 20 min
Vnější rozměry	850x400x840 mm
Hmotnost	90 kg

8.3 Průběh měření a vyhodnocení

Každý měřený materiál (HDPE i LDPE) byl v pěti variantách – neozářený a ozářený s dávkou 99, 132, 165, 198 kGy. Samotná měření probíhala při různých teplotách – začátek byl při pokojové teplotě 23 °C a pokračovalo se 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 a 100 °C. Pro každou teplotu a každou dávku ozáření bylo k dispozici 10 vzorků. Celkem bylo provedeno 90 měření pro jeden materiál s danou dávkou ozáření. Při pěti dávkách ozáření to je 450 měření pro jeden materiál a celkem pro oba materiály to je 900 měření.

Data z měření byla postupně ukládána přes software TestXpert II, který je přímo k dispozici u měřicího zařízení a následně byla data vyhodnocena prostřednictvím nástroje Microsoft Excel 2013 a některé hodnoty byly počítány přes nástroj Minitab 16.

Z důvodu velkého počtu naměřených a počítaných dat a jejich vyhodnocení, jsou kompletní tabulky uvedeny až v příloze diplomové práce. V následující kapitole práce je uveden vždy pouze aritmetický průměr a směrodatná odchylka pro každé měření – dávka, teplota a typ materiálu pro modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu. Ostatní počítané výsledky jsou uvedeny v příloze.

Následující vlastnosti byly vyhodnocovány:

Aritmetický průměr (\bar{x}) - je definován jako podíl jednotlivých hodnot proměnné x_i a rozsahu výběrového souboru n (počet hodnot proměnné).

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

Směrodatná odchylka (s) - je definována jako kladná odmocnina výběrového rozptylu.

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

Kvadratická chyba (σ) - má využití pro hodnocení přesnosti měření. Vychází ze směrodatné odchylky podělené druhou odmocninou z počtu měření.

$$\sigma = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Dolní kvartil (Q_1) - rozděluje datový soubor tak, že 25 % hodnot je menších než tento kvartil a zbytek, tj. 75 % větších (nebo rovných).

Medián - rozděluje datový soubor tak, že polovina (50 %) hodnot je menších než medián a polovina (50 %) hodnot větších (nebo rovných).

Horní kvartil (Q_3) - rozděluje datový soubor tak, že 75 % hodnot je menších než tento kvartil a zbytek, tj. 25 % větších (nebo rovných).

Míra variability (IQR) – je definována jako vzdálenost mezi prvním a třetím kvantilem.

Variační rozpětí (V) – vyjadřuje rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou.

Variační koeficient (V_x) - vyjadřuje relativní míru variability proměnné x. Podle níže uvedeného vztahu jej lze stanovit pouze pro proměnné, které nabývají výhradně kladných hodnot. Variační koeficient je bezrozměrný, uvádí se v procentech. Hodnota získaná z definičního vzorce se vynásobí 100 %. [18]

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}}$$

9 HLAVNÍ VÝSLEDKY

V tabulkách jsou uvedeny hlavní výsledky měření, to znamená aritmetický průměr a směrodatná odchylka k modulu pružnosti v tahu, meze pevnosti tahu a poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu, to vše v závislosti na teplotě a velikosti ozařované dávky. Získané hodnoty jsou vyneseny do grafů a následně vyhodnoceny. Kompletní vypočítané hodnoty jsou uvedeny v příloze P1.

9.1 Modul pružnosti v tahu

V následujících tabulkách (Tab. 4 a 5) jsou uvedeny výsledky měření modulu pružnosti v tahu pro materiály HDPE a LDPE.

Tab. 4. Výběr naměřených dat – modul pružnosti HDPE.

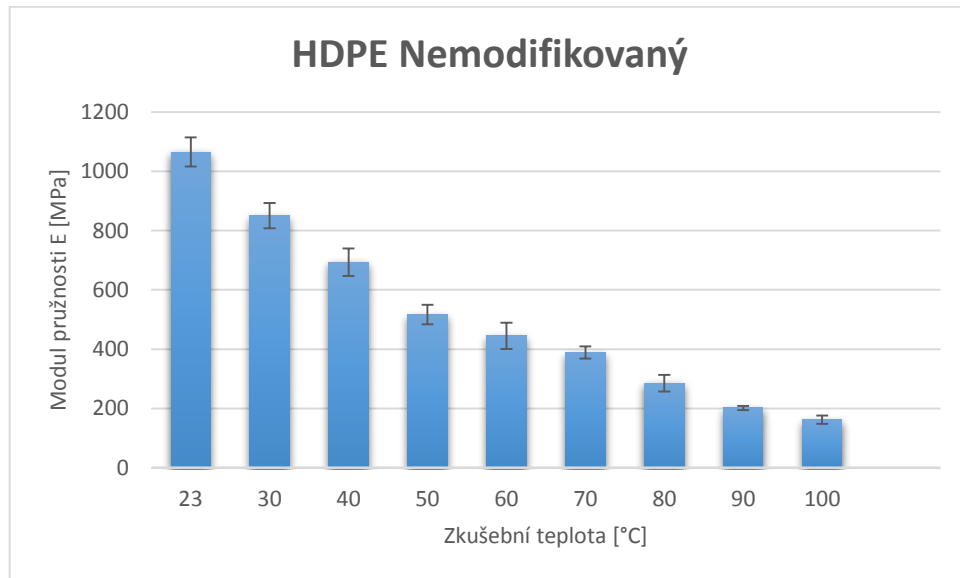
HDPE - Modul pružnosti v tahu E [MPa]										
Dávka	0 kGy		99 kGy		132 kGy		165 kGy		198 kGy	
T [°C]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	S
23	1065,3	49,4	1299,9	24,6	1298,9	24,9	1378,7	45,9	1390,8	38,1
30	850,4	42,7	1040,9	34,1	1031,7	14,5	1165,0	61,5	1091,8	35,4
40	693,4	46,4	848,3	58,0	894,9	45,3	856,1	45,3	886,3	15,1
50	516,9	32,8	691,4	49,0	654,8	27,1	675,6	45,4	730,1	21,3
60	444,8	44,7	565,6	46,6	563,7	55,4	572,5	54,9	586,9	35,1
70	389,0	20,3	490,0	24,8	489,6	21,4	549,6	27,2	491,7	25,9
80	285,0	27,7	382,9	39,4	392,5	31,6	386,7	31,8	373,0	43,3
90	201,3	7,1	294,4	13,2	276,0	23,4	304,1	17,6	294,3	13,8
100	161,7	14,4	251,6	37,3	231,8	18,5	230,3	23,3	211,9	28,6

Tab. 5. Výběr naměřených dat – modul pružnosti LDPE.

LDPE - Modul pružnosti v tahu E [MPa]										
Dávka	0 kGy		99 kGy		132 kGy		165 kGy		198 kGy	
T [°C]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
23	212,5	9,1	285,2	12,9	297,7	9,2	274,6	18,4	296,1	23,2
30	149,9	1,8	233,3	2,6	220,2	3,0	237,1	6,5	254,7	11,0
40	120,7	3,4	169,5	6,8	171,9	10,0	186,6	25,2	169,1	6,3
50	86,4	5,7	130,1	3,8	140,5	8,5	139,5	8,4	140,9	5,5
60	73,1	5,3	87,4	6,2	102,0	9,9	90,0	9,7	91,0	6,3
70	54,6	5,4	67,7	3,3	81,0	4,4	76,3	6,6	73,4	3,2
80	47,1	6,8	53,6	3,5	50,1	7,4	58,3	5,6	52,0	3,8
90	26,6	5,3	39,1	2,6	41,1	3,3	40,7	2,8	43,5	2,5
100	14,3	2,7	23,0	1,7	23,8	2,8	19,9	3,5	26,4	3,3

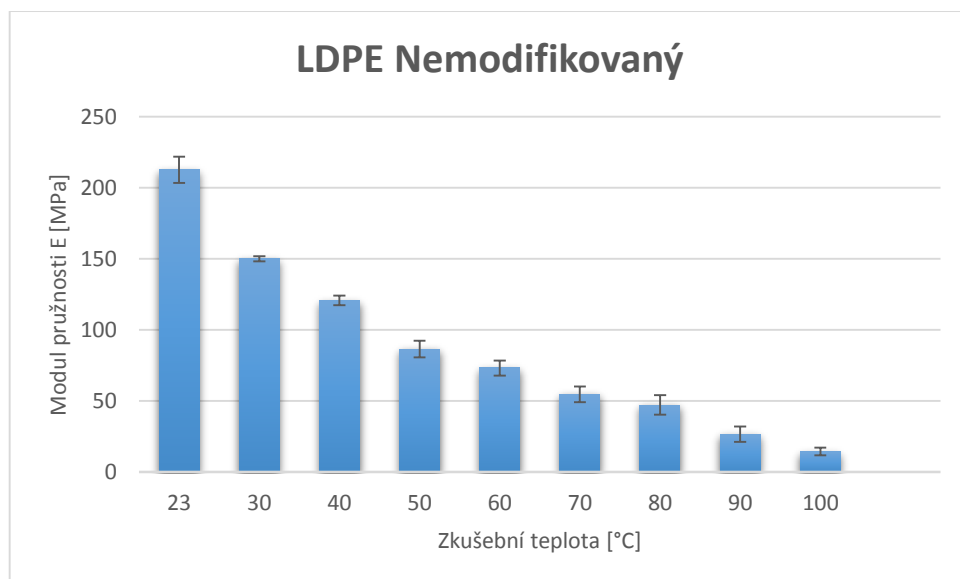
9.1.1 Nemodifikovaný (neozářený) materiál

Pro nemodifikované (neozářené) materiály je typické, že se se zvyšující teplotou exponenciálně snižuje modul pružnosti. Naměřené výsledky jsou uvedené v grafech pro jednotlivé materiály – HDPE (Obr. 15) a LDPE (Obr. 16).



Obr. 15. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u nemodifikovaného materiálu HDPE.

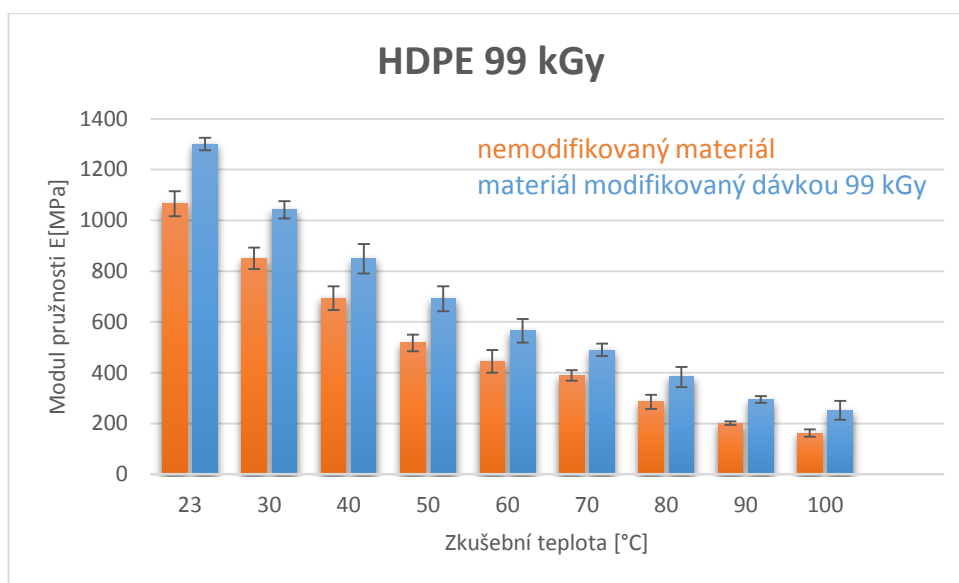
Nejvyšší modul pružnosti byl pro oba materiály zaznamenán při teplotě 23 °C, nejnižší modul při teplotě 100 °C, což je pokles u HDPE o 84,2 % a u LDPE pokles o 92,3 %.



Obr. 16. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u nemodifikovaného materiálu LDPE.

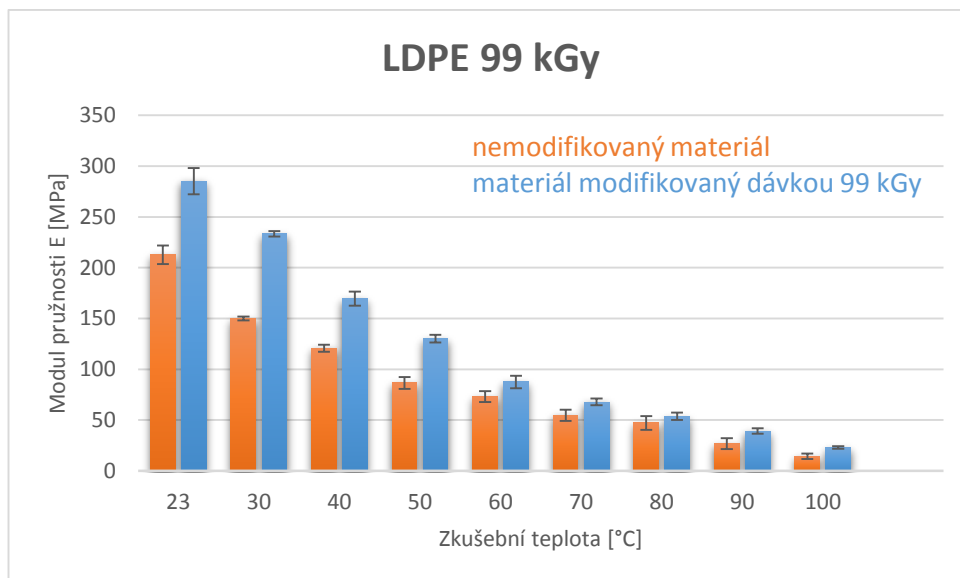
9.1.2 Materiál modifikovaný dávkou záření 99 kGy

Na následujícím obrázku (Obr. 17) je zobrazena závislost modulu pružnosti na zkušební teplotě pro nemodifikovaný materiál HDPE a materiál, který byl ozářen dávkou 99 kGy. Ze získaných výsledků je zřejmé, že ionizační beta záření zvyšuje modul pružnosti při všech zkušebních teplotách. Nejvyššího modulu bylo dosaženo při nejnižší měřené teplotě a to 1299,9 MPa, nárůst oproti neozářenému materiálu byl o 22,1 %.



Obr. 17. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 99 kGy.

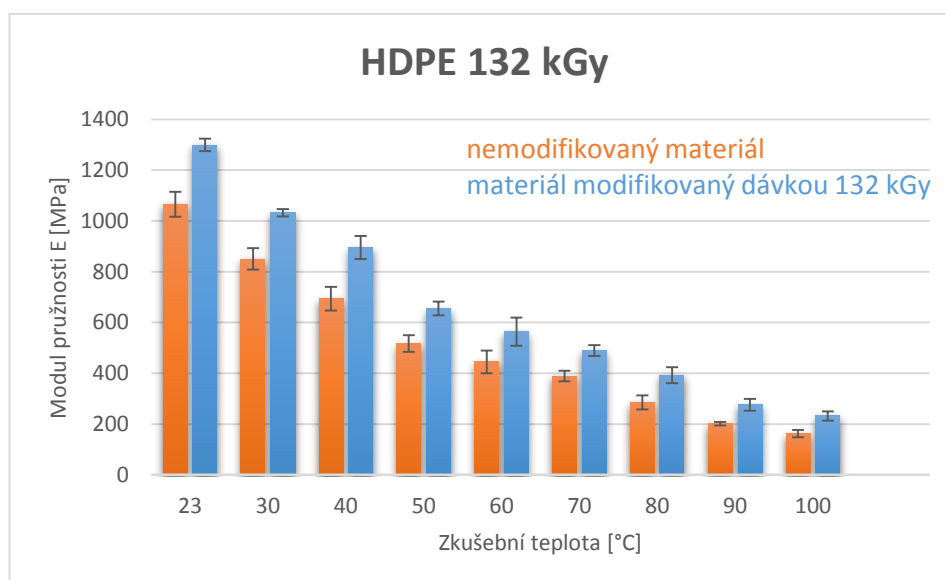
To samé platí i pro materiál LDPE (Obr. 18) ozářený dávkou 99 kGy, kdy byl největší modul pružnosti při 23 °C a to 285,2 MPa, což je v porovnání s neozářeným materiálem nárůst o 34,1 %. Například při zvýšené teplotě 100 °C to je nárůst již o 60,7 % z původních 14,3 MPa na 23,0 MPa.



Obr. 18. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 99 kGy.

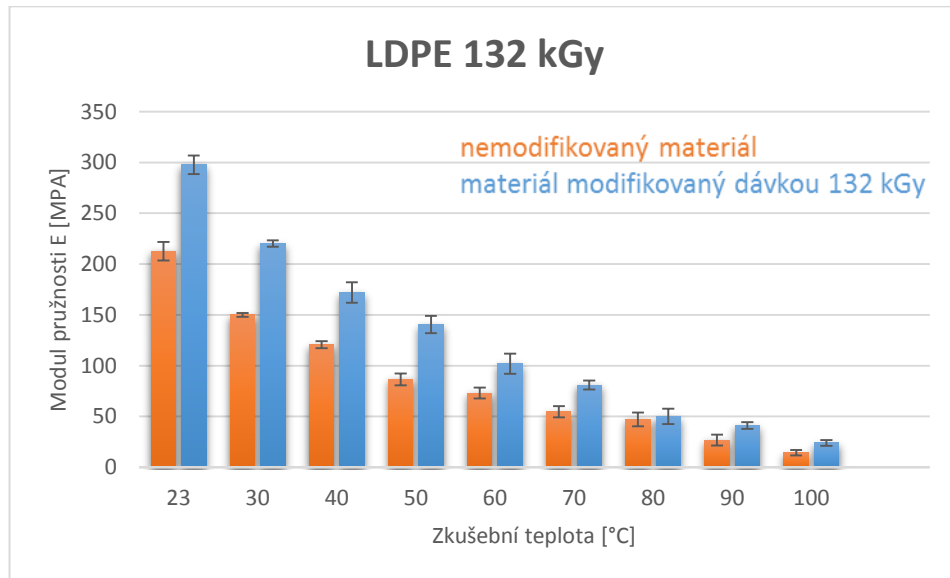
9.1.3 Materiál modifikovaný dávkou záření 132 kGy

Na dalším obrázku (Obr. 19) je uvedena závislost ozářeného materiálu HDPE dávkou 132 kGy v porovnání s neozářeným materiálem. Při pokojové teplotě (23 °C) je rozdíl o 22,9 % a největší je při 100 °C, kdy je modul pružnosti větší o 43,1 %.



Obr. 19. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 132 kGy.

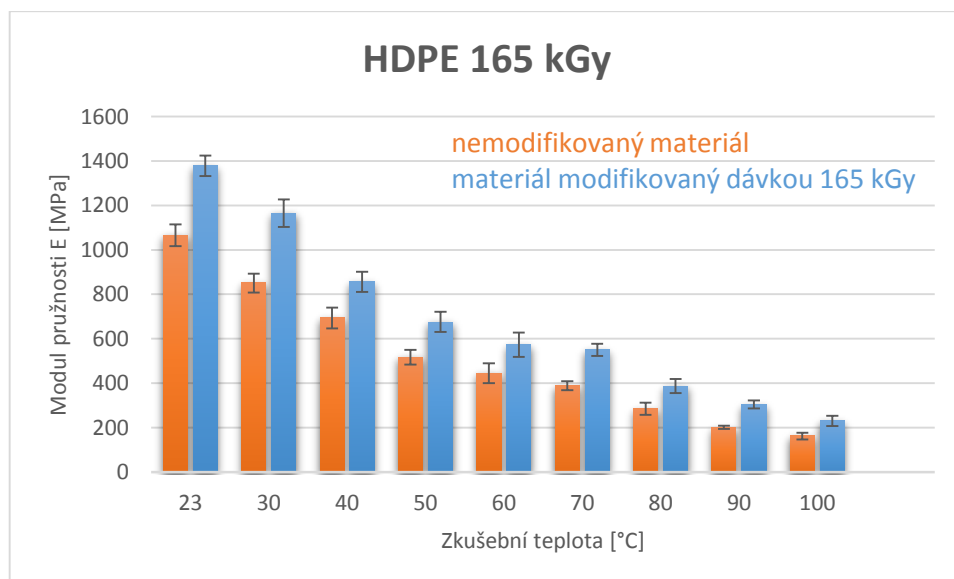
V dalším grafu je uvedena stejná závislost jen pro materiál LDPE (Obr. 20). Nárůst ozářeného materiálu je oproti neozářenému při pokojové teplotě o 40,5 % na 297,8 MPa.



Obr. 20. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 132 kGy.

9.1.4 Materiál modifikovaný dávkou záření 165 kGy

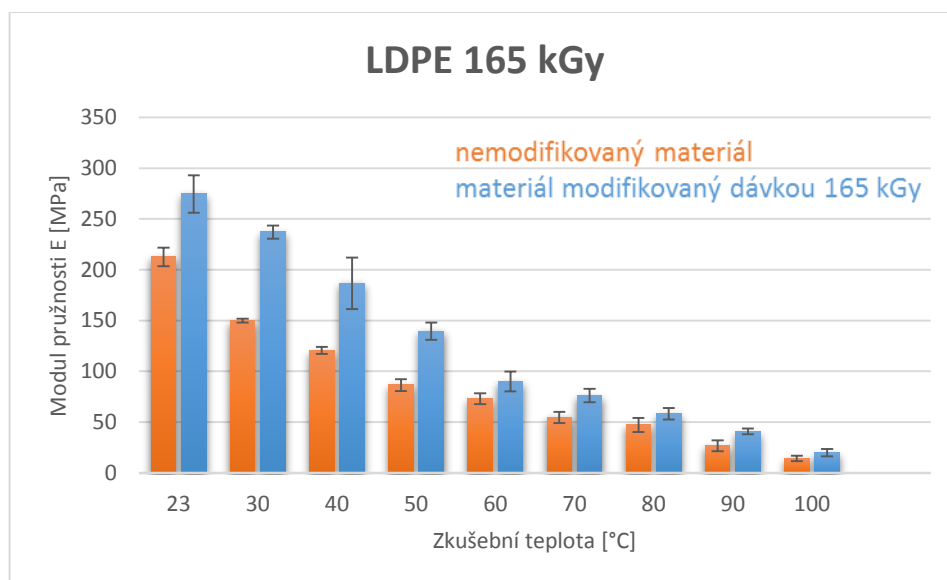
Na obrázku (Obr. 21) je opět uvedena závislost ozářeného materiálu HDPE tentokrát dávkou 165 kGy v porovnání s neozářeným materiálem.



Obr. 21. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 165 kGy.

Při pokojové teplotě byl růst modulu pružnosti mezi neozářeným materiálem a materiálem ozářeným dávkou 165 kGy o 29,4 %. Z původních 1065,3 MPa pro neozářený materiál na 1378,7 MPa pro materiál ozářený dávkou 165 kGy. Při zvýšené teplotě 100 °C to byl rozdíl o 42,5 %, kdy měl neozářený materiál modul pružnosti na hodnotě 161,7 MPa a ozářený dávkou 165 kGy 230,3 MPa.

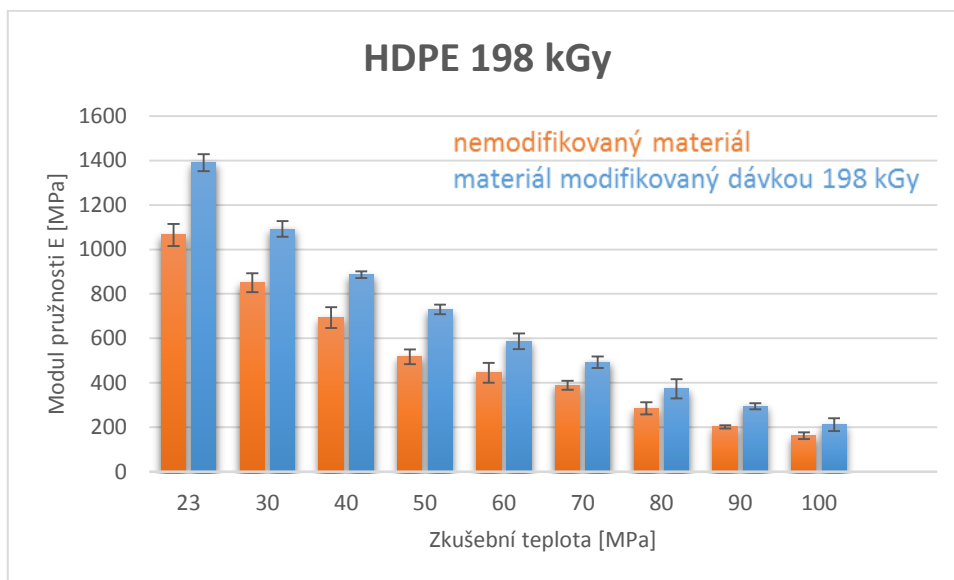
Na dalším obrázku (Obr. 22) je uveden rozdíl v modulu pružnosti u neozářeného materiálu LDPE a ozářeného materiálu dávkou 165 kGy. Při pokojové teplotě 23 °C je nárůst modulu pružnosti o 29,4 %, kdy se původní hodnota neozářeného materiálu změnila z 212,5 MPa na 274,5 MPa.



Obr. 22. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 165 kGy.

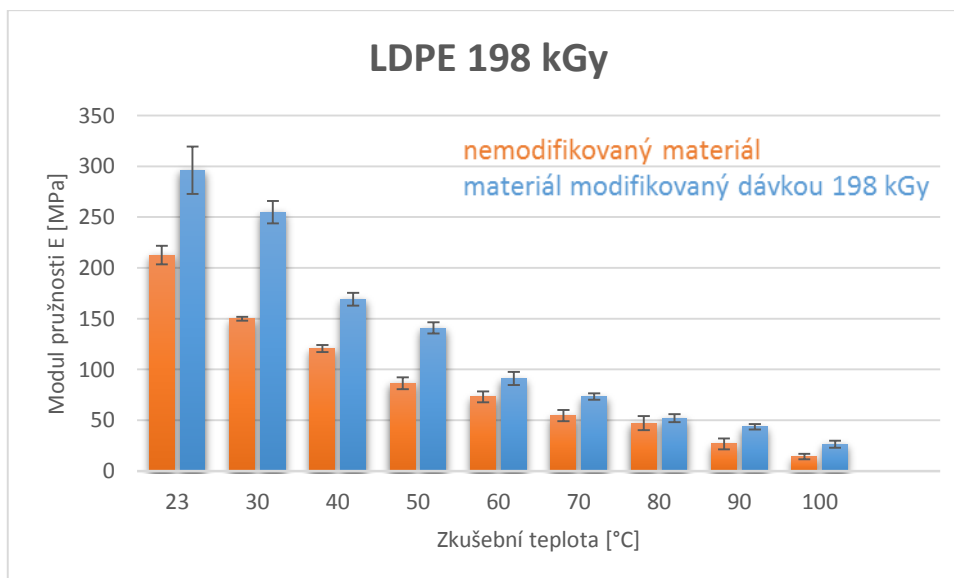
9.1.5 Materiál modifikovaný dávkou záření 198kGy

Další obrázek znázorňuje rozdíl mezi neozářeným materiálem HDPE a ozářeným dávkou 198 kGy (Obr. 23). Při pokojové teplotě (23 °C) je nárůst o 31,1 %, kdy se modul pružnosti zvedl z původních 1065,4 MPa na 1390,8 MPa.



Obr. 23. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 198 kGy.

Stejné porovnání je i pro materiál LDPE ozářený dávkou 198 kGy a neozářený (Obr. 24). Při teplotě 23 °C je rozdíl o 39,1 % a při teplotě 100 °C je rozdíl o 84,0 %.



Obr. 24. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 198 kGy.

9.2 Mez pevnosti v tahu

V následujících tabulkách (Tab. 6 a 7) jsou uvedeny výsledky měření meze pevnosti v tahu pro materiály HDPE a LDPE. V podkapitolách bude postupně porovnán vliv ozáření jednotlivými dávkami oproti neozářenému materiálu.

Tab. 6. Výběr naměřených dat – mez pevnosti v tahu HDPE.

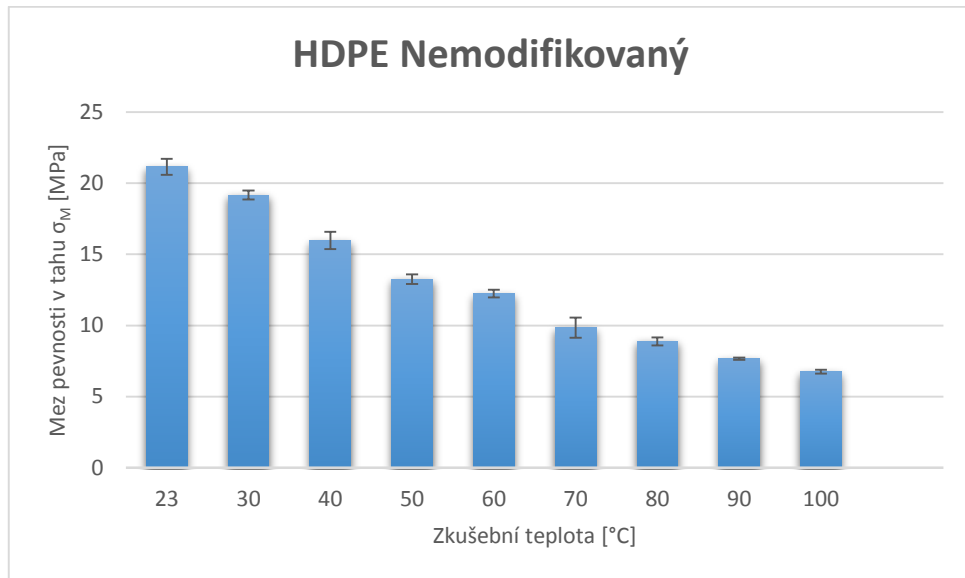
HDPE - Mez pevnosti v tahu σ_M [MPa]										
Dávka	0 kGy		99 kGy		132 kGy		165 kGy		198 kGy	
T [°C]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
23	21,1	0,5	24,6	0,1	24,9	0,1	24,8	0,1	25,2	0,1
30	19,1	0,3	21,8	0,1	22,0	0,1	21,8	0,3	22,9	0,2
40	15,9	0,6	19,6	0,4	19,8	0,1	19,8	0,3	19,8	0,3
50	13,2	0,3	17,1	0,2	17,4	0,1	17,4	0,3	17,9	0,1
60	12,2	0,2	14,3	0,3	14,6	0,2	14,1	0,1	14,1	0,4
70	9,8	0,7	12,5	0,6	12,9	0,2	12,4	0,1	12,7	0,3
80	8,8	0,2	10,1	0,1	10,2	0,2	10,2	0,2	10,2	0,2
90	7,6	0,1	8,8	0,1	8,8	0,1	9,1	0,4	8,8	0,1
100	6,7	0,1	7,6	0,2	7,5	0,2	7,9	0,1	8,1	0,1

Tab. 7. Výběr naměřených dat – mez pevnosti v tahu LDPE.

LDPE - Mez pevnosti v tahu σ_M [MPa]										
Dávka	0 kGy		99 kGy		132 kGy		165 kGy		198 kGy	
T [°C]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
23	9,2	0,1	10,3	0,1	10,3	0,2	10,5	0,1	10,8	0,3
30	8,7	0,1	9,9	0,1	9,9	0,1	10,1	0,1	9,9	0,1
40	7,5	0,1	8,6	0,1	8,5	0,1	8,6	0,2	8,5	0,1
50	6,7	0,1	7,9	0,1	8,0	0,1	7,9	0,1	7,9	0,1
60	6,0	0,1	6,9	0,4	6,8	0,2	6,8	0,1	6,7	0,1
70	5,2	0,2	6,2	0,1	6,3	0,1	6,1	0,2	6,2	0,1
80	4,9	0,1	5,3	0,2	5,1	0,1	5,2	0,1	5,1	0,1
90	3,7	0,1	4,2	0,1	4,5	0,2	4,4	0,1	4,3	0,1
100	1,7	0,1	3,2	0,1	3,1	0,1	3,1	0,1	3,6	0,1

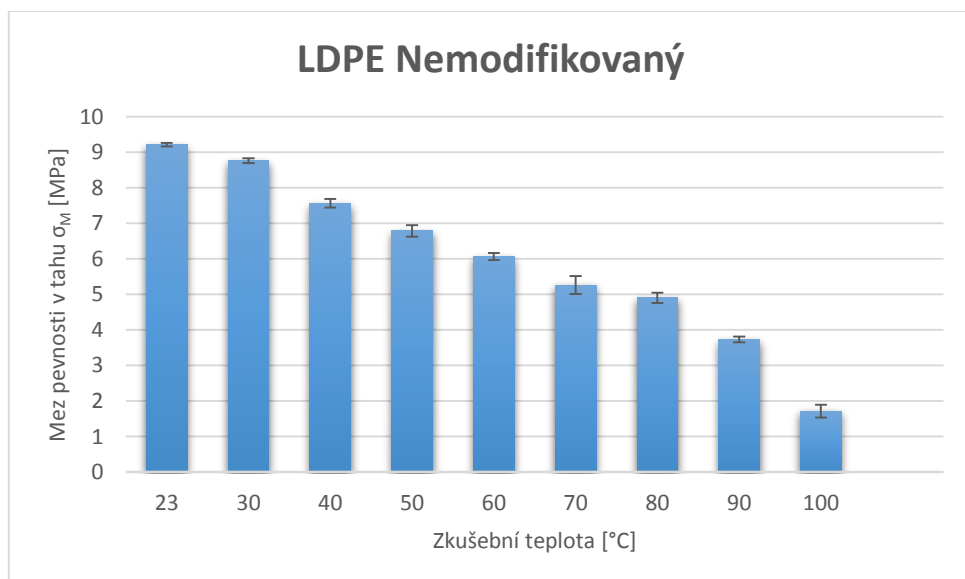
9.2.1 Nemodifikovaný (neozářený) materiál

Pro nemodifikované (neozářené) materiály je typické, že se se zvyšující teplotou exponenciálně snižuje mez pevnosti. Naměřené výsledky jsou uvedené v grafech pro jednotlivé materiály – HDPE (Obr. 25) a LDPE (Obr. 26).



Obr. 25. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u nemodifikovaného materiálu HDPE.

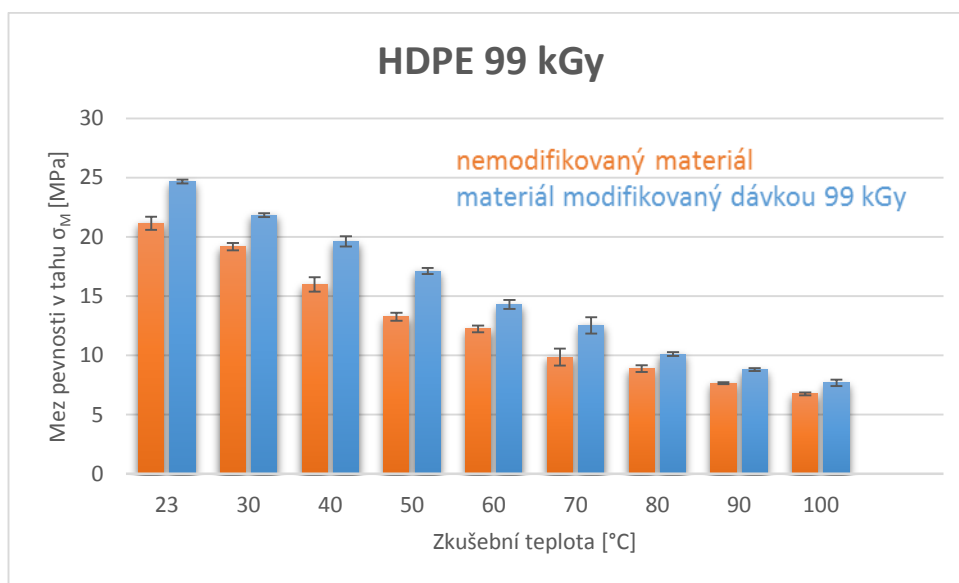
Nejvyšší mez pevnosti byla pro oba materiály zaznamenána při teplotě 23 °C, nejnižší při teplotě 100 °C, což je pokles u HDPE o 68,1 % a u LDPE pokles o 81,4 %.



Obr. 26. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u nemodifikovaného materiálu LDPE.

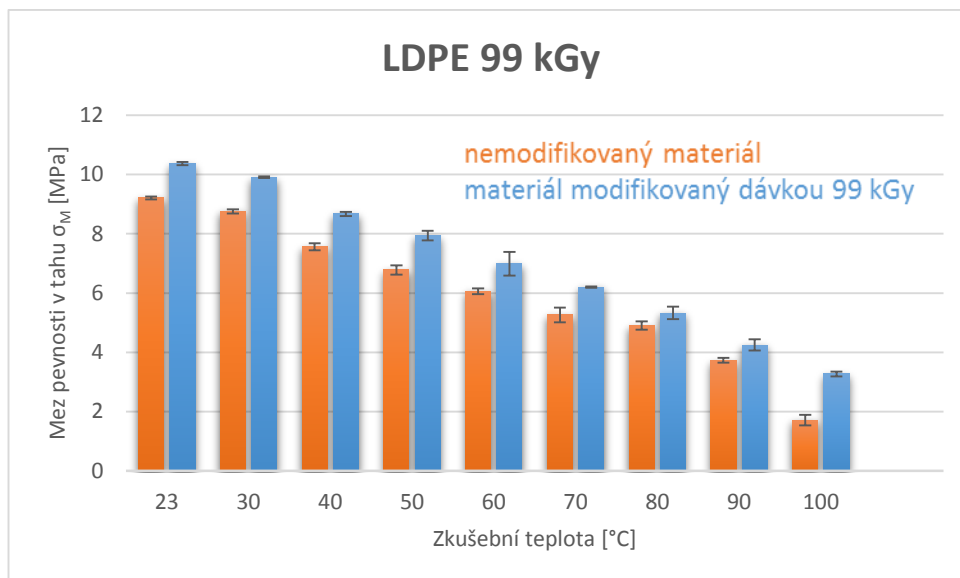
9.2.2 Materiál modifikovaný dávkou záření 99 kGy

V grafu (Obr. 27) je znázorněn rozdíl v mezi pevnosti v tahu pro nemodifikovaný materiál HDPE a materiál modifikovaný dávkou 99 kGy. Lze si všimnout nárůstu meze pevnosti. Při pokojové teplotě to je nárůst z 21,2 MPa pro neozářený materiál na 24,7 MPa pro materiál ozářený dávkou 99 kGy, což je o 17,2 % více.



Obr. 27. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 99 kGy.

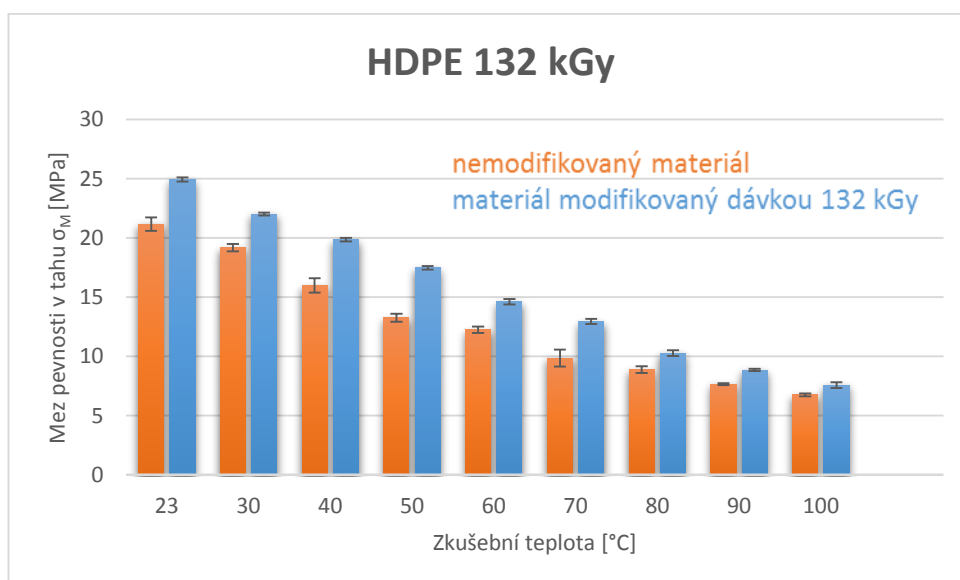
To stejné platí i pro materiál LDPE (Obr. 28), kdy mez pevnosti stoupla z 9,2 MPa u neozářeného materiálu na 10,4 MPa pro materiál ozářený dávkou 99 kGy při pokojové teplotě a změna je tedy o 13,3 %. Obdobné je to i při zvýšených teplotách, například při teplotě 100 °C je to o něco značnější rozdíl. Neozářený materiál LDPE má při této teplotě mez pevnosti na hodnotě 1,7 MPa ozářený materiál dávkou 99 kGy má mez pevnosti 3,3 MPa, což je již změna o 92,5 %.



Obr. 28. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 99 kGy.

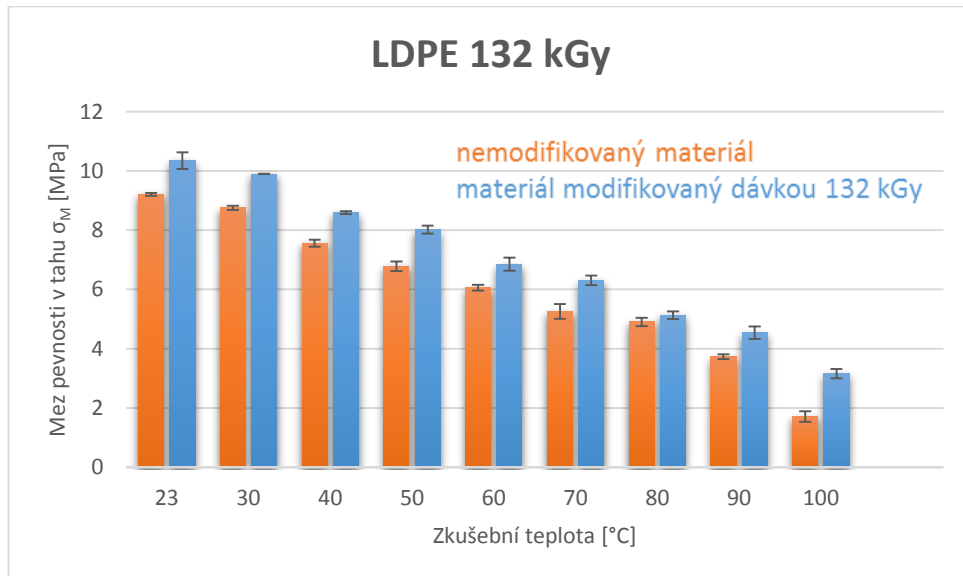
9.2.3 Materiál modifikovaný dávkou záření 132 kGy

Obdobná situace je při dávce záření 132 kGy, kdy mez pevnosti je u neozářeného materiálu při pokojové teplotě (23 °C) o 18,1 % menší. Konkrétně to je 21,2 MPa pro neozářený materiál při pokojové teplotě a 24,9 MPa pro ozářený materiál dávkou 132 kGy.



Obr. 29. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 132 kGy.

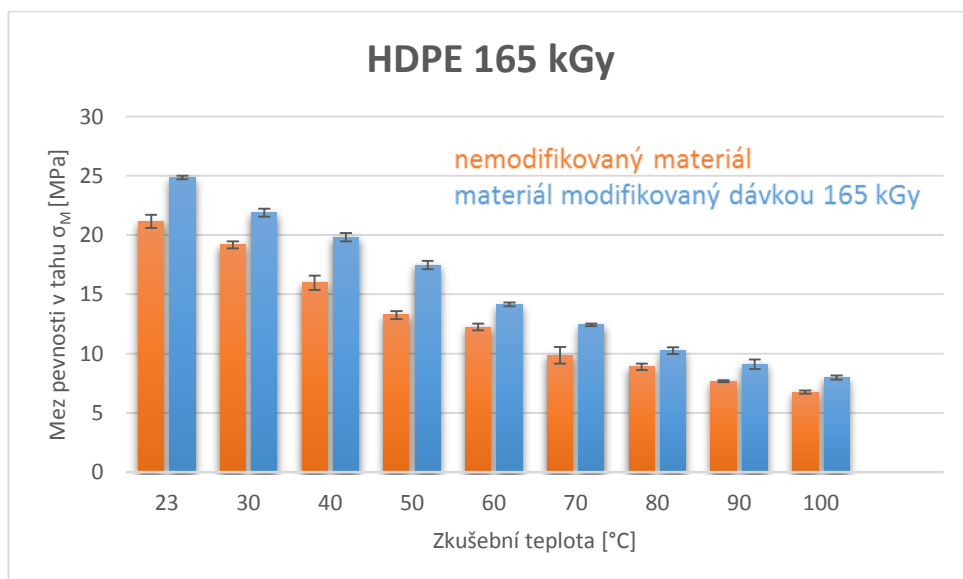
U materiálu LDPE je mez pevnosti při pokojové teplotě (23 °C) u neozařeného materiálu na hodnotě 9,2 MPa a u ozářeného dávkou 132 kGy to je 10,4 MPa, čili nárůst o 12,0 %.



Obr. 30. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 132 kGy.

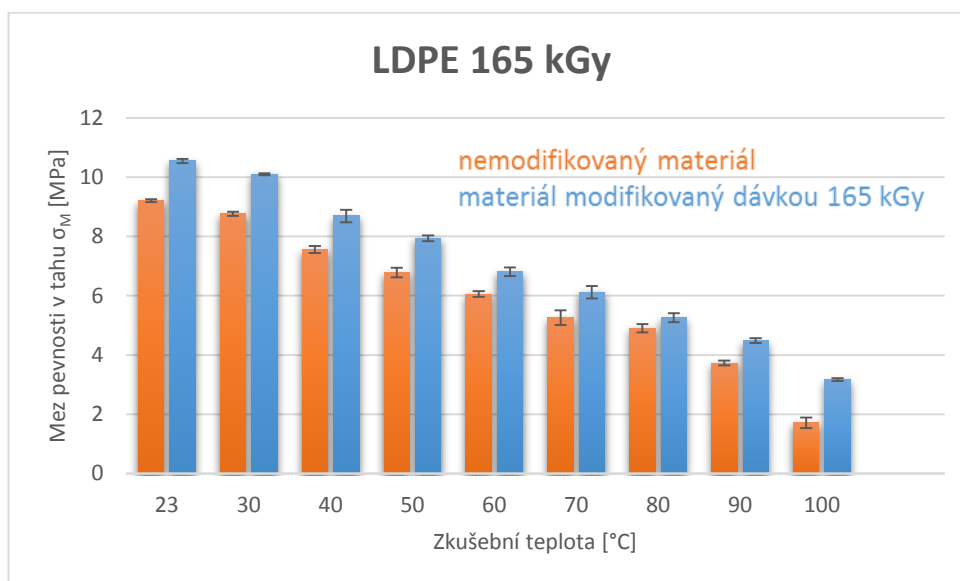
9.2.4 Materiál modifikovaný dávkou záření 165 kGy

Pro materiál HDPE při dávce ozáření 165 kGy (Obr. 31) a při pokojové teplotě se mez pevnosti změnila o 18,2 % z původních 21,2 MPa na výsledných 24,9 MPa.



Obr. 31. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 165 kGy.

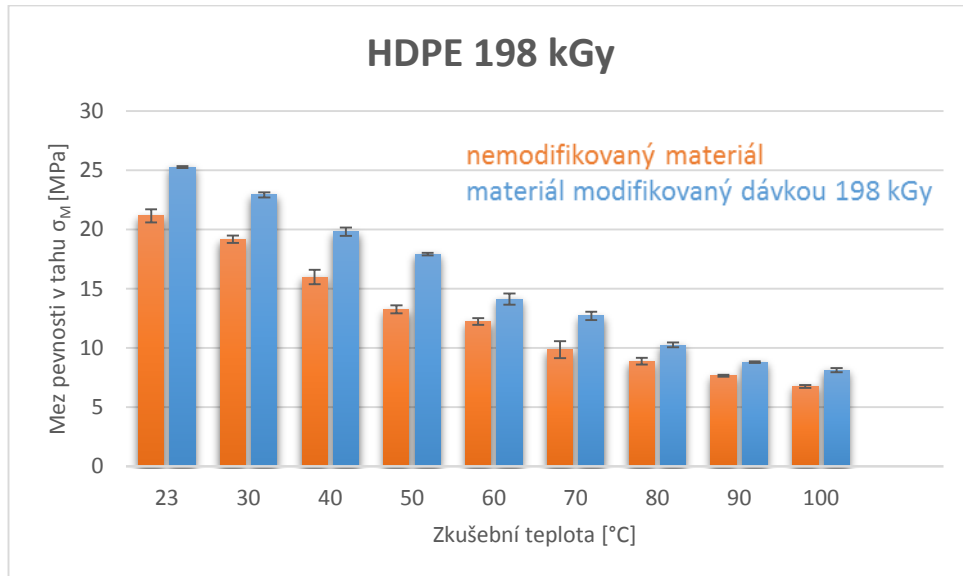
Obdobné výsledky platí i při materiálu LDPE při dávce ozáření 165 kGy (Obr. 32). V grafu je zobrazena závislost meze pevnosti v tahu na zkušební teplotě pro nemodifikovaný materiál a materiál, který byl ozářen dávkou 165 kGy. Ze získaných výsledků je zřejmé, že ionizační beta záření zvyšuje mez pevnosti při všech zkušebních teplotách. Nejvyšší mez bylo dosaženo při nejnižší měřené teplotě a to 10,6 MPa, nárůst oproti neozářenému materiálu byl o 15,3 %. Podobné výsledky jsou i při vyšších teplotách. Například při nejvyšší teplotě 100 °C nárůst činil 85,5 %.



Obr. 32. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 165 kGy.

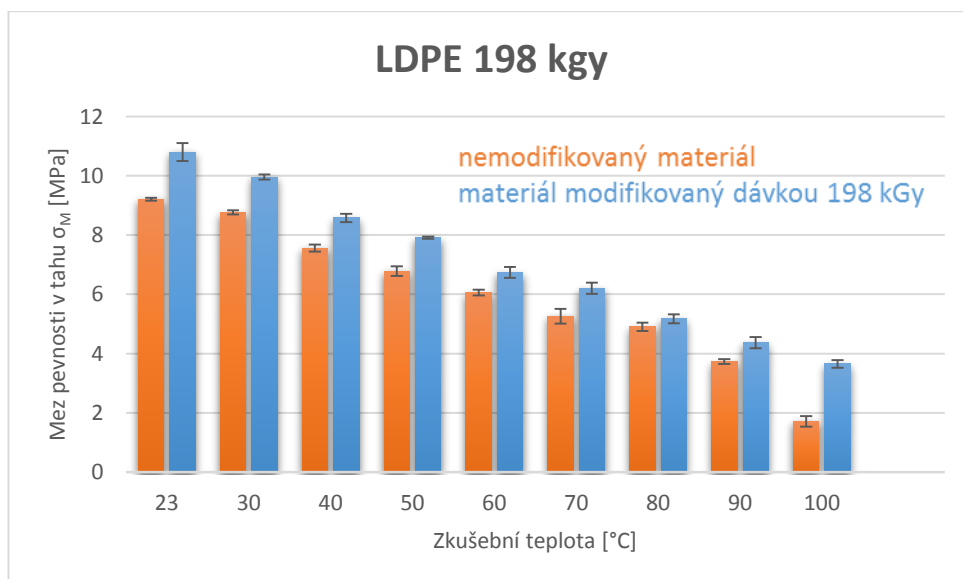
9.2.5 Materiál modifikovaný dávkou záření 198 kGy

Pro ozářený materiál HDPE dávkou 198 kGy (Obr. 33) je změna meze pevnosti při pokojové teplotě (23 °C) o 19,5 % až na 25,3 MPa.



Obr. 33. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 198 kGy.

Pro ozářený materiál LDPE dávkou 198 kGy (Obr. 34) je změna meze pevnosti při pokojové teplotě (23 °C) o 17,4 % až na 10,8 MPa.



Obr. 34. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 198 kGy.

9.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

V následujících tabulkách (Tab. 8 a 9) jsou uvedeny výsledky měření poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu pro materiály HDPE a LDPE. V podkapitolách bude postupně porovnán vliv ozáření jednotlivými dávkami oproti neozářenému materiálu.

Tab. 8. Výběr naměřených dat – poměrné prodloužení HDPE.

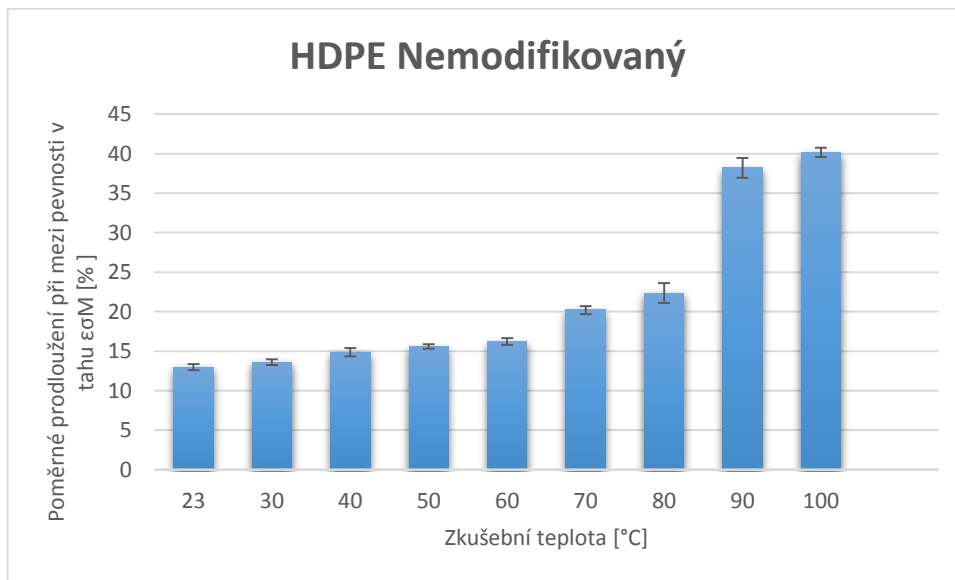
HDPE – Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ [%]										
Dávka	0 kGy		99 kGy		132 kGy		165 kGy		198 kGy	
T [°C]	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
23	12,9	0,3	11,3	0,2	11,2	0,1	11,3	0,1	11,3	0,2
30	13,6	0,3	12,7	0,1	12,0	0,1	12,2	0,1	11,9	0,1
40	14,8	0,5	12,8	0,1	12,7	0,1	12,6	0,2	12,6	0,2
50	15,5	0,2	13,7	0,1	13,0	0,2	13,0	0,1	13,1	0,2
60	16,2	0,4	13,7	0,4	13,8	0,5	14,1	0,3	13,6	0,4
70	20,1	0,5	14,9	0,2	13,7	0,1	15,0	0,3	14,0	0,7
80	22,3	1,2	16,0	0,4	14,9	0,6	15,2	0,5	15,5	0,7
90	38,2	1,2	39,5	1,0	40,9	0,1	39,8	0,9	39,1	0,6
100	40,1	0,5	41,0	1,2	39,7	2,2	40,6	1,8	40,1	1,2

Tab. 9. Výběr naměřených dat – poměrné prodloužení LDPE.

LDPE – Poměrné prodloužení při pevnosti v tahu $\varepsilon_{\sigma M}$ [%]											
Dávka	0 kGy		99 kGy		132 kGy		165 kGy		198 kGy		
T [°C]	\bar{x}	S	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s	
23	72,1	0,3	57,9	1,9	56,5	1,9	57,1	0,5	56,0	1,6	
30	73,8	0,5	59,4	1,6	57,1	1,3	55,7	0,5	57,8	0,2	
40	78,2	1,3	61,6	3,8	64,2	2,3	60,6	1,3	60,0	0,2	
50	71,3	2,8	64,5	3,1	66,9	5,6	74,6	6,5	72,8	5,6	
60	69,9	3,9	71,7	3,8	74,5	6,6	84,5	11,8	101,1	17,1	
70	69,1	1,3	73,0	1,3	72,4	1,9	74,5	3,7	87,6	5,3	
80	76,5	2,5	79,8	3,3	76,1	3,6	81,7	3,1	84,9	3,0	
90	57,5	2,8	98,9	5,4	109,0	13,1	124,7	10,5	117,9	5,9	
100	31,8	4,8	191,7	18,2	178,4	28,5	203,9	29,1	183,6	19,1	

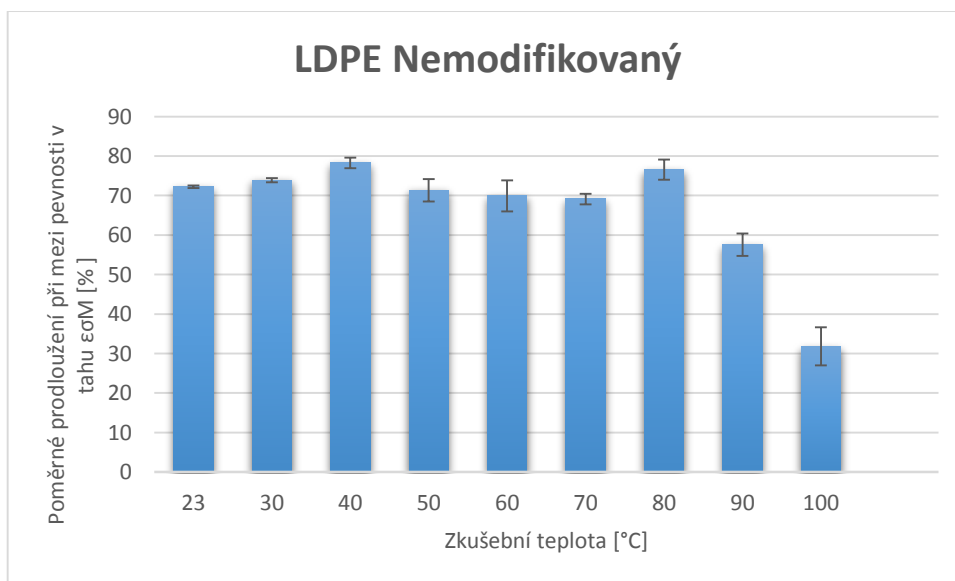
9.3.1 Nemodifikovaný (neozářený) materiál

Pro nemodifikované (neozářené) materiály se poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu chovalo u každého materiálu odlišně při zvyšující se teplotě. Naměřené výsledky jsou uvedené v grafech pro jednotlivé materiály – HDPE (Obr. 35) a LDPE (Obr. 36).



Obr. 35. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u nemodifikovaného materiálu HDPE.

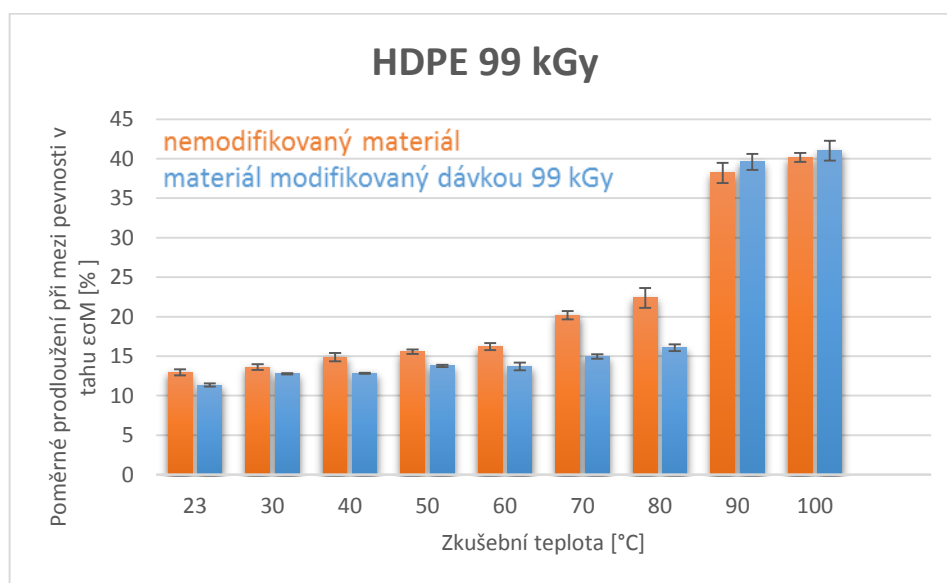
Poměrné prodloužení pro materiál HDPE se postupně zvyšovalo, přičemž největší nárůst byl okolo teploty 90 °C, u LDPE naopak při 90 °C byl pokles v prodloužení směrem dolů.



Obr. 36. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u nemodifikovaného materiálu LDPE.

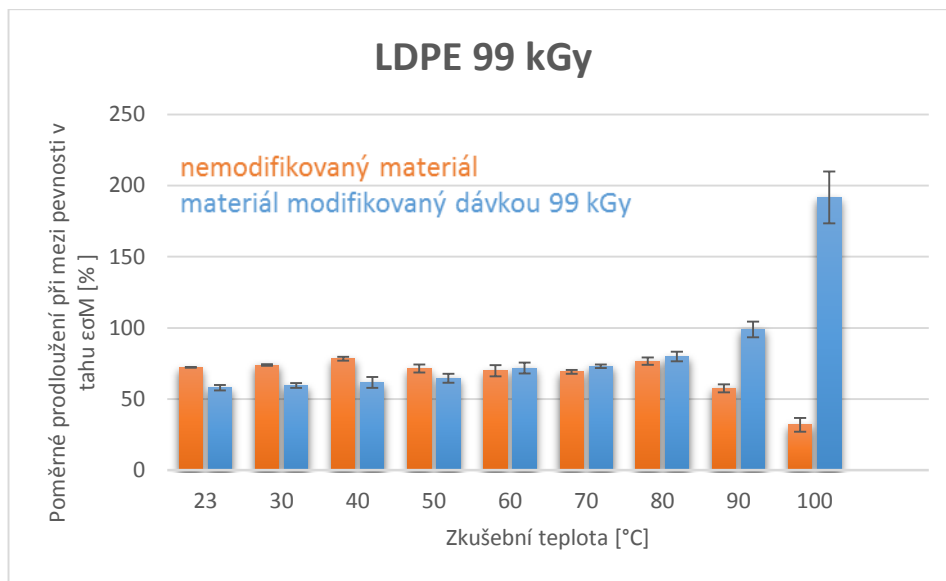
9.3.2 Materiál modifikovaný dávkou záření 99 kGy

Porovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu u ozářeného materiálu HDPE dávkou 99 kGy a neozářeného materiálu je uvedeno v grafu níže (Obr. 37). Vyplývá z něj, že přibližně do teploty 80 °C poměrné prodloužení bylo nižší u ozářeného materiálu dávkou 99 kGy než u neozářeného. Od teploty 90 °C a vyšší se poměrné prodloužení zvýšilo a bylo vyšší u ozářeného materiálu než u neozářeného materiálu. Největší pokles poměrného prodloužení byl při 80 °C, kdy bylo nižší o 28,1 % oproti neozářenému materiálu a při teplotě 100 °C bylo poměrné prodloužení zvýšeno u ozářeného materiálu dávkou 99 kGy o 2,0 % oproti neozářenému materiálu na výsledných 41,0 %.



Obr. 37. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 99 kGy.

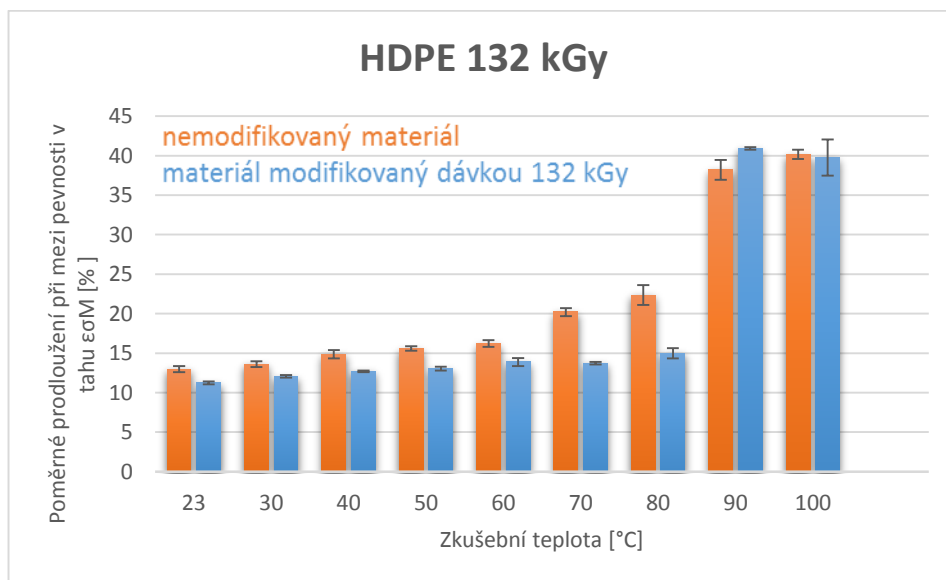
Pro ozářený materiál LDPE dávkou 99 kGy (Obr. 38) jsou výsledky o něco jiné než pro materiál HDPE. Při nižších teplotách (20 až 50 °C) je vždy vyšší poměrné prodloužení u neozářeného materiálu než u ozářeného materiálu dávkou 99 kGy. Poté nastává zlom a zvyšuje se poměrné prodloužení u ozářeného materiálu dávkou 99 kGy oproti neozářenému a další skok nastává při teplotě od 90 °C, kdy poměrné prodloužení je rapidně vyšší než u neozářeného materiálu. Při 100 °C je nárůst až o 502,4 %.



Obr. 38. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 99 kGy.

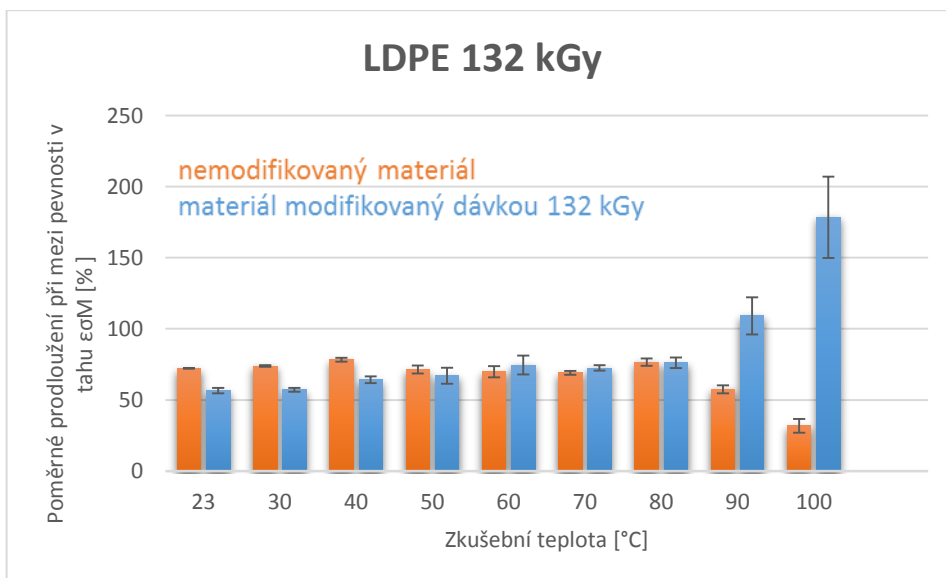
9.3.3 Materiál modifikovaný dávkou záření 132 kGy

Pro modifikovaný materiál HDPE dávkou 132 kGy jsou výsledky uvedeny níže při porovnání s nemodifikovaným materiálem (Obr. 39). Opět do 80 °C má vyšší poměrné prodloužení nemodifikovaný materiál a od 90 °C se to otáčí.



Obr. 39. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 132 kGy.

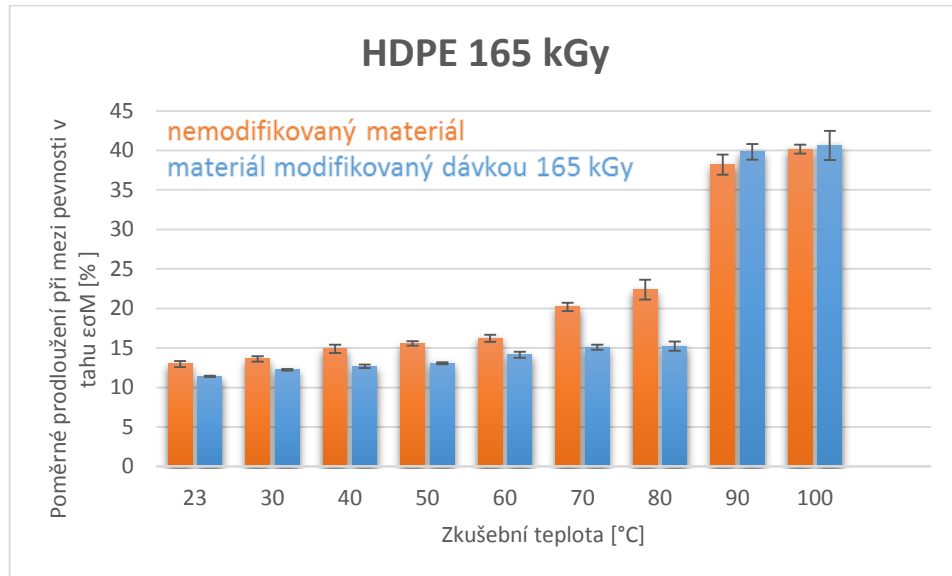
V dalším grafu je znázorněno porovnání neozařeného materiálu LDPE v porovnání s materiálem ozářeným dávkou 132 kGy (Obr. 40). Největší rozdíl je opět při teplotě 100 °C.



Obr. 40. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 132 kGy.

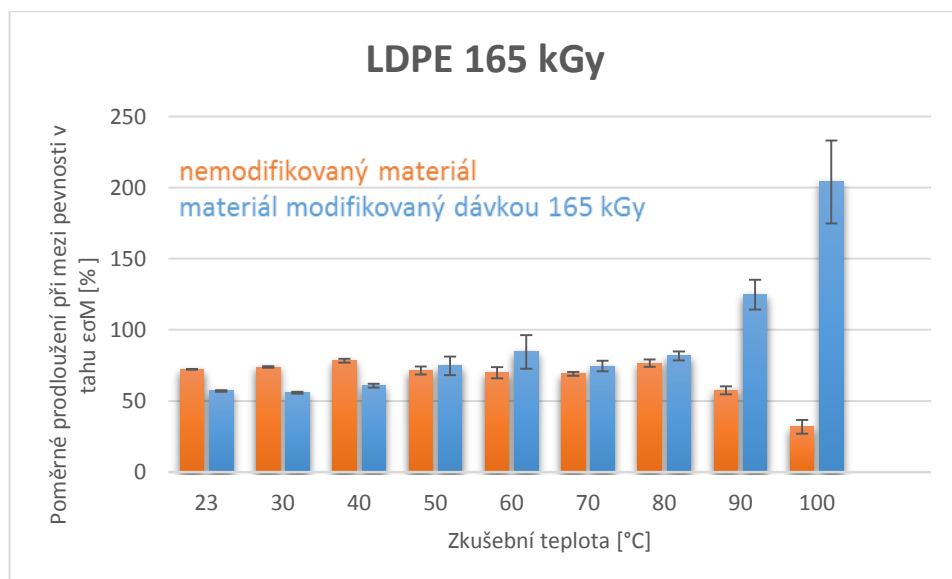
9.3.4 Materiál modifikovaný dávkou záření 165 kGy

Opět podobné porovnání je pro materiál HDPE ozářený 165 kGy při porovnání s neozářeným materiálem (Obr. 41). Opět největší rozdíl je při teplotě 80 °C, pokles je o 32,5 %.



Obr. 41. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 165 kGy.

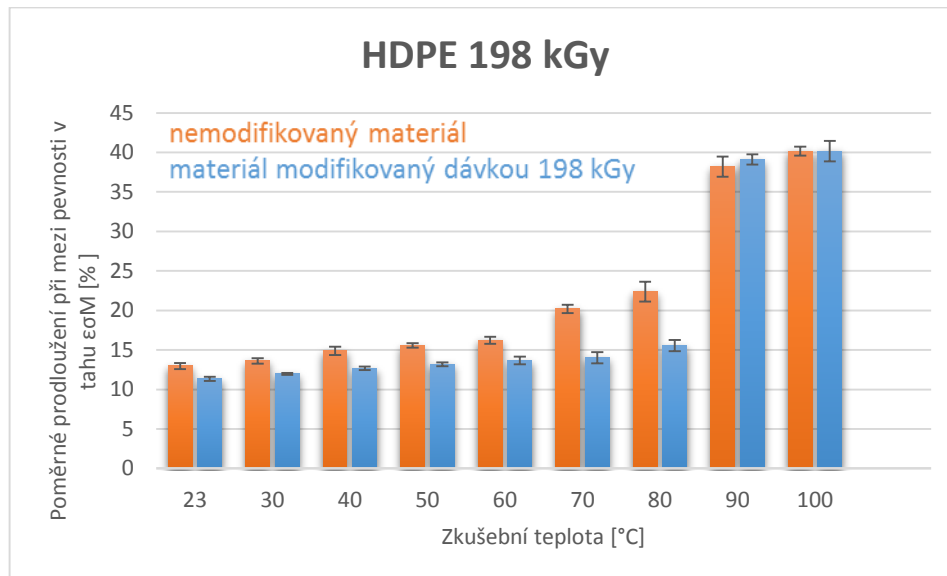
V dalším grafu je znázorněno porovnání neozářeného materiálu LDPE v porovnání s materiálem ozářeným dávkou 165 kGy (Obr. 42). Při teplotě 100 °C je rozdíl o 541,4 %.



Obr. 42. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 165 kGy.

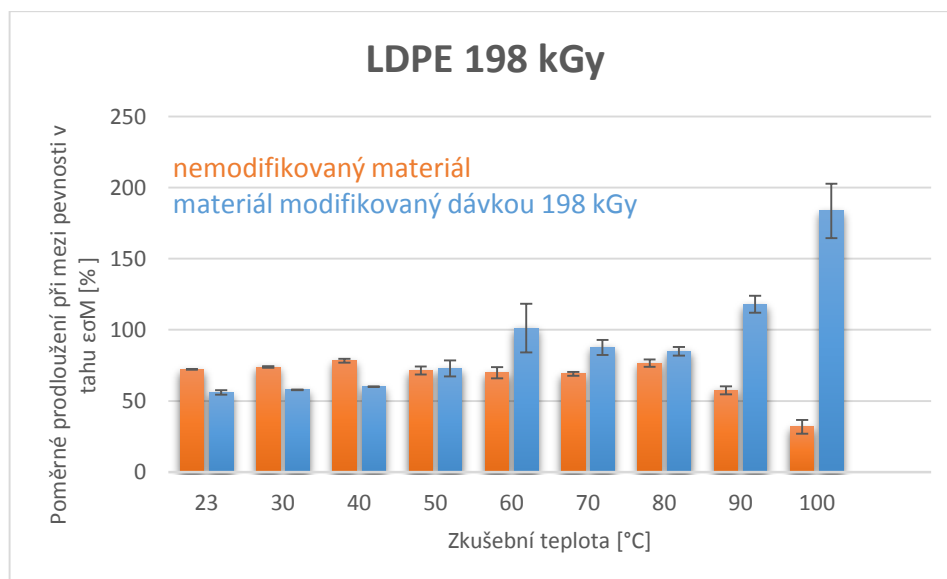
9.3.5 Materiál modifikovaný dávkou záření 198 kGy

Opět podobné porovnání je pro materiál HDPE ozářený 198 kGy při porovnání s neozářeným materiálem (Obr. 43). Opět největší rozdíl je při teplotě 80 °C, pokles je o 31,2 %.



Obr. 43. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 198 kGy.

V dalším grafu je znázorněno porovnání neozářeného materiálu LDPE v porovnání s materiálem ozářeným dávkou 198 kGy (Obr. 44). Největší rozdíl je opět při teplotě 100 °C.



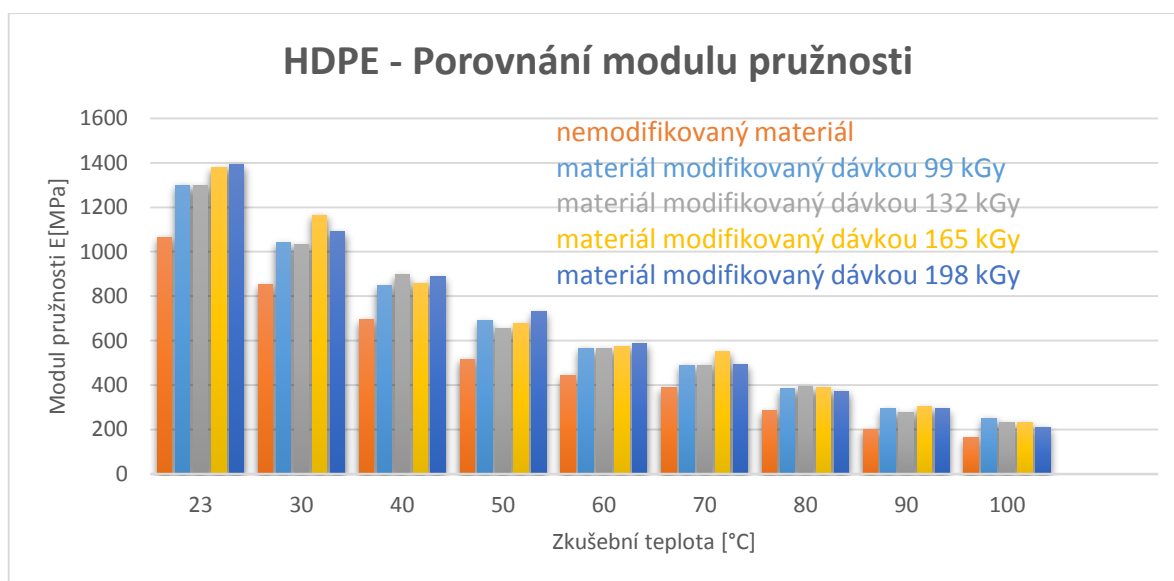
Obr. 44. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 198 kGy.

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

10.1 Modul pružnosti v tahu - HDPE

Z tabulek a grafů jasně vyplývá, jak se se vzrůstající teplotou exponenciálně snižoval modul pružnosti v tahu. Pro neozářený materiál byl při pokojové teplotě průměrně 1065,4 MPa a při zvýšené (100 °C) byl jen 161,8 MPa. Sítování materiálu postupně jeho modul pružnosti zvyšovalo, při maximální dávce 198 kGy to bylo při pokojové teplotě 1390,8 MPa. a při zvýšené (100 °C) 212,0 MPa. Z těchto výsledků lze zaznamenat rozdíl zvýšení modulu pružnosti mezi neozářeným materiálem a materiálem s největší dávkou záření při pokojové teplotě o 31,1 % a při zvýšené teplotě (100 °C) o 31,4 %.

V následujícím grafu (Obr. 45) je uvedeno kompletní porovnání modulu pružnosti pro materiál HDPE. První sloupec je vždy pro neozářený materiál a další sloupce pro materiál ozářený dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy. Z porovnání lze vidět, jak se během stupně ozáření postupně zvyšuje modul pružnosti a jak se jeho hodnota se vzrůstající teplotou mění.



Obr. 45. HDPE – Porovnání modulu pružnosti u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.

V následující tabulce (Tab. 10) je procentuálně znázorněna změna hodnoty modulu pružnosti pro ozářený materiál HDPE při porovnání s materiálem neozářeným. Získané hodnoty nemodifikovaného materiálu (dávka záření 0 kGy) jsou brány jako referenční. Hodnoty v tabulce ukazují změnu vůči referenční hodnotě v důsledku ozáření.

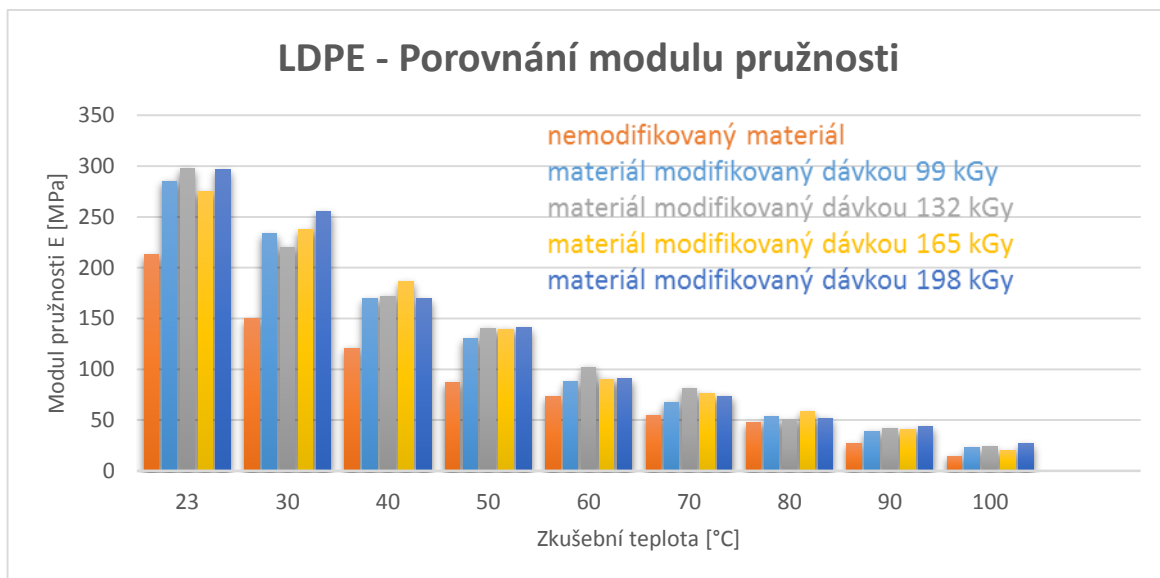
Tab. 10. Změna modulu pružnosti u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.

HDPE – Změna modulu pružnosti v tahu E					
T [°C]	0 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
23	Ref. 1065,3	+ 22,1 %	+ 22,9 %	+ 29,4 %	+ 31,1 %
30	Ref. 850,4	+ 22,6 %	+ 21,0 %	+ 37,6 %	+ 28,2 %
40	Ref. 693,4	+ 22,8 %	+ 29,1 %	+ 23,4 %	+ 27,0 %
50	Ref. 516,9	+ 34,0 %	+ 26,6 %	+ 31,7 %	+ 42,6 %
60	Ref. 444,8	+ 27,6 %	+ 27,5 %	+ 29,3 %	+ 32,7 %
70	Ref. 389,0	+ 26,4 %	+ 26,5 %	+ 41,3 %	+ 26,8 %
80	Ref. 285,0	+ 34,4 %	+ 38,0 %	+ 36,6 %	+ 31,2 %
90	Ref. 201,3	+ 46,3 %	+ 38,5 %	+ 51,4 %	+ 46,0 %
100	Ref. 161,7	+ 56,9 %	+ 43,1 %	+ 42,5 %	+ 31,4 %

10.2 Modul pružnosti v tahu - LDPE

Pro materiál LDPE platí to stejné, exponenciálně se modul pružnosti v tahu snižuje se vzrůstající teplotou. Pro neozářený materiál byl při pokojové teplotě průměrně 212,5 MPa a při zvýšené (100 °C) byl 14,4 MPa. Sítování materiálu postupně jeho modul pružnosti zvyšovalo, při maximální dávce 198 kGy to bylo při pokojové teplotě 296,2 MPa a při zvýšené (100 °C) 26,4 MPa. Z těchto výsledků lze tedy zaznamenat rozdíl zvýšení modulu pružnosti mezi neozářeným materiálem a materiálem s největší dávkou záření při pokojové teplotě o 39,1 % a při zvýšené teplotě (100 °C) o 84,0 %.

V dalším grafu (Obr. 46) je opět uvedeno kompletní porovnání modulu pružnosti tentokrát pro materiál LDPE. V prvním sloupci je opět neozářený materiál a v dalších sloupcích ozářený materiál dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy. Z porovnání lze vidět, jak se během stupně ozáření zvyšuje modul pružnosti a jak se jeho hodnota se vzrůstající teplotou mění.



Obr. 46. LDPE – Porovnání modulu pružnosti u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.

V další tabulce (Tab. 11) je procentuálně znázorněna změna hodnoty modulu pružnosti pro ozářený materiál LDPE při porovnání s materiálem neozářeným. Získané hodnoty nemodifikovaného materiálu (dávka záření 0 kGy) jsou brány jako referenční.

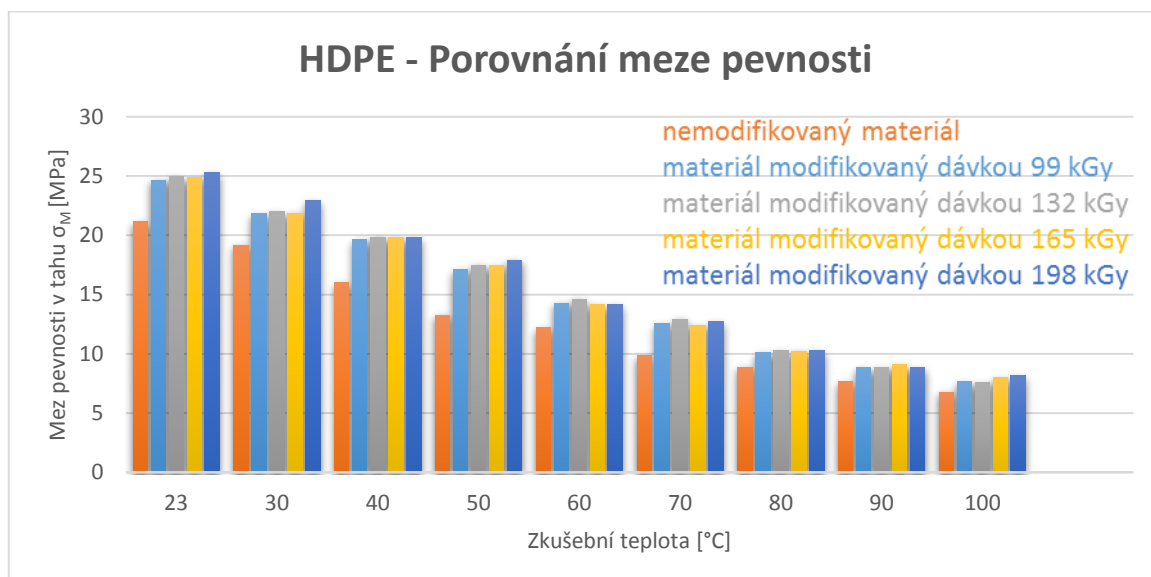
Tab. 11. Změna modulu pružnosti u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.

LDPE – Změna modulu pružnosti v tahu E					
T [°C]	0 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
23	Ref. 212,5	+ 34,1 %	+ 40,5 %	+ 29,4 %	+ 39,1 %
30	Ref. 149,9	+ 56,6 %	+ 47,4 %	+ 58,2 %	+ 70,3 %
40	Ref. 120,7	+ 40,7 %	+ 42,3 %	+ 55,6 %	+ 40,9 %
50	Ref. 86,4	+ 50,0 %	+ 62,6 %	+ 61,4 %	+ 63,1 %
60	Ref. 73,1	+ 20,2 %	+ 40,0 %	+ 23,6 %	+ 25,1 %
70	Ref. 54,6	+ 24,6 %	+ 48,2 %	+ 40,2 %	+ 34,2 %
80	Ref. 47,1	+ 14,5 %	+ 6,1 %	+ 24,8 %	+ 11,4 %
90	Ref. 26,6	+ 47,8 %	+ 55,5 %	+ 53,7 %	+ 64,6 %
100	Ref. 14,3	+ 60,7 %	+ 66,0 %	+ 39,4 %	+ 84,0 %

10.3 Mez pevnosti v tahu - HDPE

Mez pevnosti v tahu v závislosti na teplotě má pro materiál HDPE spíše než exponenciální průběh, tak průběh konstantní. Pro neozářený materiál při pokojové teplotě má hodnotu 21,1 MPa a při zvýšené (100 °C) 6,8 MPa. Na druhou stranu nejvíce ozářený materiál dávkou 198 kGy má při pokojové teplotě mez pevnosti v tahu 25,3 MPa a při zvýšené 8,1 MPa. Rozdíl mezi neozářeným a ozářeným materiálem (198 kGy) je při pokojové teplotě o 19,5 % a při zvýšené teplotě na 100 °C je to 20,0 %.

V grafu (Obr. 47) je uvedeno kompletní porovnání meze pevnosti pro materiál HDPE. V prvním sloupci je opět neozářený materiál a v dalších sloupcích ozářený materiál dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy. Z porovnání lze vidět, jak se během stupně ozáření zvyšuje mez pevnosti a jak se jeho hodnota se vzrůstající teplotou mění.



Obr. 47. HDPE – Porovnání meze pevnosti u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.

V tabulce (Tab. 12) je procentuálně znázorněna změna hodnoty meze pevnosti pro ozářený materiál HDPE při porovnání s materiálem neozářeným. Získané hodnoty nemodifikovaného materiálu (dávka záření 0 kGy) jsou brány jako referenční. Hodnoty uvedené v tabulce ukazují změnu vůči referenční hodnotě v důsledku ozáření.

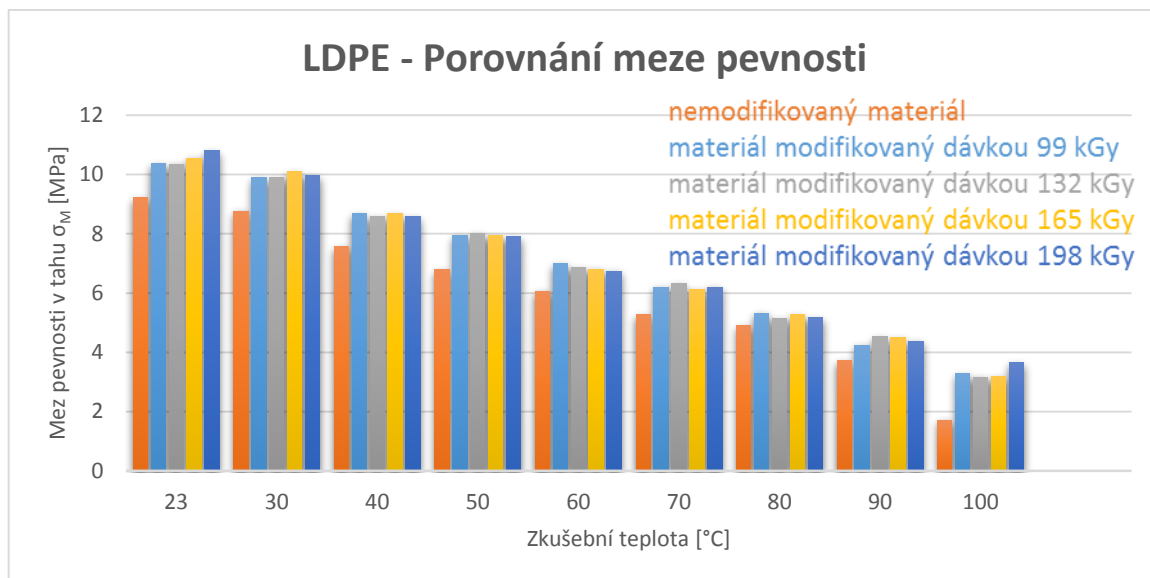
Tab. 12. Změna meze pevnosti u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.

HDPE – Změna meze pevnosti v tahu σ_M					
T [°C]	0 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
23	Ref. 21,1	+ 17,2 %	+ 18,1 %	+ 18,2 %	+ 19,5 %
30	Ref. 19,1	+ 14,4 %	+ 15,7 %	+ 14,6 %	+ 20,4 %
40	Ref. 15,9	+ 23,6 %	+ 24,6 %	+ 24,0 %	+ 24,5 %
50	Ref. 13,2	+ 29,7 %	+ 32,7 %	+ 32,0 %	+ 35,6 %
60	Ref. 12,2	+ 17,6 %	+ 19,3 %	+ 16,6 %	+ 15,7 %
70	Ref. 9,8	+ 27,8 %	+ 31,2 %	+ 26,8 %	+ 29,8 %
80	Ref. 8,8	+ 14,4 %	+ 16,4 %	+ 15,7 %	+ 15,7 %
90	Ref. 7,6	+ 15,2 %	+ 16,6 %	+ 19,4 %	+ 15,4 %
100	Ref. 6,7	+ 14,1 %	+ 12,1 %	+ 18,1 %	+ 20,0 %

10.4 Mez pevnosti v tahu - LDPE

Mez pevnosti v tahu v závislosti na teplotě má pro materiál LDPE spíše než exponenciální průběh, tak průběh konstantní. Pro neozářený materiál při pokojové teplotě má hodnotu 9,2 MPa a při zvýšené (100 °C) 1,7 MPa. Na druhou stranu nejvíce ozářený materiál dávkou 198 kGy má při pokojové teplotě mez pevnosti v tahu 10,8 MPa a při zvýšené 3,7 MPa. Rozdíl mezi neozářeným a ozářeným materiálem (198 kGy) je při pokojové teplotě o 17,4 % a při zvýšené teplotě na 100 °C je to 113,8 %.

V grafu (Obr. 48) je uvedeno celkové porovnání meze pevnosti pro materiál LDPE. V prvním sloupci je opět neozářený materiál a v dalších sloupcích ozářený materiál dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy. Z porovnání lze vidět, jak se během stupně ozáření zvyšuje mez pevnosti a jak se jeho hodnota se vzrůstající teplotou mění.



Obr. 48. LDPE – Porovnání meze pevnosti u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.

V tabulce (Tab. 13) je procentuálně znázorněna změna hodnoty meze pevnosti pro ozářený materiál LDPE při porovnání s materiálem neozářeným. Získané hodnoty nemodifikovaného materiálu (dávka záření 0 kGy) jsou brány jako referenční. Hodnoty uvedené v tabulce ukazují změnu vůči referenční hodnotě v důsledku ozáření.

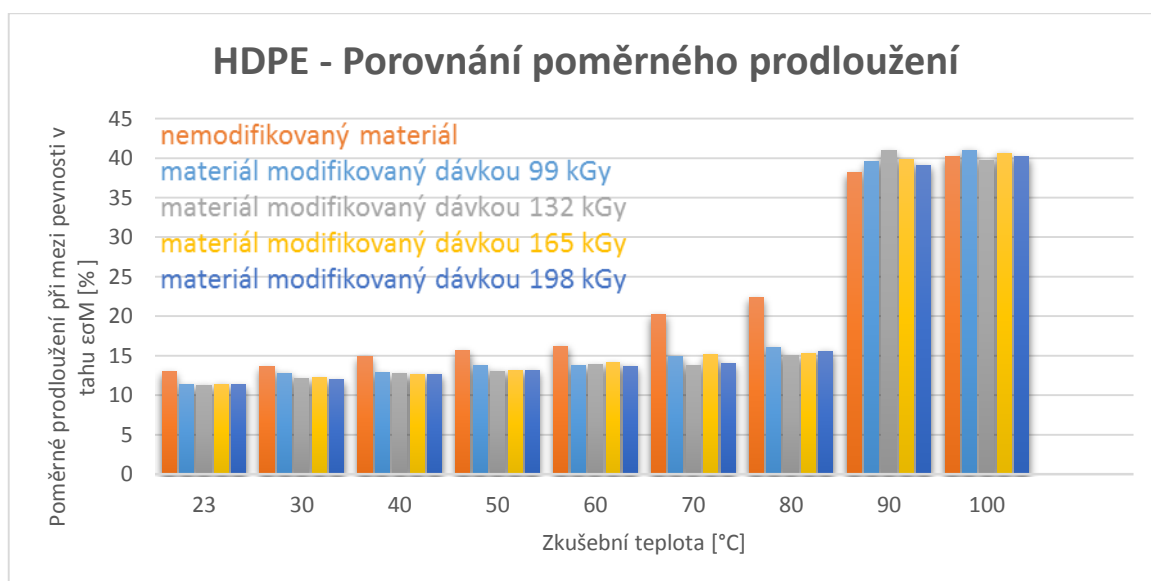
Tab. 13. Změna meze pevnosti u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.

LDPE – Změna meze pevnosti v tahu σ_M					
T [°C]	0 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
23	Ref. 9,2	+ 13,3 %	+ 12,0 %	+ 15,3 %	+ 17,4 %
30	Ref. 8,7	+ 13,4 %	+ 13,4 %	+ 15,8 %	+ 14,7 %
40	Ref. 7,5	+ 15,2 %	+ 14,1 %	+ 15,4 %	+ 14,0 %
50	Ref. 6,7	+ 17,0 %	+ 18,3 %	+ 17,0 %	+ 17,5 %
60	Ref. 6,0	+ 15,9 %	+ 13,8 %	+ 12,1 %	+ 11,2 %
70	Ref. 5,2	+ 18,0 %	+ 20,8 %	+ 16,7 %	+ 17,8 %
80	Ref. 4,9	+ 9,3 %	+ 5,0 %	+ 7,8 %	+ 6,7 %
90	Ref. 3,7	+ 14,6 %	+ 22,7 %	+ 20,0 %	+ 17,7 %
100	Ref. 1,7	+ 92,5 %	+ 85,4 %	+ 85,5 %	+ 113,8 %

10.5 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu - HDPE

Poměrné prodloužení má lehce exponenciální charakter, s tím že roste a od teploty 90 °C se značně skokově zvýší. Pro neozářený materiál při pokojové teplotě má poměrné prodloužení 12,9 % a při zvýšené teplotě 80 °C je to 22,4 %. Od této teploty je poměrné prodloužení téměř jednou tak vysoké. Pro ozářený materiál (198 kGy) je poměrné prodloužení při pokojové teplotě (23 °C) 11,3 % a při zvýšené teplotě (80 °C) je to 15,5 %. Po této teplotě se již poměrné prodloužení téměř vůbec neliší od neozářeného materiálu, ani při nejnižším stupni ozáření (99 kGy). Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu se tedy při pokojové teplotě snížilo z 12,9 % na 11,3 %, to stejné nastává i při zvýšené teplotě (80 °C), kdy se poměrné prodloužení snížilo z 22,3 % pro neozářený materiál na 15,5 % pro ozářený materiál dávkou 99kGy.

V dalším grafu (Obr. 49) je uvedeno celkové porovnání poměrného prodloužení pro materiál HDPE. V prvním sloupci je opět neozářený materiál a v dalších sloupcích ozářený materiál dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy. Z porovnání lze vidět, jak se během stupně ozáření snižuje a při zvýšené teplotě zvyšuje poměrné prodloužení.



Obr. 49. HDPE – Porovnání poměrného prodloužení u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.

V tabulce (Tab. 14) je procentuálně znázorněna změna hodnoty poměrného prodloužení pro ozářený materiál HDPE při porovnání s materiálem neozářeným. Získané hodnoty nemodifikovaného materiálu (dávka záření 0 kGy) jsou brány jako referenční. Hodnoty uvedené v tabulce ukazují změnu vůči referenční hodnotě v důsledku ozáření.

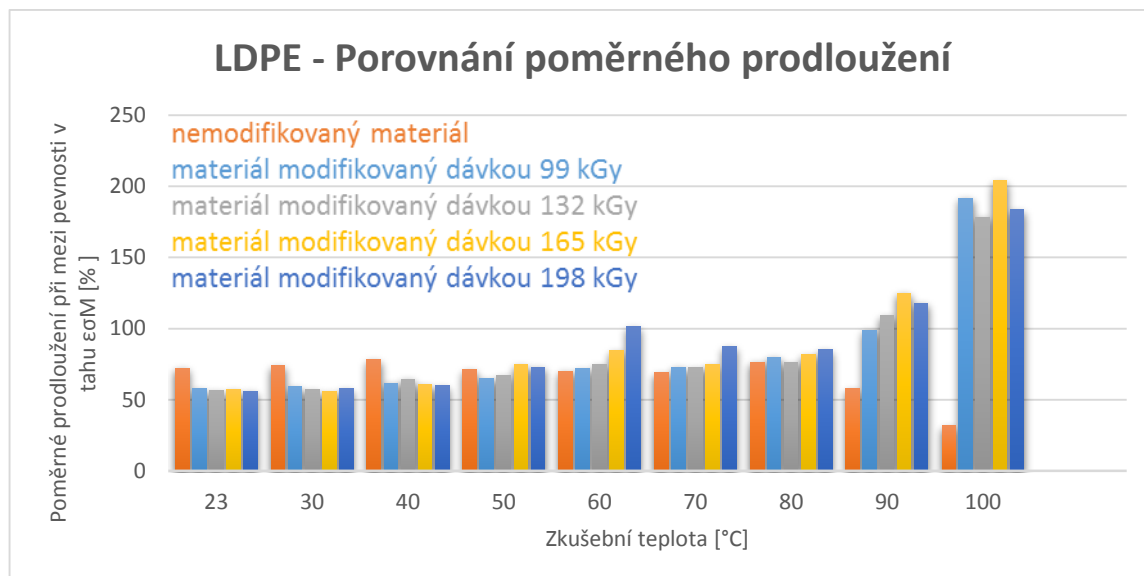
Tab. 14. Změna poměrného prodloužení u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.

HDPE – Změna poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu ϵ_{GM}					
T [°C]	0 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
23	Ref. 12,9	- 12,8 %	- 13,9 %	- 13,4 %	- 13,0 %
30	Ref. 13,6	- 6,1 %	- 11,2 %	- 10,1 %	- 12,5 %
40	Ref. 14,8	- 14,9 %	- 15,3 %	- 15,8 %	- 15,4 %
50	Ref. 15,5	- 12,7 %	- 16,0 %	- 16,9 %	- 15,8 %
60	Ref. 16,2	- 15,7 %	- 14,9 %	- 13,4 %	- 16,7 %
70	Ref. 20,1	- 26,3 %	- 32,4 %	- 25,1 %	- 31,1 %
80	Ref. 22,3	- 28,1 %	- 33,7 %	- 32,5 %	- 31,2 %
90	Ref. 38,2	+ 4,4 %	+ 7,5 %	+ 4,9 %	+ 2,2 %
100	Ref. 40,1	+ 2,0 %	- 1,6 %	+ 1,0 %	+ 1,3 %

10.6 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu - LDPE

U LDPE je oproti HDPE situace o dost jiná. Neozářený materiál má při pokojové teplotě hodnotu 72,1 % a při zvýšené teplotě (100 °C) se postupně poměrné prodloužení snížilo na hodnotu 31,8 %. Největší pokles je od 90 °C a dále. Na druhou stranu ozářený materiál dávkou 99 kGy vykazuje již opačné vlastnosti, při pokojové teplotě je poměrné prodloužení 57,9 % a při zvýšené (100 °C) je již 191,2 %. Opět s tím, že od 90 °C je nárůst značný. Více ozářené vzorky (132, 165, 198 kGy) se již značně neliší od materiálu, který je ozářen dávkou 99 kGy.

V posledním grafu (Obr. 50) je uvedeno celkové porovnání poměrného prodloužení pro materiál LDPE. V prvním sloupci je opět neozářený materiál a v dalších sloupcích ozářený materiál dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy. Z porovnání lze vidět, jak se během stupně ozáření snižuje a při zvýšené teplotě zvyšuje poměrné prodloužení.



Obr. 50. LDPE – Porovnání poměrného prodloužení u neozařeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.

V poslední tabulce (Tab. 15) je procentuálně znázorněna změna hodnoty poměrného prodloužení pro ozářený materiál LDPE při porovnání s materiálem neozařeným. Získané hodnoty nemodifikovaného materiálu (dávka záření 0 kGy) jsou brány jako referenční. Hodnoty uvedené v tabulce ukazují změnu vůči referenční hodnotě v důsledku ozáření. Při nejvyšší teplotě (90 a 100 °C) je vidět značné zvýšení poměrného prodloužení ozářených materiálů a značnou změnu materiálu neozařeného. Úroveň hranice 50 °C je oblast, ve které se poměrné prodloužení postupně zvyšuje.

Tab. 15. Změna poměrného prodloužení u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.

LDPE – Změna poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\varepsilon_{\sigma M}$					
T [°C]	0 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
23	Ref. 72,1	- 20,8 %	- 22,7 %	- 21,4 %	- 23,4 %
30	Ref. 73,8	- 20,4 %	- 23,4 %	- 25,3 %	- 22,8 %
40	Ref. 78,2	- 21,4 %	- 18,9 %	- 23,9 %	- 23,1 %
50	Ref. 71,3	- 10,0 %	- 6,7 %	+ 5,0 %	+ 2,0 %
60	Ref. 69,9	+ 3,9 %	+ 7,8 %	+ 21,4 %	+ 45,3 %
70	Ref. 69,1	+ 6,1 %	+ 5,4 %	+ 8,1 %	+ 27,1 %
80	Ref. 76,5	+ 4,2 %	- 1,1 %	+ 7,9 %	+ 11,9 %
90	Ref. 57,5	+ 72,5 %	+ 89,0 %	+ 117,3 %	+ 105,8 %
100	Ref. 31,8	+ 502,4 %	+ 461,3 %	+ 541,4 %	+ 477,5 %

ZÁVĚR

Na základě výsledků měření a vyhodnocení dat vyplývá, že ionizační beta záření má vliv na vlastnosti materiálů HDPE a LDPE. V práci byl měřen a vyhodnocován modul pružnosti, mez pevnosti a poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu. U všech těchto vlastností byla prokazatelná změna již při nejnižší dávce 99 kGy. Zároveň všechny tyto vlastnosti ovlivňovala zvyšující se teplota a zvyšující se dávka záření. Ke všem naměřeným výsledkům byly rovněž vypočteny základní statistické veličiny a procentuální změna jednotlivých vlastností.

Z měření vyplynulo, že se modul pružnosti pro neozářený i ozářený materiál HDPE i LDPE postupně se zvyšující teplotou snižoval. Při vyšších teplotách to byl až několikanásobný pokles oproti pokojové teplotě (23 °C). Ozáření materiálu přineslo zvýšení modulu pružnosti při všech testovaných teplotách. Podobné výsledky jsou i pro mez pevnosti těchto dvou testovaných materiálů. U neozářených i ozářených se se zvyšující teplotou mez pevnosti snižuje. Již nejnižší dávka ozáření 99 kGy přinesla zvýšení meze pevnosti a při dalších dávkách se dále postupně zvyšovala. U meze pevnosti je největší rozdíl pro materiál HDPE při teplotě 23 °C mezi neozářeným a ozářeným a pro materiál LDPE je tato změna největší při teplotě 100 °C.

Při měření poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu z výsledků vyplývá, že má opačný charakter oproti modulu pružnosti nebo mezi pevnosti. Se zvyšující se teplotou se poměrné prodloužení u neozářeného i ozářených materiálů HDPE i LDPE postupně zvyšuje. Přibližně do 80 °C se zvyšuje pomaleji a od 90 °C nastává skoková změna a poměrné prodloužení se rapidně zvýší. U HDPE jsou hodnoty pro neozářený i ozářený materiál při 90 °C a 100 °C téměř identické, pro materiál LDPE je tato změna skoková a 90 °C je schod mezi 80 a 100 °C. Zároveň je rozdíl v tom, že u HDPE je při vyšších teplotách jen malý rozdíl mezi neozářenými a ozářenými vzorky, ale u materiálů LDPE je rozdíl v tom, že od 90 °C poměrné prodloužení u neozářeného materiálu klesá, ale u ozářených materiálů výrazně stoupá.

Z naměřených dat lze tedy vyzorovat, že největších změn zkoumaných vlastností dosáhly ozařované polyetyleny při vyšších dávkách záření. Je nutné však konstatovat, že konečná aplikovaná dávka záření by měla být vždy kompromisem mezi požadovanými vlastnostmi a náklady nutnými na realizaci modifikace, tak aby výsledná přidaná hodnota modifikace konečného produktu byla co nejlepší.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [2] ŠVESTÁK, Marek. *Vliv ozařování na hořlavost vybraných typů polymeru*. Zlín, 2012. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [3] KOMÍNEK, Petr. *Měření nanotvrdosti PBT*. Zlín, 2014. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [4] PŘÍKRYL, Martin. *Vliv ozařování na vlastnosti polyamidů*. Zlín, 2008. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [5] VACULÍK, Jan. *Vlastnosti radiačně síťovaných polymerů*. Zlín, 2010. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [6] MIZERA, Aleš. *Teplotní odolnost vybraných polymerů*. Zlín, 2011. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [7] MAKUUCHI, Keizo a Song CHENG, *Radiation processing of polymer materials and its industrial applications*. Hoboken. N.J.: Willey, c2012, xxviii, 415 s. ISBN 978-0-470-58769-0.
- [8] ŠMACH, Petr. *Modifikace polymerních materiálů ionizujícím beta zářením za účelem změny jejich vlastností*. Zlín, 2014. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [9] MACOUREK, Jiří. *Vliv ozáření na mechanické a termomechanické vlastnosti LDPE a HDPE*. Zlín, 2010. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [20] HOLÍK, Zdeněk. *Vliv záření na vlastnosti polymerů*. Zlín, 2013. Disertační práce. UTB ve Zlíně.
- [31] DROBNY, Jiri George. *Ionizing radiation and polymers: principles, technology and applications*. Boston: Elsevier/William Andrew, 2013. PDL handbook series. ISBN 14-557-7881-8.
- [42] Dodatečná zesíťování. *Technologie zpracování plastů* [online]. 2013 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/16.html>
- [53] Radiační síťování – metoda zlepšování vlastností polymerů. *PlasticPortal.eu* [online]. 2015 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/radiacne-sietovanie-metoda-zlepsovania-vlastnosti-polymerov-1-cast/c/2641>

- [64] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.
- [75] STEPHEN, Davidson. *Exploring the Science: Technology and Applications of U.V. and E.B Curing*. London UK: Sita Technology Limited, 1999, 289 s.
- [86] VASILE, Cornelia a Mihaela PASCU. *Practical guide to polyethylene*. Shrewsbury: RAPRA Technology, 2005. ISBN 1-85957-493-9.
- [97] BARTOŠ, Zdeněk. *Vliv teploty na mechanické chování konstrukčních materiálů*. Zlín, 2007. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [108] STANĚK, Lukáš. *Modifikace mechanických vlastností konstrukčních polymerů ionizujícím beta zářením*. Zlín, 2015. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

aj.	A jiné
atp.	A tak podobně
Bq	Becquerel
Co	Kobalt
CRT	Cathode ray tube (speciální elektronka)
CT	Computerized axial tomography scan (lékařský diagnostický test)
E	Modul pružnosti v tahu
EVA	Ethylene-vinyl acetate
eV	Elektron Volt
g	Gram
GmbH & Co. KG	Druh společnosti v Německu
Gy	Gray
HDPE	High density polyethylene
J	Joule
k	Předpona kilo
LDPE	Low density polyethylene
LLDPE	Linear low density polyethylene
m	Metr
m ³	Metr krychlový
mm	Předpona mili – milimetr
M	Předpona mega
Min	Minuta
Mn	Mangan
N	Newton

např.	Například
Pa	Pascal
PA	Newton
Pb	Olovo
PBT	Polybutylene terephthalate
PE	Polyetylen
PUR	Polyuretan
PVA	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
Q ₁	Dolní kvartil
Q ₃	Horní kvartil
rad	Jednotka absorbované dávky ionizujícího záření
s	Sekunda
s	Směrodatná odchylka
T	Teplota
TAC	Triallylcyanuran
TAIC	Triallylizocyanuran
Tj.	To je
TPE	Thermoplastic elastomer
TPU	Thermoplastic polyurethane
tzv.	Takzvaný
UHMPWE	Ultra high molecular weight polyethylene
V	Variační rozpětí
V _x	Variační koeficient
\bar{x}	Průměrná hodnota
W	Watt

$^{\circ}\text{C}$	Stupně Celsia
%	Procento
α	Alfa
β	Beta
γ	Gama
σ	Kvadratická chyba
σ_M	Mez pevnosti v tahu
$\varepsilon_{\sigma M}$	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Záření alfa. [5]	16
Obr. 2. Záření beta. [5]	16
Obr. 3. Záření gama. [5]	17
Obr. 4. Porovnání pronikavosti jednotlivých druhů záření. [8]	19
Obr. 5. Síťování polyetyleny pomocí peroxidu. [5]	23
Obr. 6. Princip radiačního síťování. [12]	25
Obr. 7. Polymery vhodné pro radiační síťování. [13]	26
Obr. 8. Závislost ozařující dávky na některých vlastnostech polymerů. [3]	27
Obr. 9. Strukturní vzorec etylenu C ₂ H ₄ . [9]	37
Obr. 10. Rozdíl ve větvení makromolekul u HDPE a LDPE. [9]	37
Obr. 11. Linka pro radiační síťování. [10]	40
Obr. 12. Zkušební stroj Zwick Roell 1456.	41
Obr. 13. Uživatelské rozhraní s výsledky v programu TextXpert II.	42
Obr. 14. Teplotní komora Zwick Roell W91255.	43
Obr. 15. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u nemodifikovaného materiálu HDPE.	48
Obr. 16. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u nemodifikovaného materiálu LDPE.	48
Obr. 17. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 99 kGy.	49
Obr. 18. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 99 kGy.	50
Obr. 19. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 132 kGy.	50
Obr. 20. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 132 kGy.	51
Obr. 21. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 165 kGy.	51
Obr. 22. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 165 kGy.	52
Obr. 23. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 198 kGy.	53

Obr. 24. Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 198 kGy.	53
Obr. 25. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u nemodifikovaného materiálu HDPE.....	56
Obr. 26. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u nemodifikovaného materiálu LDPE.	56
Obr. 27. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 99 kGy.....	57
Obr. 28. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 99 kGy.	58
Obr. 29. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 132 kGy.....	58
Obr. 30. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 132 kGy.	59
Obr. 31. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 165 kGy.....	59
Obr. 32. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 165 kGy.	60
Obr. 33. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 198 kGy.....	61
Obr. 34. Závislost meze pevnosti v tahu na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 198 kGy.	61
Obr. 35. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u nemodifikovaného materiálu HDPE.....	64
Obr. 36. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u nemodifikovaného materiálu LDPE.	64
Obr. 37. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 99 kGy.....	65
Obr. 38. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 99 kGy.	66
Obr. 39. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 132 kGy.....	67

Obr. 40. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 132 kGy.	67
Obr. 41. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 165 kGy.	68
Obr. 42. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 165 kGy.	68
Obr. 43. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu HDPE dávkou 198 kGy.	69
Obr. 44. Závislost poměrného prodloužení na teplotě u modifikovaného materiálu LDPE dávkou 198 kGy.	69
Obr. 45. HDPE – Porovnání modulu pružnosti u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.	70
Obr. 46. LDPE – Porovnání modulu pružnosti u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.	72
Obr. 47. HDPE – Porovnání meze pevnosti u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.	73
Obr. 48. LDPE – Porovnání meze pevnosti u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.	75
Obr. 49. HDPE – Porovnání poměrného prodloužení u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.	76
Obr. 50. LDPE – Porovnání poměrného prodloužení u neozářeného a ozářených materiálů dávkami 99, 132, 165 a 198 kGy.	78

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Vliv obsahu vázané síry ve vulkanizátech přírodního kaučuku na T_G . [5]	24
Tab. 2. Přehled možných použití v průmyslu a vlastností po ozáření. [5].....	28
Tab. 3. Srovnání vybraných vlastností HDPE a LDPE. [8].....	38
Tab. 4. Výběr naměřených dat – modul pružnosti HDPE.	46
Tab. 5. Výběr naměřených dat – modul pružnosti LDPE.....	47
Tab. 6. Výběr naměřených dat – mez pevnosti v tahu HDPE.	54
Tab. 7. Výběr naměřených dat – mez pevnosti v tahu LDPE.....	55
Tab. 8. Výběr naměřených dat – poměrné prodloužení HDPE.	62
Tab. 9. Výběr naměřených dat – poměrné prodloužení LDPE.....	63
Tab. 10. Změna modulu pružnosti u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.	71
Tab. 11. Změna modulu pružnosti u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.	72
Tab. 12. Změna meze pevnosti u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.....	74
Tab. 13. Změna meze pevnosti u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.....	75
Tab. 14. Změna poměrného prodloužení u materiálu HDPE v závislosti na dávce záření.	77
Tab. 15. Změna poměrného prodloužení u materiálu LDPE v závislosti na dávce záření.	79

SEZNAM PŘÍLOH

- P1 Výsledky měření tahových zkoušek
- P2 Materiálový list HDPE
- P3 Materiálový list LDPE

PŘÍLOHA P I: VÝSLEDKY MĚŘENÍ TAHOVÝCH ZKOUŠEK

Tahová zkouška HDPE při pokojové teplotě 23 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	1065,39	49,41	15,63	1045,81	1057,96	1090,68	44,87	169,04	4,64
99 kGy	1299,98	55,94	17,69	1259,37	1309,22	1343,80	84,43	158,24	4,30
132 kGy	1298,96	59,38	18,78	1257,23	1307,08	1346,81	89,58	172,08	4,57
165 kGy	1378,79	45,99	14,54	1358,93	1385,84	1403,47	44,54	160,62	3,34
198 kGy	1390,84	38,18	12,07	1368,29	1393,81	1403,07	34,78	132,88	2,75
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	21,15	0,56	0,18	20,63	20,96	21,51	0,88	1,52	2,66
99 kGy	24,66	0,16	0,05	24,58	24,62	24,78	0,20	0,46	0,65
132 kGy	24,92	0,17	0,05	24,80	24,92	25,07	0,27	0,47	0,68
165 kGy	24,86	0,14	0,05	24,79	24,92	24,96	0,17	0,42	0,58
198 kGy	25,27	0,08	0,03	25,20	25,26	25,33	0,13	0,22	0,32
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	12,97	0,38	0,12	12,82	12,93	13,33	0,52	1,19	2,90
99 kGy	11,35	0,21	0,07	11,23	11,34	11,53	0,30	0,56	1,83
132 kGy	11,24	0,19	0,06	11,09	11,21	11,32	0,23	0,52	1,71
165 kGy	11,38	0,08	0,03	11,33	11,36	11,41	0,07	0,23	0,71
198 kGy	11,34	0,28	0,09	11,17	11,39	11,56	0,39	0,83	2,45

Tahová zkouška HDPE pro 30 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	850,48	42,75	13,52	826,71	839,86	873,92	47,21	135,43	5,03
99 kGy	1040,98	34,14	10,79	1026,67	1036,27	1055,67	28,99	115,88	3,28
132 kGy	1031,77	14,54	4,60	1021,11	1032,01	1042,23	21,13	46,97	1,41
165 kGy	1165,03	61,52	19,45	1138,39	1154,30	1219,38	80,99	178,01	5,28
198 kGy	1091,88	35,49	11,22	1058,92	1091,72	1115,69	56,76	98,76	3,25
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	19,17	0,31	0,10	18,95	19,15	19,39	0,44	0,94	1,59
99 kGy	21,83	0,17	0,05	21,77	21,82	21,90	0,13	0,52	0,77
132 kGy	22,00	0,12	0,04	21,92	21,95	22,11	0,19	0,33	0,56
165 kGy	21,89	0,33	0,10	21,67	21,85	22,05	0,38	1,13	1,51
198 kGy	22,91	0,21	0,07	22,79	22,91	22,98	0,19	0,67	0,93
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	13,61	0,36	0,12	13,51	13,61	13,75	0,24	1,23	2,67
99 kGy	12,78	0,09	0,03	12,73	12,81	12,83	0,10	0,29	0,69
132 kGy	12,06	0,16	0,05	11,97	12,10	12,18	0,21	0,51	1,35
165 kGy	12,23	0,12	0,04	12,15	12,24	12,31	0,15	0,41	1,02
198 kGy	11,98	0,12	0,04	11,91	11,96	12,05	0,14	0,41	1,00

Tahová zkouška HDPE pro 40 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	693,46	46,47	14,70	671,43	706,68	717,30	45,87	154,86	6,70
99 kGy	848,33	58,02	18,35	822,66	857,59	884,40	61,74	213,70	6,84
132 kGy	894,93	45,33	14,34	879,26	887,41	900,73	21,47	158,87	5,07
165 kGy	856,10	45,38	14,35	831,08	864,45	879,90	48,82	148,53	5,30
198 kGy	886,34	15,16	4,79	876,04	888,09	895,75	19,71	49,98	1,71
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	15,98	0,61	0,19	15,51	15,85	16,46	0,95	1,88	3,84
99 kGy	19,62	0,43	0,13	19,29	19,60	20,00	0,72	1,04	2,17
132 kGy	19,87	0,15	0,05	19,69	19,86	19,94	0,26	0,42	0,77
165 kGy	19,41	0,21	0,07	19,32	19,37	19,49	0,18	0,72	1,08
198 kGy	19,81	0,35	0,11	19,60	19,88	19,96	0,36	1,16	1,75
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	14,87	0,52	0,16	14,32	15,05	15,29	0,97	1,26	3,48
99 kGy	12,84	0,07	0,02	12,79	12,85	12,87	0,07	0,25	0,53
132 kGy	12,70	0,11	0,04	12,62	12,70	12,76	0,13	0,38	0,88
165 kGy	12,74	0,27	0,09	12,58	12,74	12,95	0,37	0,90	2,13
198 kGy	12,66	0,22	0,07	12,52	12,67	12,76	0,23	0,73	1,73

Tahová zkouška HDPE pro 50 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	516,96	32,80	10,37	489,39	519,56	534,39	45,00	108,26	6,35
99 kGy	691,49	49,08	15,52	674,57	697,97	728,22	53,65	150,89	7,10
132 kGy	654,80	27,15	8,59	647,44	664,88	669,67	22,23	89,30	4,15
165 kGy	675,62	45,48	14,38	628,61	687,80	705,96	77,36	125,13	6,73
198 kGy	730,10	21,33	6,75	713,96	729,23	745,67	31,70	65,99	2,92
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	13,25	0,34	0,11	13,08	13,37	13,51	0,43	0,95	2,57
99 kGy	17,11	0,26	0,08	16,94	17,02	17,25	0,31	0,97	1,54
132 kGy	17,48	0,15	0,05	17,43	17,48	17,52	0,09	0,60	0,87
165 kGy	17,46	0,35	0,11	17,33	17,45	17,63	0,30	1,18	1,99
198 kGy	17,91	0,11	0,03	17,88	17,92	17,95	0,06	0,43	0,61
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	15,58	0,28	0,09	15,45	15,53	15,60	0,15	0,99	1,77
99 kGy	13,78	0,14	0,05	13,65	13,81	13,89	0,24	1,26	1,04
132 kGy	13,04	0,26	0,08	12,80	13,13	13,24	0,44	0,70	1,96
165 kGy	13,07	0,12	0,04	13,03	13,09	13,12	0,09	0,40	0,95
198 kGy	13,18	0,26	0,08	13,00	13,18	13,34	0,34	0,85	1,95

Tahová zkouška HDPE pro 60 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	444,83	44,72	14,14	404,85	438,99	482,56	77,70	125,58	10,05
99 kGy	565,61	46,68	14,76	553,55	576,73	587,95	34,40	146,35	8,25
132 kGy	563,72	55,46	17,54	538,45	581,91	601,01	62,56	175,00	9,84
165 kGy	572,52	54,99	17,39	568,11	583,96	597,11	29,00	195,40	9,61
198 kGy	586,92	35,15	11,11	558,28	594,39	606,08	47,81	107,24	5,99
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	12,24	0,28	0,09	11,99	12,26	12,47	0,48	0,74	2,27
99 kGy	14,30	0,38	0,12	14,00	14,27	14,59	0,59	1,14	2,66
132 kGy	14,61	0,22	0,07	14,51	14,58	14,78	0,27	0,68	1,51
165 kGy	14,15	0,17	0,05	14,04	14,18	14,29	0,26	0,53	1,20
198 kGy	14,12	0,48	0,15	13,85	13,92	14,24	0,39	1,64	3,41
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	16,22	0,44	0,14	15,92	16,20	16,44	0,52	1,36	2,74
99 kGy	13,72	0,49	0,16	13,35	13,76	14,08	0,73	1,48	3,57
132 kGy	13,88	0,50	0,16	13,81	14,02	14,09	0,28	1,70	3,61
165 kGy	14,13	0,37	0,12	14,02	14,14	14,21	0,18	1,48	2,62
198 kGy	13,68	0,48	0,15	13,35	13,60	14,00	0,65	1,59	3,53

Tahová zkouška HDPE pro 70 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	389,04	20,36	6,44	388,00	392,14	395,33	7,34	80,45	5,23
99 kGy	490,01	24,82	7,85	473,44	481,54	497,17	23,72	81,42	5,06
132 kGy	489,69	21,45	6,78	471,27	496,58	503,13	31,86	63,86	4,38
165 kGy	549,61	27,22	8,61	530,51	547,67	569,21	38,70	88,82	4,95
198 kGy	491,78	25,95	8,21	472,45	490,65	516,51	44,07	68,22	5,28
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	9,85	0,71	0,23	9,31	9,78	10,23	0,92	2,33	7,22
99 kGy	12,53	0,68	0,22	12,28	12,51	13,00	0,72	2,16	5,43
132 kGy	12,95	0,21	0,07	12,81	12,94	13,11	0,30	0,61	1,65
165 kGy	12,41	0,11	0,03	12,36	12,39	12,44	0,08	0,32	0,87
198 kGy	12,70	0,36	0,11	12,51	12,72	12,90	0,39	1,14	2,83
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	20,19	0,51	0,16	19,98	20,15	20,50	0,52	1,86	2,53
99 kGy	14,96	0,29	0,09	14,77	14,95	15,22	0,45	0,87	1,91
132 kGy	13,72	0,17	0,05	13,59	13,72	13,88	0,29	0,50	1,22
165 kGy	15,09	0,32	0,10	14,83	15,16	15,32	0,49	0,97	2,14
198 kGy	14,02	0,71	0,23	13,34	14,20	14,45	1,11	2,12	5,10

Tahová zkouška HDPE pro 80 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	285,04	27,77	8,78	263,73	283,20	297,24	33,50	92,65	9,74
99 kGy	382,95	39,40	12,46	368,09	379,69	397,42	29,33	148,00	10,29
132 kGy	392,50	31,65	10,01	379,09	387,66	419,70	40,62	98,18	8,06
165 kGy	386,78	31,88	10,08	372,86	385,74	409,73	36,88	11,45	8,24
198 kGy	373,05	43,37	13,71	333,85	372,01	410,29	76,44	11,92	11,62
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	8,88	0,28	0,09	8,77	8,89	8,94	0,17	1,06	3,21
99 kGy	10,11	0,15	0,015	10,04	10,17	10,18	0,15	0,50	1,45
132 kGy	10,28	0,24	0,08	10,18	10,27	10,48	0,30	0,82	2,37
165 kGy	10,24	0,29	0,09	10,03	10,24	10,38	0,35	1,01	2,85
198 kGy	10,25	0,20	0,06	10,20	10,28	10,33	0,13	0,72	1,97
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	22,37	1,25	0,40	21,13	22,98	23,22	2,10	3,13	5,59
99 kGy	16,07	0,44	0,14	15,75	16,07	16,21	0,46	1,45	2,76
132 kGy	14,98	0,64	0,20	14,51	15,00	15,25	0,73	2,12	4,25
165 kGy	10,25	0,20	0,06	10,20	10,28	10,33	0,13	0,72	1,97
198 kGy	15,54	0,70	0,22	15,24	15,63	16,03	0,79	2,43	4,52

Tahová zkouška HDPE pro 90 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	201,37	7,10	2,24	196,54	201,12	206,08	9,53	20,97	3,52
99 kGy	294,40	13,20	4,17	284,43	290,60	306,50	22,07	37,85	4,48
132 kGy	276,09	23,46	7,42	257,09	278,92	287,40	30,31	80,59	8,50
165 kGy	304,13	17,66	5,58	292,77	306,10	314,44	21,67	58,16	5,81
198 kGy	294,35	13,89	4,39	282,55	292,12	305,14	22,58	37,20	4,72
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	7,66	0,08	0,03	7,60	7,64	7,73	0,13	0,23	1,04
99 kGy	8,81	0,12	0,014	8,74	8,85	8,87	0,13	0,39	1,33
132 kGy	8,85	0,10	0,03	8,79	8,85	8,92	0,13	0,31	1,13
165 kGy	9,10	0,40	0,13	8,94	9,06	9,35	0,41	1,19	4,38
198 kGy	8,80	0,07	0,02	8,75	8,79	8,86	0,11	0,21	0,77
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	38,20	1,27	0,40	37,43	38,01	39,00	1,57	4,15	3,32
99 kGy	39,59	1,02	0,32	38,82	39,72	40,32	1,50	3,19	2,58
132 kGy	40,91	0,16	0,05	40,82	40,93	41,02	0,20	0,56	0,40
165 kGy	39,82	0,98	0,31	38,99	39,87	40,46	1,47	2,98	2,47
198 kGy	39,10	0,64	0,20	38,56	39,02	39,62	1,06	1,75	1,65

Tahová zkouška HDPE pro 100 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	161,76	14,46	4,57	152,56	155,63	171,23	18,67	44,59	8,94
99 kGy	251,60	37,34	11,81	217,37	262,29	282,61	65,25	106,43	14,84
132 kGy	231,81	18,58	5,88	216,71	224,24	247,52	30,81	46,54	8,01
165 kGy	230,39	23,38	7,39	214,28	232,09	239,25	24,97	79,77	10,15
198 kGy	211,98	28,64	9,06	201,92	212,36	237,72	35,80	80,34	13,51
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	6,75	0,13	0,04	6,70	6,75	6,76	0,06	0,44	1,86
99 kGy	7,67	0,27	0,09	7,57	7,73	7,81	0,24	1,00	3,52
132 kGy	7,57	0,23	0,07	7,41	7,63	7,74	0,33	0,68	3,09
165 kGy	7,98	0,17	0,05	7,84	8,00	8,05	0,21	0,53	2,09
198 kGy	8,12	0,18	0,06	8,05	8,16	8,24	0,18	0,56	2,22
	$\epsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	40,16	0,58	0,18	39,80	40,10	40,39	0,59	1,75	1,46
99 kGy	41,01	1,25	0,39	40,15	40,93	41,40	1,25	4,33	3,04
132 kGy	39,75	2,29	0,72	39,30	39,58	40,25	0,95	9,51	5,75
165 kGy	40,63	1,83	0,58	39,61	40,27	40,57	0,95	6,04	4,51
198 kGy	40,17	1,29	0,41	39,60	40,12	40,45	0,85	4,96	3,22

Tahová zkouška LDPE při pokojové teplotě 23 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	212,53	9,15	2,89	205,47	210,02	222,06	16,60	24,60	4,31
99 kGy	285,22	12,94	4,09	278,10	287,25	291,82	13,72	43,61	4,54
132 kGy	297,79	9,20	2,91	298,73	300,04	301,28	2,54	33,22	3,09
165 kGy	274,68	18,44	5,83	258,68	272,98	291,05	32,37	51,92	6,71
198 kGy	296,17	23,21	7,34	287,64	297,75	306,69	19,05	84,25	7,84
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	9,21	0,05	0,01	9,19	9,21	9,24	0,05	0,14	0,51
99 kGy	10,37	0,05	0,02	10,34	10,37	10,42	0,08	0,15	0,50
132 kGy	10,35	0,28	0,09	10,14	10,39	10,58	0,44	0,81	2,69
165 kGy	10,55	0,07	0,02	10,54	10,57	10,59	0,05	0,22	0,63
198 kGy	10,80	0,30	0,10	10,53	10,68	11,05	0,52	0,76	2,81
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	72,19	0,32	0,10	71,96	72,10	72,46	0,50	0,88	0,44
99 kGy	57,93	1,95	0,62	56,01	58,06	59,63	3,62	5,01	3,37
132 kGy	56,58	1,92	0,61	56,11	56,93	57,97	1,86	6,36	3,38
165 kGy	57,11	0,56	0,18	56,64	57,16	57,45	0,81	1,87	0,99
198 kGy	56,07	1,61	0,51	55,29	56,20	57,31	2,02	4,77	2,87

Tahová zkouška LDPE pro 30 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	149,90	1,85	0,59	148,54	149,65	150,47	1,93	6,16	1,23
99 kGy	233,32	2,65	0,84	231,44	233,01	234,75	3,31	8,19	1,13
132 kGy	220,24	3,05	0,97	219,54	220,36	221,77	2,24	11,68	1,39
165 kGy	237,13	6,51	2,06	232,05	236,76	239,05	7,00	19,62	2,75
198 kGy	254,77	11,00	3,48	245,75	253,45	265,20	19,46	29,30	4,32
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	8,76	0,07	0,02	8,71	8,76	8,78	0,07	0,22	0,83
99 kGy	9,92	0,03	0,01	9,89	9,91	9,94	0,05	0,08	0,29
132 kGy	9,90	0,01	0,00	9,89	9,90	9,90	0,01	0,04	0,11
165 kGy	10,10	0,03	0,01	10,08	10,09	10,12	0,04	0,10	0,34
198 kGy	9,96	0,09	0,03	9,95	9,97	9,99	0,05	0,29	0,92
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	73,88	0,50	0,16	73,50	74,09	74,23	0,73	1,50	0,68
99 kGy	59,47	1,69	0,53	58,21	59,11	60,66	2,45	4,82	2,83
132 kGy	57,16	1,35	0,43	56,32	57,59	58,08	1,76	4,27	2,36
165 kGy	55,76	0,58	0,18	55,22	56,08	56,21	0,99	1,49	1,04
198 kGy	57,87	0,24	0,07	57,70	57,96	58,00	0,30	0,78	0,41

Tahová zkouška LDPE pro 40 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	120,72	3,44	1,09	117,78	121,54	123,02	5,25	11,11	2,85
99 kGy	169,50	6,82	2,16	165,21	168,48	172,29	7,08	21,69	4,03
132 kGy	171,99	10,09	3,19	165,58	171,74	178,48	12,90	29,39	5,87
165 kGy	186,63	25,24	7,98	170,42	178,15	198,97	28,56	78,63	13,53
198 kGy	169,10	6,38	2,02	163,87	170,23	173,74	9,88	18,29	3,77
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	7,56	0,12	0,04	7,49	7,58	7,65	0,16	0,38	1,55
99 kGy	8,67	0,07	0,02	8,62	8,66	8,72	0,09	0,20	0,78
132 kGy	8,59	0,05	0,02	8,57	8,60	8,62	0,05	0,17	0,57
165 kGy	8,69	0,21	0,07	8,61	8,70	8,75	0,14	0,77	2,40
198 kGy	8,58	0,14	0,05	8,46	8,62	8,67	0,21	0,43	1,66
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	78,26	1,35	0,43	77,70	78,21	79,14	1,44	4,97	1,72
99 kGy	61,65	3,80	1,20	60,22	61,49	65,20	4,99	11,45	6,16
132 kGy	64,24	2,35	0,74	63,23	64,97	65,15	1,92	8,95	3,66
165 kGy	60,69	1,32	0,42	59,75	60,31	61,75	1,99	4,10	2,17
198 kGy	60,01	0,27	0,09	59,86	60,03	60,10	0,23	1,03	0,46

Tahová zkouška LDPE pro 50 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	86,49	5,79	1,83	80,93	88,19	88,89	7,96	16,26	6,69
99 kGy	130,15	3,86	1,22	127,27	130,90	133,44	6,17	11,67	2,96
132 kGy	140,51	8,51	2,69	137,82	140,07	146,20	8,38	28,42	6,05
165 kGy	139,51	8,45	2,67	134,25	138,26	146,11	11,86	28,42	6,06
198 kGy	140,91	5,57	1,76	139,03	140,34	142,73	3,70	21,48	3,95
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	6,78	0,16	0,05	6,64	6,79	6,83	0,19	0,50	2,33
99 kGy	7,94	0,16	0,05	7,86	7,98	8,03	0,17	0,48	2,05
132 kGy	8,02	0,13	0,04	7,94	8,02	8,14	0,20	0,39	1,67
165 kGy	7,94	0,10	0,03	7,86	7,94	8,01	0,14	0,32	1,30
198 kGy	7,91	0,04	0,01	7,88	7,90	7,94	0,06	0,14	0,55
	$\epsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	71,35	2,83	0,89	69,36	70,70	73,36	4,01	8,69	3,96
99 kGy	64,57	3,19	1,01	63,80	64,19	65,90	2,10	10,36	4,94
132 kGy	66,97	5,60	1,77	61,76	67,76	70,91	9,15	16,80	8,37
165 kGy	74,65	6,57	2,08	72,58	75,22	78,51	5,93	20,63	8,80
198 kGy	72,87	5,69	1,80	69,93	72,01	76,04	6,10	19,30	7,81

Tahová zkouška LDPE pro 60 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	73,11	5,35	1,69	68,74	72,67	77,18	8,44	15,63	7,32
99 kGy	87,43	6,22	1,97	82,33	86,40	91,12	8,79	18,30	7,12
132 kGy	102,00	9,90	3,13	94,05	107,19	108,17	14,12	29,23	9,70
165 kGy	90,09	9,77	3,09	81,10	90,81	95,66	14,55	29,07	10,85
198 kGy	91,09	6,39	2,02	85,56	93,42	94,80	9,25	17,62	7,01
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	6,06	0,10	0,03	5,98	6,05	6,14	0,16	0,30	1,68
99 kGy	6,99	0,40	0,13	6,62	7,10	7,33	0,71	1,02	5,66
132 kGy	6,85	0,22	0,07	6,67	6,89	7,04	0,37	0,59	3,24
165 kGy	6,81	0,15	0,05	6,75	6,81	6,88	0,12	0,54	2,20
198 kGy	6,74	0,18	0,06	6,58	6,79	6,87	0,28	0,48	2,67
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	69,91	3,95	1,25	69,60	71,57	72,26	2,66	12,87	5,65
99 kGy	71,75	3,82	1,21	69,89	70,10	74,98	5,09	11,36	5,33
132 kGy	74,53	6,61	2,09	69,99	74,43	79,10	9,11	17,59	8,86
165 kGy	84,50	11,81	3,74	74,69	81,38	91,85	17,15	37,06	13,98
198 kGy	101,16	17,10	5,41	93,65	101,58	111,66	18,01	57,04	16,90

Tahová zkouška LDPE pro 70 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	54,69	5,48	1,73	50,10	56,08	58,40	8,29	16,96	10,02
99 kGy	67,79	3,38	1,07	65,18	67,94	69,13	3,95	11,46	4,98
132 kGy	81,03	4,44	1,41	78,18	80,24	82,61	4,43	14,96	5,48
165 kGy	76,31	6,60	2,09	71,91	74,84	81,80	9,90	20,47	8,65
198 kGy	73,41	3,22	1,02	71,66	73,31	75,58	3,92	10,18	4,39
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	5,26	0,25	0,08	5,13	5,20	5,31	0,18	0,83	4,80
99 kGy	6,20	0,02	0,01	6,19	6,20	6,21	0,01	0,07	0,31
132 kGy	6,31	0,16	0,05	6,23	6,34	6,36	0,13	0,57	2,52
165 kGy	6,12	0,21	0,07	5,92	6,09	6,27	0,34	0,56	3,49
198 kGy	6,20	0,19	0,06	6,07	6,25	6,34	0,27	0,57	3,10
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	69,13	1,34	0,42	67,99	68,74	70,09	2,10	3,62	1,94
99 kGy	73,00	1,33	0,42	72,38	72,91	73,67	1,30	4,79	1,82
132 kGy	72,48	1,96	0,62	70,99	72,03	73,49	2,50	6,40	2,70
165 kGy	74,51	3,74	1,18	72,12	74,06	75,73	3,61	12,93	5,02
198 kGy	87,62	5,38	1,70	83,48	86,41	90,46	6,98	16,32	6,14

Tahová zkouška LDPE pro 80 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	47,16	6,82	2,16	41,69	46,84	49,25	7,56	21,43	14,46
99 kGy	53,67	3,53	1,12	51,95	54,67	56,09	4,13	10,99	6,57
132 kGy	50,12	7,49	2,37	45,58	51,62	56,54	10,96	21,46	14,94
165 kGy	58,31	5,66	1,79	55,25	57,70	62,99	7,74	16,23	9,71
198 kGy	52,03	3,89	1,23	50,87	52,37	54,67	3,80	11,22	7,48
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	4,90	0,14	0,04	4,87	4,92	4,98	0,12	0,44	2,76
99 kGy	5,33	0,21	0,06	5,21	5,27	5,43	0,22	0,73	3,85
132 kGy	5,13	0,13	0,04	5,00	5,15	5,21	0,20	0,36	2,45
165 kGy	5,26	0,15	0,05	5,25	5,28	5,34	0,09	0,54	2,90
198 kGy	5,17	0,15	0,05	5,09	5,13	5,23	0,15	0,46	2,89
	$\epsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	76,57	2,53	0,80	75,01	77,06	78,54	3,52	7,25	3,31
99 kGy	79,83	3,34	1,06	77,46	79,46	81,55	4,09	9,99	4,18
132 kGy	76,11	3,67	1,16	73,27	77,30	79,08	5,81	10,50	4,82
165 kGy	81,70	3,15	1,00	79,25	81,01	84,67	5,42	8,42	3,86
198 kGy	84,96	3,03	0,96	84,70	84,94	87,16	2,45	8,82	3,57

Tahová zkouška LDPE pro 90 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	26,63	5,33	1,68	22,74	26,19	30,99	8,25	16,33	20,01
99 kGy	39,14	2,63	0,83	37,29	39,19	39,83	2,54	8,84	6,72
132 kGy	41,16	3,30	1,04	39,77	41,37	42,32	2,55	12,74	8,02
165 kGy	40,79	2,88	0,91	39,53	41,29	42,36	2,83	10,26	7,06
198 kGy	43,57	2,58	0,82	41,54	43,63	45,36	3,82	7,67	5,93
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	3,73	0,08	0,03	3,67	3,70	3,81	0,14	0,20	2,19
99 kGy	4,25	0,19	0,06	4,17	4,21	4,38	0,20	0,56	4,42
132 kGy	4,54	0,21	0,07	4,36	4,57	4,67	0,30	0,73	4,71
165 kGy	4,49	0,08	0,02	4,45	4,47	4,54	0,08	0,25	1,75
198 kGy	4,37	0,19	0,06	4,24	4,30	4,54	0,30	0,52	4,28
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	57,53	2,84	0,90	55,64	57,60	59,20	3,56	9,08	4,94
99 kGy	98,94	5,49	1,74	95,88	99,26	101,64	5,76	18,52	5,55
132 kGy	109,08	13,12	4,15	108,03	113,55	114,62	6,59	43,33	12,02
165 kGy	124,79	10,52	3,33	116,10	122,93	128,16	12,07	32,75	8,43
198 kGy	117,98	5,93	1,87	113,31	116,99	122,46	9,15	17,48	5,02

Tahová zkouška LDPE pro 100 °C

	E [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	14,36	2,70	0,85	12,57	14,57	15,44	2,86	8,86	18,80
99 kGy	23,01	1,17	0,37	22,07	23,31	23,91	1,85	3,56	5,08
132 kGy	23,84	2,83	0,90	21,60	24,62	26,04	4,45	8,39	11,89
165 kGy	19,96	3,59	1,13	16,77	21,24	21,81	5,03	11,37	17,97
198 kGy	26,43	3,38	1,07	25,68	27,43	28,33	2,65	10,12	12,80
	σ_M [MPa]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	1,71	0,18	0,06	1,61	1,69	1,80	0,18	0,67	10,52
99 kGy	3,27	0,08	0,03	3,20	3,27	3,35	0,15	0,23	2,53
132 kGy	3,16	0,16	0,05	3,05	3,13	3,25	0,21	0,51	5,07
165 kGy	3,17	0,05	0,02	3,16	3,18	3,19	0,03	0,17	1,64
198 kGy	3,65	0,13	0,04	3,54	3,63	3,75	0,21	0,36	3,62
	$\varepsilon_{\sigma M}$ [%]								
Dávka	\bar{x}	s	σ	Q ₁	Medián	Q ₃	IQR	V	V _x
0 kGy	31,82	4,80	1,52	28,20	30,55	34,53	6,33	15,20	15,09
99 kGy	191,71	18,27	5,78	178,49	187,84	208,38	29,89	52,29	9,53
132 kGy	178,10	28,51	9,02	158,83	176,55	187,28	28,45	96,01	15,98
165 kGy	203,99	29,10	9,20	181,97	189,81	221,18	39,21	75,51	14,27
198 kGy	183,65	19,16	6,06	167,76	178,98	196,09	28,33	52,82	10,44

PŘÍLOHA P2: MATERIÁLOVÝ LIST HDPE

Technical Information



DOW™ HDPE 25055E High Density Polyethylene Resin

Overview POLYETHYLENE HIGH DENSITY 25055E High Density Polyethylene Resin is a very narrow molecular weight distribution resin, developed to impart excellent mechanical properties, high gloss and high surface finishing to injection moulded parts, while providing easy processing.

Applications:

- Housewares
- Food containers
- Toys

Complies with:

- EU, No 10/2011
- U.S. FDA 21 CFR 177.1520
- Canadian HPFB (No Objection)

Consult the regulations for complete details.

Additive • Antiblock: No • Slip: No • Processing Aid: No

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.955 g/cm ³	0.955 g/cm ³	ASTM D792
Melt Index			ISO 1133
190°C/2.16 kg	25 g/10 min	25 g/10 min	
190°C/5.0 kg	62 g/10 min	62 g/10 min	
Spiral Flow ^{1,2}	42.9 in	109 cm	Dow Method
Molding Shrinkage - Flow	0.021 in/in	2.1 %	ASTM D955
Environmental Stress-Cracking Resistance			ASTM D1693
100% AntaroX CO-630, Compression Molded	0.700 hr	0.700 hr	
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Strength			ASTM D638
Yield, Compression Molded	3630 psi	25.0 MPa	
Break, Compression Molded	3920 psi	27.0 MPa	
Tensile Elongation			ASTM D638
Break, Compression Molded	200 %	200 %	
Flexural Modulus - 2% Secant (Compression Molded)	126000 psi	870 MPa	ASTM D790
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Impact Strength (Compression Molded)	26.2 ft-lb/in ²	55.0 kJ/m ²	ASTM D1822
Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Shore Hardness (Shore D, Compression Molded)	65	65	ISO 868
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Vicat Softening Temperature	255 °F	124 °C	ISO 306/A

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

¹ Melt Temperature: 482°F (250°C)

² 2 seconds injection

Product Stewardship

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products – from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

Medical Applications Policy

NOTICE REGARDING MEDICAL APPLICATION RESTRICTIONS: Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- long-term or permanent contact with internal bodily fluids or tissues. "Long-term" is contact which exceeds 72 continuous hours;
- use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved ("cardiac prosthetic devices" include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems, and ventricular bypass-assisted devices);
- use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Dow requests that customers considering use of Dow products in medical applications notify Dow so that appropriate assessments may be conducted. Dow does not endorse or claim suitability of its products for specific medical applications. It is the responsibility of the medical device or pharmaceutical manufacturer to determine that the Dow product is safe, lawful, and technically suitable for the intended use. **DOW MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE SUITABILITY OF ANY DOW PRODUCT FOR USE IN MEDICAL APPLICATIONS.**

Disclaimer

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

NOTICE: If products are described as "experimental" or "developmental": (1) product specifications may not be fully determined; (2) analysis of hazards and caution in handling and use are required; (3) there is greater potential for Dow to change specifications and/or discontinue production; and (4) although Dow may from time to time provide samples of such products, Dow is not obligated to supply or otherwise commercialize such products for any use or application whatsoever.

Additional Information

North America		Europe/Middle East	+800-3694-6367
U.S. & Canada:	1-800-441-4369		+31-11567-2626
	1-989-832-1426	Italy:	+800-783-825
Mexico:	+1-800-441-4369		
Latin America		South Africa	+800-99-5078
Argentina:	+54-11-4319-0100		
Brazil:	+55-11-5188-9000		
Colombia:	+57-1-219-6000	Asia Pacific	+800-7776-7776
Mexico:	+52-55-5201-4700		+603-7965-5392

www.dowplastics.com

This document is intended for use within Asia Pacific, Europe

Published: 2000-11-30

© 2016 The Dow Chemical Company



PŘÍLOHA P3: MATERIÁLOVÝ LIST LDPE

Technical Information



DOW™ LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin

Overview LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin can be readily processed using conventional injection moulding techniques utilising melt temperatures between 140 and 250°C, a mould temperature between 10 and 50°C, and injection pressure between 50 and 150 MPa.

When properly injection moulded, 780E Low Density Polyethylene Resin exhibit:

- Excellent flow
- Good rigidity
- Good surface gloss

Note: LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin should comply with FDA regulation 177.1520 and with most European food contact regulations when used unmodified and processed according to good manufacturing practices for contact applications. Please, contact your nearest Dow office for food contact compliance statements. The purchaser remains responsible for determining whether the use complies with all relevant regulations.

Applications:

- Housewares.
- Toys & leisures.
- Containers.
- Compounding.

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.923 g/cm ³	0.923 g/cm ³	ASTM D792
Melt Index (190°C/2.16 kg)	20 g/10 min	20 g/10 min	ISO 1133
Spiral Flow			Dow Method
...1	1.93 in	4.90 cm	
...2	3.35 in	8.50 cm	
Molding Shrinkage			ASTM D955
Flow	0.023 in/in	2.3 %	
Across Flow	0.015 in/in	1.5 %	
Environmental Stress-Cracking Resistance			ASTM D1693
Compression Molded	1.40 hr	1.40 hr	
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus - 2% Secant (Compression Molded)	23800 psi	164 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress			ISO 527-2
Yield, Compression Molded	1190 psi	8.20 MPa	
Break, Compression Molded	1520 psi	10.5 MPa	
Tensile Strain (Break, Compression Molded)	50 %	50 %	ISO 527-2
Films	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Elongation			ASTM D882
MD : Break, 7.9 mil (200 µm)	700 %	700 %	
TD : Break, 7.9 mil (200 µm)	750 %	750 %	
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Impact Strength	136 ft-lb/in ²	286 kJ/m ²	ISO 8256
Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Shore Hardness (Shore D)	49	49	ISO 868
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Vicat Softening Temperature	199 °F	93.0 °C	ASTM D1525

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

¹ Injection Pressure: 8.70E+3 psi (600 bar)

² Injection Pressure: 1.74E+4 psi (1.20E+3 bar)

Product Stewardship

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products — from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

Medical Applications Policy

NOTICE REGARDING MEDICAL APPLICATION RESTRICTIONS: Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- a. long-term or permanent contact with internal bodily fluids or tissues. "Long-term" is contact which exceeds 72 continuous hours;
- b. use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved ("cardiac prosthetic devices" include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems, and ventricular bypass-assisted devices);
- c. use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- d. use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Dow requests that customers considering use of Dow products in medical applications notify Dow so that appropriate assessments may be conducted. Dow does not endorse or claim suitability of its products for specific medical applications. It is the responsibility of the medical device or pharmaceutical manufacturer to determine that the Dow product is safe, lawful, and technically suitable for the intended use. **DOW MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE SUITABILITY OF ANY DOW PRODUCT FOR USE IN MEDICAL APPLICATIONS.**

Disclaimer

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

NOTICE: If products are described as "experimental" or "developmental": (1) product specifications may not be fully determined; (2) analysis of hazards and caution in handling and use are required; (3) there is greater potential for Dow to change specifications and/or discontinue production; and (4) although Dow may from time to time provide samples of such products, Dow is not obligated to supply or otherwise commercialize such products for any use or application whatsoever.

Additional Information

North America		Europe/Middle East	+800-3694-6367
U.S. & Canada:	1-800-441-4369		+31-11567-2626
	1-989-832-1426	Italy:	+800-783-825
Mexico:	+1-800-441-4369		
Latin America		South Africa	+800-99-5078
Argentina:	+54-11-4319-0100		
Brazil:	+55-11-5188-9000		
Colombia:	+57-1-219-6000	Asia Pacific	+800-7776-7776
Mexico:	+52-55-5201-4700		+603-7965-5392

www.dowplastics.com

This document is intended for use within Asia Pacific, Europe

Published: 2005-05-05

© 2016 The Dow Chemical Company

