

Modifikace polymerních materiálů ionizujícím beta zářením za účelem změny jejich vlastností

Bc. Petr Šmach

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Šmach**

Osobní číslo: **T12453**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modifikace polymerních materiálů ionizujícím beta zářením za účelem změny jejich vlastností**

Zásady pro vypracování:


1. Vypracování literární rešerže na dané téma
2. Příprava zkušebních těles vstřikováním
3. Ozařování zkušebních těles
4. Provedení mechanických zkoušek
5. Vyhodnocení naměřených dat



Rozsah diplomové práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Holík**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Přijmení a jméno: PETR ŠMACH

Obor: KT Z

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 9.5.2014

..... Šmach

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce zkoumá vliv ionizačního beta záření na vybrané mechanické vlastnosti LDPE a HDPE v širokém rozsahu teplot měření. V teoretické části jsou popsány vlastnosti vybraných polymerů, princip radiačního síťování a princip tahové zkoušky. Praktická část se zabývá popisem experimentů, samotným měřením zkoumaných vlastností a statistickým vyhodnocením naměřených dat.

Klíčová slova: polyetylen, ionizační záření, síťování, tahová zkouška, modul pružnosti, mez pevnosti

ABSTRACT

This diploma thesis examines the influence of ionizing beta radiation on the mechanical properties of LDPE and HDPE in a wide temperature range of measurement. The theoretical part describes the properties of selected polymers, the principle of radiation crosslinking and also the principle of the tensile test. The practical part describes the experiments, own measurement of mechanical properties and statistical evaluation of measured data.

Keywords: polyethylene, ionizing radiation, cross linking, tensile test, modulus of elasticity, breaking strength

V této části bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Zdeňku Holíkovi, Ph.D. za odborné rady a cenné připomínky při tvorbě této diplomové práce a také panu Ing. Vladimíru Šumberovi za technickou asistenci při vstřikování zkušebních vzorků. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat své rodině za velkou podporu po celou dobu mého studia.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ	12
1.1 HISTORIE POLYMERŮ.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	13
1.2.1 Struktura polymerů.....	13
1.3 VLASTNOSTI POLYMERŮ.....	14
2 POLYETYLEN (PE)	16
2.1 ROZDĚLENÍ POLYETYLENU	16
2.2 VLASTNOSTI POLYETYLENU	17
2.3 HDPE (LINEÁRNÍ, VYSOKO-HUSTOTNÍ POLYETYLEN)	18
2.4 LDPE (ROZVĚTVENÝ, NÍZKO-HUSTOTNÍ POLYETYLEN).....	18
3 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ	19
3.1 TVORBA SÍŤE	19
3.2 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ.....	20
3.2.1 Měrné jednotky ionizačního záření	21
3.2.2 Oblasti využití ionizačního záření.....	22
3.2.3 Záření alfa	24
3.2.4 Záření beta.....	24
3.2.5 Záření gama.....	25
3.2.6 Porovnání jednotlivých druhů záření	25
3.3 RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ	26
3.3.1 Síťování ionizujícím beta zářením	27
3.3.2 Síťování ionizujícím gama zářením	29
3.3.3 Modifikace vlastností polymerů radiačním síťováním	30
4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	31
4.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA	32
4.1.1 Zkušební tělesa.....	32
4.1.2 Průběh tahové zkoušky	33
4.1.3 Tahový diagram	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
5 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	38
6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	39
6.1 MATERIÁL ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	39
6.2 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	40
6.3 OZAŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	41
7 TAHOVÁ ZKOUŠKA	43
8 NAMĚŘENÉ HODNOTY	44
8.1 LDPE – NEOZÁŘENÝ	45
8.1.1 Modul pružnosti v tahu	45
8.1.2 Mez pevnosti v tahu	46
8.1.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.....	47

8.2	LDPE – OZÁŘENÝ 132 KGY	48
8.2.1	Modul pružnosti	48
8.2.2	Mez pevnosti v tahu	49
8.2.3	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.....	50
8.3	HDPE – NEOZÁŘENÝ	51
8.3.1	Modul pružnosti v tahu	51
8.3.2	Mez pevnosti v tahu	52
8.3.3	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.....	53
8.4	HDPE – OZÁŘENÝ 132 KGY.....	54
8.4.1	Modul pružnosti v tahu	54
8.4.2	Mez pevnosti v tahu	55
8.4.3	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.....	56
9	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	57
9.1	REGRESNÍ ANALÝZA.....	57
9.1.1	LDPE – neozářený	57
9.1.2	HDPE - neozářený.....	58
9.1.3	HDPE – ozářený 132 kGy.....	60
9.2	SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ NEOZÁŘENÉHO A OZÁŘENÉHO LDPE	63
9.2.1	Modul pružnosti v tahu	63
9.2.2	Mez pevnosti v tahu	64
9.2.3	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.....	65
9.3	SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ NEOZÁŘENÉHO A OZÁŘENÉHO HDPE.....	66
9.3.1	Modul pružnosti v tahu	66
9.3.2	Mez pevnosti v tahu	67
9.3.3	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.....	68
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
	SEZNAM TABULEK.....	77

ÚVOD

S postupem doby se objevují stále větší nároky na kvalitu a ekonomičnost vyráběných produktů ve všech oblastech průmyslové výroby. Těmto nárokům nejlépe vyhovují polymerní materiály, které mají oproti klasickým materiálům řadu nesporných výhod. Výhody polymerních materiálů spočívají především ve snadném zpracování, v odlišných vlastnostech od klasických materiálů a v neposlední řadě také v dostupnosti a ceně výchozích surovin.

Jedním ze způsobů jak propůjčit levnějším plastům mechanické, tepelné a chemické vlastnosti drahých, vysoce odolných konstrukčních polymerů je radiační síťování. Vlivem ionizačního záření dochází k propojování makromolekulárních řetězců za vzniku prostorové sítě. Pro síťování se používá několik druhů ionizačního záření. Každé z nich se vyznačuje specifickými vlastnostmi. Mezi nejpoužívanější řadíme elektronové beta záření, jehož zdrojem je urychlovač elektronů a fotonové gama záření, které je vysílané atomovými jádry při radioaktivních přeměnách. Velkou výhodou radiačního záření je fakt, že k síťování dochází až po zpracovatelském procesu a také to, že probíhá za normálního tlaku a teploty, bez zbytečného namáhání výrobků. Vedle síťování se radiační záření hojně využívá také pro své sterilizační účinky.

V praktické části budeme zkoumat především vliv ionizačního beta záření na mechanické vlastnosti vybraných polymerů v širokém rozsahu teplot. Nejvíce nás bude zajímat modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a také poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 CHARAKTERISTIKA POLYMERŮ

Polymery nazýváme makromolekulárními látkami. Jejich molekuly se vyznačují svou velikostí a vysokou relativní hmotností. Makromolekuly jsou molekulové systémy, které se skládají z velkého počtu atomů (uhlík, vodík, kyslík, dusík aj.) vázaných chemickými vazbami do dlouhých řetězců. Tyto řetězce tvoří pravidelně se opakující části, které nazýváme stavební nebo monomerní jednotky (mery). Počet stavebních jednotek udává polymerační stupeň n ; mívá hodnotu 10 až 10^6 . Sloučeniny s nízkým polymeračním stupněm ($n < 10$) se nazývají oligomery, s vyšším polymeračním stupněm ($n > 10$) jsou polymery. Polymery biologického původu se nazývají biopolymery nebo biomakromolekulární látky. [1][7]

1.1 Historie polymerů

Člověk se již dlouho snaží vyvíjet umělé materiály, které by vykazovaly lepší vlastnosti než látky, které se běžně vyskytují v přírodě. Umělé hmoty (plasty) byly vyvinuty již v 19. století a dnešní život si bez nich umíme jen těžko představit. Tyto materiály jsou používány takřka ve všech oborech lidské činnosti.

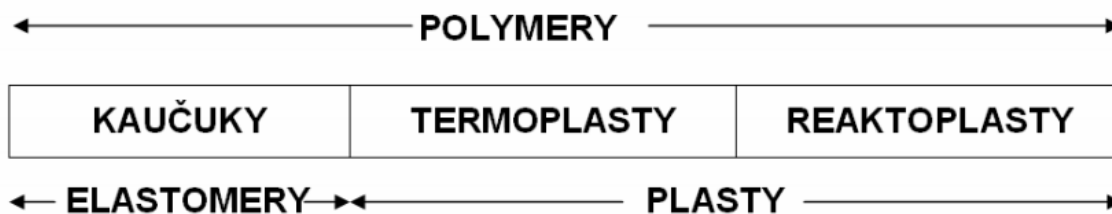
První plast - nitrát celulózy objevil Alexandr Parkesa. Poprvé ho představil veřejnosti na velké výstavě v Londýně roku 1862. Z tohoto materiálu byly vyrobeny biliárové koule a podešve bot. John W. Hyatt ještě vylepšil vlastnosti nitrátu celulózy tak, že ho smíchal s kafrem. Tento nový produkt nazval celuloid a používal se k výrobě rukojetí, hřebenů nebo knoflíků.

Nové polymerní materiály představovaly modifikované přírodní látky, z nichž asi nejznámější je viskózní vlákno. Tato látka je vlastně polo-přírodní polymer, který se vyrábí z celulózy. Je používán v textilním průmyslu a známe ho také pod názvem celofán neboli transparentní film. Vynálezcem úplně prvního čistě syntetického plastu byl Leo Baekeland v roce 1909 v Americe. Tento plast zvaný bakelit se vyráběl z fenolu a formaldehydu a vyznačoval se vysokou lehkostí, pevností a tepelnou odolností. Dlouhá léta se využíval v elektrotechnice a to především pro své dobré izolační vlastnosti.

Vývoj polymerních látek pokračoval ve 20. a 30. letech 20. století a hojně se využívaly během 2. Světové války. Na začátku 50. let si plasty našly cestu také do našich domácností. Od té doby se jejich výroba a spotřeba několikanásobně zvýšila. [2]

1.2 Rozdělení polymerů

Polymery dělíme na dvě základní skupiny, a to na elastomery a plasty. Plasty ještě dále rozdělujeme na termoplasty a reaktoplasty.



Obr. 1. Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [9]

Elastomery - jsou vysoce elastické polymery, které jsou při mechanickém zatížení schopné velké deformace. Tato deformace je převážně pružná - materiál se po odlehčení vrací do původního tvaru. Zástupci elastomerů jsou např.: styrenbutadienový kaučuk nebo izoprenový kaučuk.[3] [7]

Termoplasty – jedná se o polymerní materiály, které za zvýšených teplot měknou a přecházejí do plastického stavu. Za těchto podmínek jsou tvarovatelné. Změna z plastického do tuhého stavu je vratná. Zástupci termoplastů jsou polyetylen, polyvinylchlorid, polypropylen, polystyren aj.

Reaktoplasty – na rozdíl od termoplastů dochází při zahřátí těchto materiálů vlivem chemické reakce k jejich vytvrzení a změně struktury (zesíťování). Tato změna je nevratná. Výsledkem je tuhý a tvrdý materiál, který při opětovném zahřátí neměkne ani se netaví. Mezi reaktoplasty patří např.: epoxidové pryskyřice, polyesterové pryskyřice, fenolformaldehydové pryskyřice (bakelit).[3]

1.2.1 Struktura polymerů

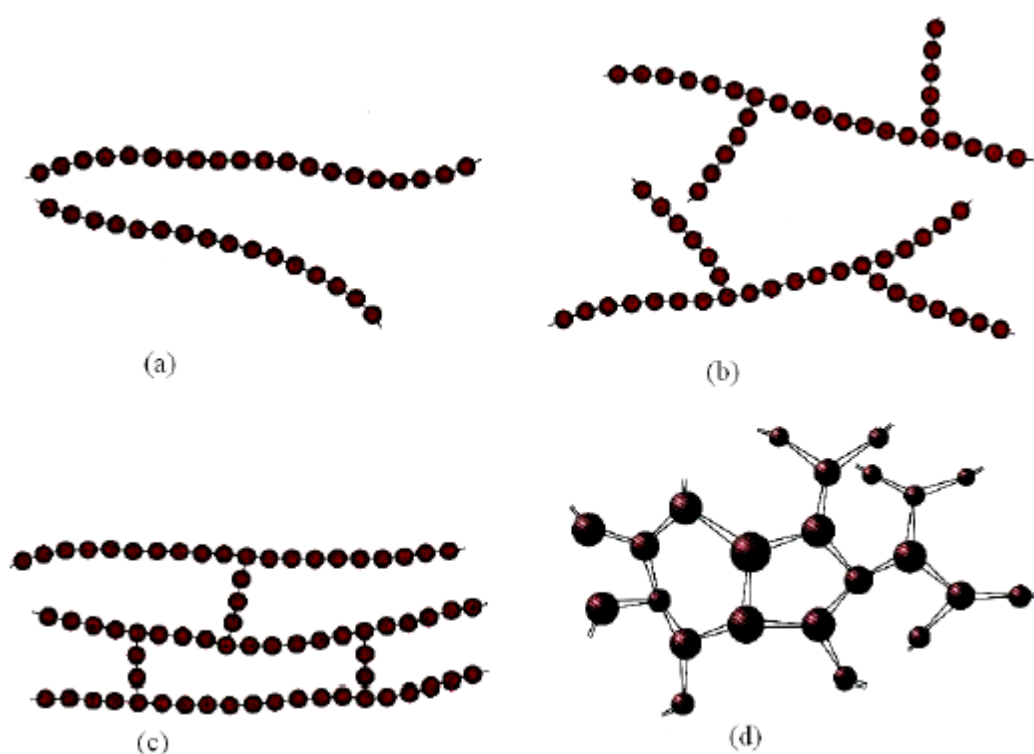
Struktura polymerů závisí na seřazení makromolekul, které jsou tvořeny opakujícími se monomery.

Jestliže jsou jednotlivé monomery seřazeny za sebou, tudíž tvoří jednoduchý řetězec, jedná se o lineární polymery. Mezi těmito pružnými řetězci působí slabé Van der Waalsovy vazby.

Makromolekula rozvětvených polymerů obsahuje hlavní řetězec, ze kterého vystupují postranní větve. Celá struktura rozvětveného polymeru má nižší hustotu než lineární polymer.

Jedná-li se o zesíťované polymery, poznáme podle toho, že sousední řetězce těchto polymerů jsou mezi sebou propojeny články, které jsou vázány pomocí silné kovalentní vazby.

Trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby, vytvářejí trojrozměrnou síť. Tyto polymery označujeme jako prostorově zesíťované. [10]



Obr. 2. Struktura polymerů: a) lineární; b) rozvětvená; c) zesíťovaná; d) prostorově zesíťovaná [10]

1.3 Vlastnosti polymerů

Výhody polymerních materiálů a příčiny jejich velmi rychlého a všestranného rozšíření jsou následující:

- polymery mohou jednak nahrazovat klasické materiály (kovy, keramiku, sklo, dřevo, kůži, vlnu, přírodní kaučuk aj.), jednak mohou mít zcela odlišné vlastnosti

od těchto klasických surovin, tím pádem umožňují úplně nové aplikace a nová řešení materiálových problémů,

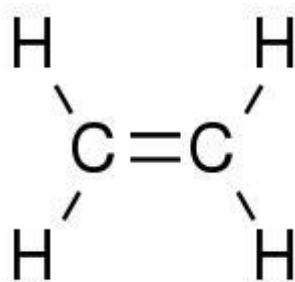
- řada polymerů se vyrábí z relativně levných a dostupných surovin, a může tedy nahradit nedostatkové a ekonomicky náročné materiály,
- polymery můžeme velmi snadno zpracovávat tvářením z taveniny nebo roztoku, a proto umožňují rychlou a relativně levnou výrobu předmětů hromadné potřeby,
- polymery mají nízkou hustotu, často dobré elektroizolační vlastnosti a relativně vysokou odolnost proti korozi.[4]

Pokud jsme zmínili výhody polymerních materiálů, nesmíme ovšem zapomenout ani na jejich několik zásadních nedostatků, mezi které patří především:

- použitelnost je omezena teplotou a tvarovou neformovatelností,
- vznikají potíže s regenerací odpadu,
- polymery mají sklon k elektrostatickému nabíjení,
- oprava výrobků bývá velmi obtížná.[4]

2 POLYETYLEN (PE)

Polyetylen řadíme do skupiny polyolefinů. Jedná o nejrozšířenější skupinu syntetických polymerů, díky relativně levné výrobě a snadné dostupnosti surovin. Pod pojmem polyetyleny rozumíme homopolymery a kopolymery etylenu, které obsahují ve svých molekulách jednu dvojnou vazbu mezi atomy uhlíku. [7] [12]

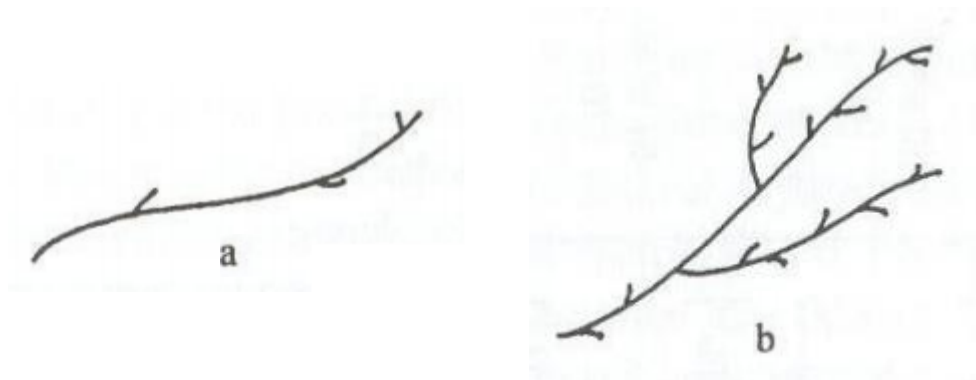


Obr. 3. Strukturální vzorec etylenu C_2H_4 [9]

2.1 Rozdělení polyetyleny

Polyetylenů máme několik typů. Rozdělujeme je podle rozvětvení makromolekul. Mezi dva základní typy patří:

- **LDPE** – nízko-hustotní, rozvětvený polyetylen (Low-Density Polyethylene)
- **HDPE** – vysoko-hustotní, lineární polyetylen (High-Density Polyethylene). [7] [12]



Obr. 4. Schéma větvení makromolekul: a) HDPE; b) LDPE [11]

Tab. 1 Srovnání vybraných vlastností LDPE a HDPE

	LDPE	HDPE
Hustota [kg/m ³]	915 - 930	940 - 960
Modul pružnosti [MPa]	100 - 200	700 - 1000
Pevnost v tahu [MPa]	8 - 10	20 - 30
Tažnost [%]	do 1000	do 1000
Krystalinita [%]	do 64	do 93
Teplota tání [°C]	105 - 110	130 - 135

Kromě již zmiňovaných dvou typů polyetylenů se můžeme dostat do styku ještě s dalšími typy, mezi které patří např.:

- **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).

Rozdílné vlastnosti mezi jednotlivými typy polyetylenů jsou způsobeny různými stupni větvení. Stupeň větvení ovlivňuje hlavně hustotu a rozsah krystalinity. [7] [12]

2.2 Vlastnosti polyetylenů

Jedná se o elastickou tuhou látku, která je téměř průhledná popř. mléčně zakalená. Teplotu tání má v rozmezí 105 až 136°C. Na omak se vyznačuje voskovitým charakterem. Vykazuje vysokou tažnost, houževnatost a má vysoký stupeň krystalinity.

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.[7] [12]

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. [7] [12]

2.3 HDPE (lineární, vysoko-hustotní polyetylen)

Vysoko-hustotní polyetylen má díky své vysoké krystalinitě nejmenší ohebnost a největší tuhost oproti ostatním typům polyetyleny. 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. [11]

2.4 LDPE (rozvětvený, nízko-hustotní polyetylen)

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 ($150\text{-}300 \text{ MPa}$), 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. [11]

3 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ

Při síťování polymerů dochází ke vzniku prostorové sítě. Tento děj je způsoben vzájemným spojováním polymerních řetězců chemickými vazbami. Pokud se přidá dostatečné množství síťovacího činidla, dojde k nekonečnému vzrůstu molekulové hmotnosti polymeru a makromolekula dosáhne rozměrů příslušného výrobku. [7]

Trojrozměrně zesíťované struktury mohou vznikat některým z těchto způsobů:

- polykondenzací nebo polyadící tří a více funkčních 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. [6]

U některých plastů se pro dosažení zesíťování s úspěchem využívá ozařování. Při ozařování zpravidla není nutné použití žádných dalších přísad. Velká výhoda je také v možnosti, že ozařování můžeme provádět až na hotovém výrobku (po zpracovatelském procesu). Zesíťováním ztrácejí polymery rozpustnost (v rozpouštědlech pouze botnají, tj. zvětšují svůj objem), tavitelnost a termoplasticitu a naopak získávají tvarovou stálost za zvýšených teplot, někdy i vyšší odolnost vůči chemikáliím. Zesíťováním můžeme přetvořit např. termoplasty na materiály vykazující v určitých teplotních oblastech vlastnosti elastomerů. [7]

3.1 Tvorba sítě

Při vytváření trojrozměrné sítě u polymerů dochází k těmto následujícím dějům: [6]

- nejdříve vzrůstají rozměry molekul a polydisperzita systému,
- v určité fázi reakce dospěje systém do bodu gelace, ve kterém MW vzroste nad všechny meze a v systému se objeví první stopy nekonečné struktury - gelu,
- po překročení bodu gelace se v systému vyskytují dvě různé části: nekonečná struktura - **gel**, a molekuly konečné velikosti - **sol**, který lze od gelu oddělit extrakcí; gel je nerozpustný, v rozpouštědle pouze botná,
- dále dochází ke zmenšování obsahu solu a jeho molární hmotnost i polydisperzita klesají,

- v gelu vznikají tzv. elasticky aktivní řetězce sítě, které při deformaci nesou napětí a určují velikost modulu pružnosti gelu a jeho rovnovážný stupeň nabotnění.

3.2 Ionizační záření

Pokud mluvíme o pojmu záření neboli radiaci, obecně rozumíme procesy, při nichž dochází k přenosu energie prostorem prostřednictvím fyzikálních polí nebo mikročástic. Mezi tyto mikročástice patří např.: letící elektrony, protony či neutrony, urychlená jádra atomů, letící ionty popř. celé atomy. Kromě energie dochází při záření i k přenosu hmoty a informace.[13]

Záření můžeme rozdělit podle mechanismu přenosu energie na:

- **Vlnové záření** – hovoříme tak o časově proměnném poli, které se šíří prostorem ve formě vln, jež se odpoutávají od zdroje a přenášejí do prostoru část energie z tohoto zdroje. Jako příklad můžeme uvést elektromagnetické vlny
- **Korpuskulární záření** - jedná se o částice, které jsou emitovány zdrojem. Tyto částice letí velkou rychlostí prostorem a přenášejí tak kinetickou energii (a též hybnost, popř. i elektrický náboj) ze zdroje do okolního prostoru. Příkladem je záření α (proud heliových jader) nebo β (proud rychle letících elektronů). [13]

Ionizující záření se vyznačuje svou schopností ionizovat prostředí, kterým prochází. Vytváří z původně elektricky neutrálních atomů kladné a záporné ionty (iontové páry). K ionizaci dochází pouze tehdy, mají-li kvanta příslušného záření dostatečně vysokou energii, aby byla schopna vyřadit elektrony z atomového obalu. Tato energie musí být logicky větší než vazbová energie elektronu v atomu.[8] [13]

Sekundární ionizace - některé elektrony, které jsou vyřazené při ionizaci, mají tolik energie, že mohou dále po své dráze samy ionizovat (takové elektrony se dříve nazývaly paprsky delta, neboť jejich stopa v jaderné emulzi nebo mlžné komoře má charakteristický rozvětvený tvar).[14]

Excitace - Nabitá částice při průchodu látkou ztrácí svou kinetickou energii převážně elektrickou Coulombovou interakcí s elektrony v atomech látky. Je-li energie předaná elektronu v atomovém obalu relativně malá a stačí jen k "vzdvižení" elektronu na vyšší energetickou hladinu, jedná se o proces excitace atomů. Excitovaný (vzbuzený) stav atomu není stálý - vzápětí přeskočí elektron zpět na původní hladinu - nastane deexcitace, přičemž rozdíl energií se vyžáří ve formě fotonu elektromagnetického záření. [14]

S ohledem na charakter ionizačního procesu lze ionizující záření rozdělit na přímo a nepřímo ionizující. Přímě ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi (elektrony, pozitrony, protony, částice alfa a beta apod.), které mají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby mohly vyvolat ionizaci. Nepřímě ionizující záření zahrnuje nenabitě částice (fotony, neutrony apod.), které samy prostředí neionizují, ale při interakcích s prostředím uvolňují sekundární, přímě ionizující nabitě částice. Ionizace prostředí je pak způsobena těmito sekundárními částicemi. [14]

3.2.1 Měrné jednotky ionizačního záření

- 1) KINETICKÁ ENERGIE ELEKTRONU – jednotkou této veličiny je elektronvolt (eV). Jeden elektronvolt odpovídá kinetické energii, kterou získá elektron urychlený ve vakuu napětím jednoho voltu. [8]

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

- 2) DÁVKKA – 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. [8]

$$1\text{Gy} = 1\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} = 100\text{rad} \quad (2)$$

- 3) 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 $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$. [8]

$$1\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1\text{W} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3)$$

- 4) **AKTIVITA** – charakterizuje množství radioaktivní látky. Představuje počet radioaktivních přeměn v látce vztažený na jednotku času. Pro tuto veličinu používáme jednotku Becquerel (Bq). [8]

$$1\text{Bq} = 1\text{rozpad/s} \quad (4)$$

3.2.2 Oblasti využití ionizačního záření

Růst požadavků na bezpečnost a kvalitu produktů má stále stoupající tendenci ve všech průmyslových odvětvích. Ionizační záření je jednou z alternativ a využívá se pro následující aplikace:

- **Radiační síťování:**
 - Plastový průmysl (např. potrubí, fólie, polotovary, komponenty pro strojírenství)

Plastové trubky v podlahovém vytápění, které jsou na (obr. 5.) jsou vystaveny zvláštnímu mechanickému zatížení. Radiační síťování zajišťuje zlepšení jejich odolnosti proti vnitřnímu pnutí, redukuje studené tečení (kríp) a také zvyšuje jejich pevnost.



Obr. 5. Trubky v podlahovém vytápění [23]

- Automobilový průmysl (komponenty vystaveny zvýšené teplotě nebo chemickým látkám – například díly, které se nacházejí v motorovém prostoru)
- Elektrotechnický průmysl (zabezpečovací systémy, konektory, cívky, kabely, potrubí) [18]



Obr. 6. Izolace kabelů a drátů [24]

- **Radiační sterilizace**

- Biotechnologický průmysl (laboratorní zařízení, například zařízení pro odběr vzorků krve, pipety, jednorázové injekční stříkačky, DNA sady, bioreaktory, buněčné kultivační nádoby)
- Farmaceutický a kosmetický průmysl (suroviny, jako jsou plniva, pigmenty, enzymy, rostlinné přípravky)
- Obalový průmysl (obalové materiály z kovu, plastu, například láhve, trubky, plechovky)
- Potravinový průmysl (např. bylinky, koření, krmiva) [18]

- Zdravotnický průmysl (např. implantáty, jehly, chirurgické nástroje, infuze a ventilační systémy, laboratorní potřeby) [18]



Obr. 7. Sterilizované lékařské pomůcky [25]

3.2.3 Záření alfa

Jako záření alfa se označuje proud α -částic. O těchto α -částicích je známo, že ze všech běžných kvant záření mají největší hmotnost a hlavně největší elektrický náboj. 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 $+2e$). Jakmile vletí α -částice do látky, působí při svém průletu kolem atomů značnou elektrickou (Coulombovskou) silou na elektrony, které velmi účinně vytrhává z atomových obalů. Těmito silnými ionizačními účinky se částice α , i když má zpravidla vysokou kinetickou energii, v látce značně rychle brzdí, takže její dolet je velmi malý - cca 0,1 mm v látkách hustoty vody. Nejsilnější ionizační účinky vznikají na konci doletu částice (Braggovo maximum). [13] [15]

3.2.4 Záření beta

Vnikne-li do látky částice β -, což je záporně nabitý elektron e^- , pak při svém průletu kolem atomů působí elektrickými odpudivými silami na elektrony, které vyráží z atomového

obalu a tím atomy ionizuje. Jelikož jsou elektrony velmi lehké částice, při každé takové ionizaci atomu elektron β prudce změní směr svého pohybu - odpudivými elektrickými silami se odrazí od atomu. A hned pak od dalšího a dalšího atomu - elektron β se bude "cik-cak" pohybovat a odrážet mezi atomy, které ionizuje a přitom ztrácí energii. Zabrzdí se, v závislosti na své energii, v hloubce do 1-4 mm v látce hustoty vody, v těžkých kovech pak nedoletí hlouběji než do cca 0,1 mm. [14]

Pokud se budeme bavit o záření beta plus (β^+), jde o 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 předchozím typem záření (β^-). [16]

3.2.5 Záření gama

Jedná se o fotonové záření s čárovým spektrem, vysílané atomovými jádry při radioaktivních přeměnách a dalších procesech. Fotony záření γ nemají elektrický náboj, takže nemohou přímými elektrickými silami ionizovat atomy. Foton je však kvantem rychle kmitajícího elektrického a magnetického pole, takže když se do "těsné blízkosti" tohoto kmitajícího pole dostane elektron, může obdržet elektromagnetickou energii a být fotonem urychlen. Pokud se toto stane s obalovým elektronem v atomu, může dojít k excitaci nebo ionizaci atomu. Díky své energii mohou paprsky gama proniknout lidským tělem, ale mohou být pohlceny tlustou stěnou betonu nebo olova. Gama záření ionizuje nepřímou, jen prostřednictvím nabitých částic vzniklých při interakci gama kvanta s látkou. [13] [17]

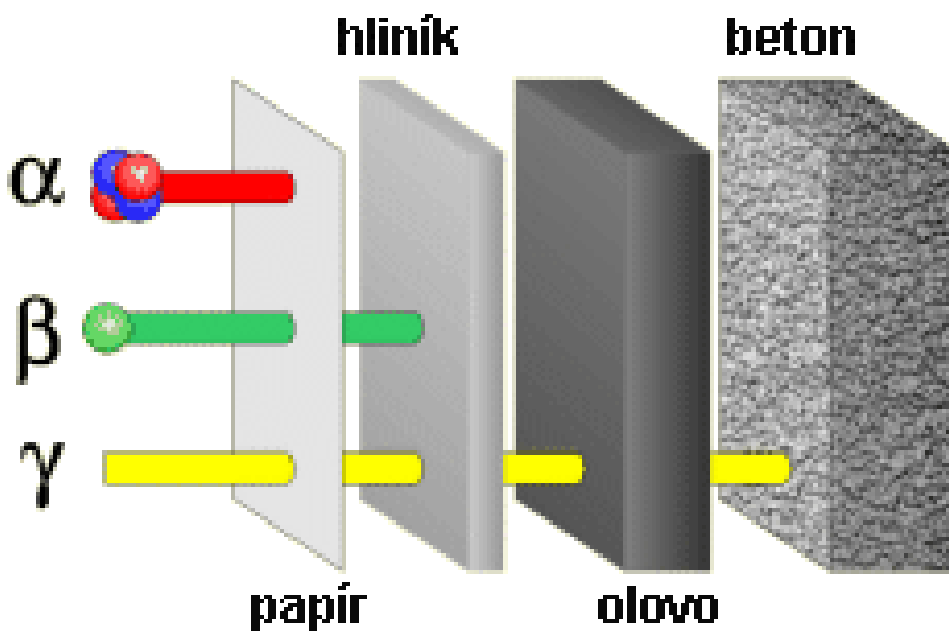
3.2.6 Porovnání jednotlivých druhů záření

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. [5] [18]

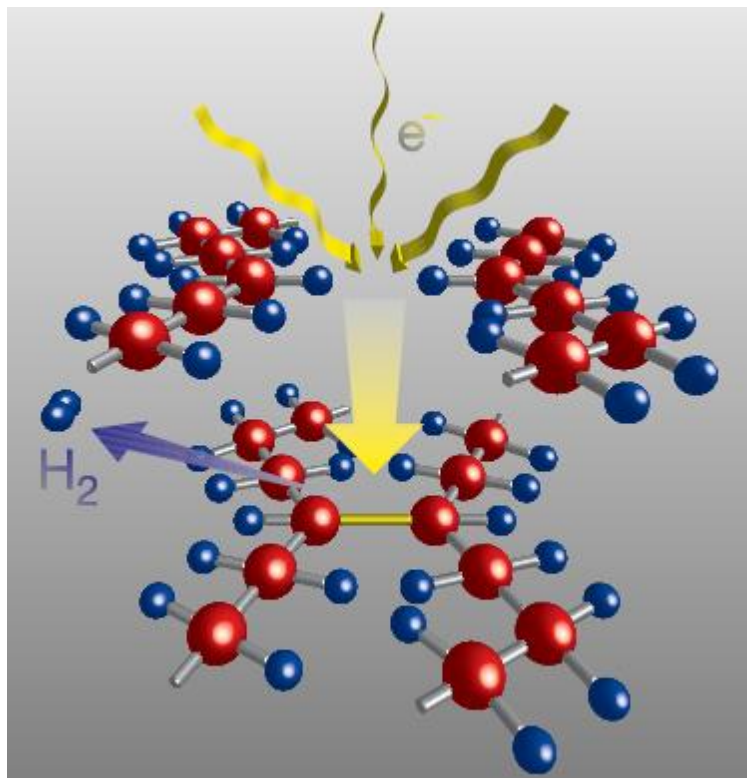


Obr. 8. Pronikavost jednotlivých druhů ionizujícího záření. [17]

3.3 Radiační síťování

Radiační síťování probíhá na základě interakce některého z druhů záření (nejčastěji beta záření) s ozařovaným polymerem. Vlivem této interakce dochází k vzniku polymerních radikálů za rozpadu vazeb C-H, ty pomocí rekombinace vytvoří v řetězci síť a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C. Zbylé dva vodíkové atomy se spojí a zformují do molekuly H_2 . [6] [18]

Na (obr. 9.) červené kuličky představují atom uhlíku a modré kuličky představují atom vodíku



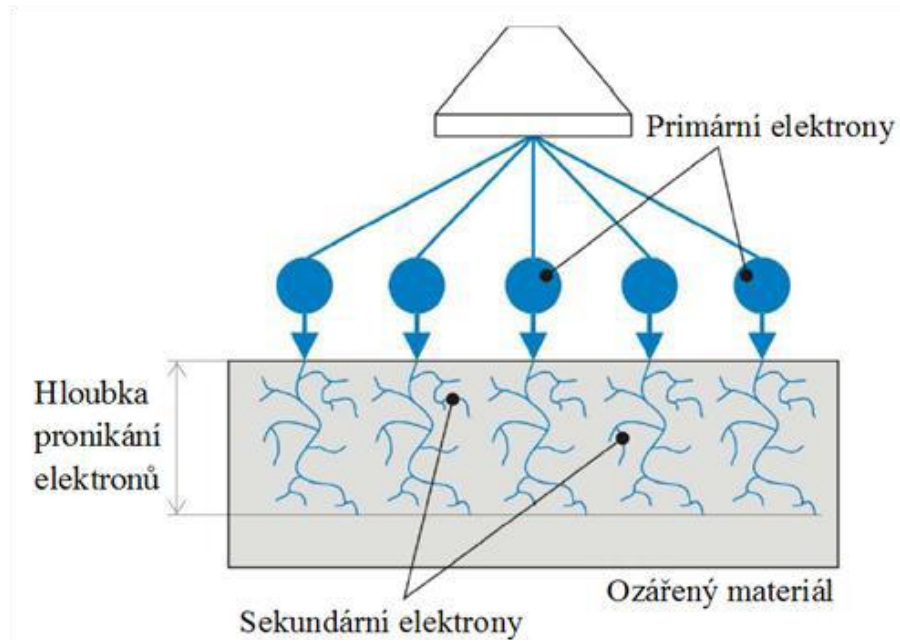
Obr. 9. Princip radiačního síťování [18]

Při ozařování polymerů dochází ke dvěma paralelním jevům (síťování a degradaci). To, který z procesů převažuje, závisí na chemické struktuře polymeru. Díky variaci ozařovacích parametrů lze měnit stupeň zesíťování, což podle potřeby ovlivňuje vlastnosti materiálu.

Radiační síťování probíhá při pokojové teplotě bez dodatečného namáhání výrobku. Jeho hlavní výhoda spočívá v tom, že je provedeno až po zpracovatelském procesu (po vstříkování, vytlačování nebo vyfukování), díky tomu zůstávají odpady po zpracování nezesíťované a mohou být znovu použity. [18]

3.3.1 Síťování ionizujícím beta zářením

Síťování polymerů ionizujícím beta zářením se uskutečňuje prostřednictvím urychlených elektronů, jejichž zdrojem je urychlovač elektronů. Žhavicí katoda elektronového urychlovače emituje elektrony, které jsou následně urychlovány v elektromagnetickém poli. Rychlost, resp. energie elektronů, je závislá na střídavém napětí mezi žhavicí katodou a anodou. [6]



Obr. 10. Pronikání beta záření do materiálů [6]

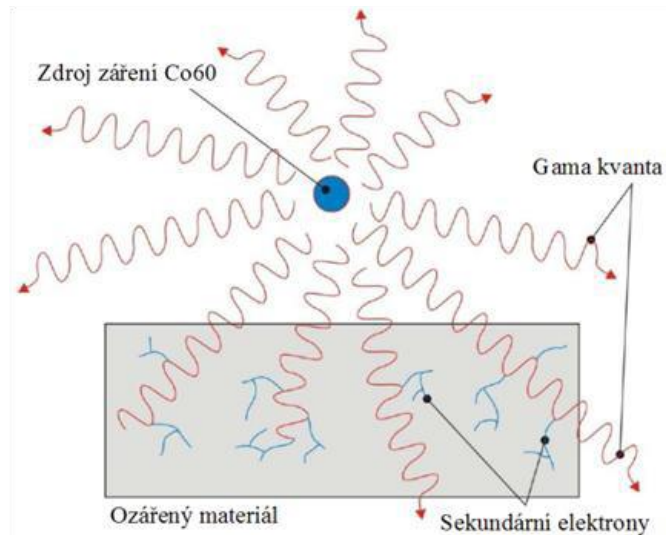
Z katody vystupující elektrony jsou usměřňovány elektromagnetickým polem do svazků a urychlovány. K tomu aby se zabránilo elektrickému výboji, je nutné, aby jednotlivé části urychlovače elektronů byly uloženy v tlakové nádobě s izolujícím plynem. [6]



Obr. 11. Elektronový urychlovač Rhodotron [26]

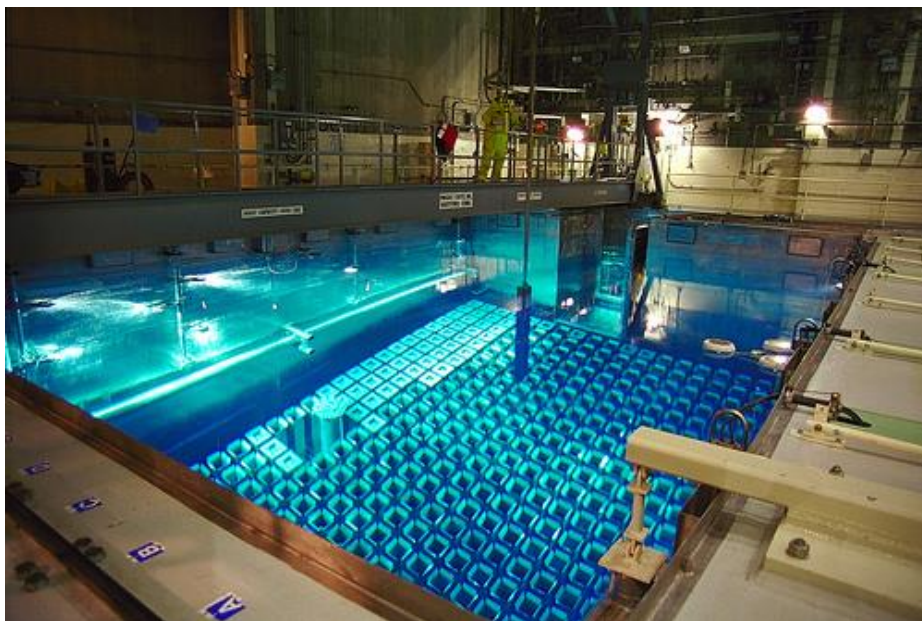
3.3.2 Sítování ionizujícím gama zářením

Pro sítování polymerů pomocí záření gama se dnes obvykle používá jako zdroj záření radionuklid kobalt Co^{60} , který emituje záření gama se střední energií cca 1,3 MeV a vysokou penetrací. [6]



Obr. 12. Pronikání gama záření do materiálu [6]

U gama zařízení nelze samotný zdroj záření jednoduše vypnout. Aby bylo možné bez rizika vstoupit do ozařovacího prostoru, musí být záření odcloněno. Z tohoto důvodu jsou zdroje záření ponořeny do vodní nádrže. Sloupec vody nad zdrojem plní funkci clony. [6]



Obr. 13. Zdroj gama záření ve vodní nádrži [26]

3.3.3 Modifikace vlastností polymerů radiačním síťováním

Modifikace mechanických vlastností: [18]

- Nárůst Youngova modulu pružnosti
- Zvýšení pevnosti
- Snížení poměrného prodloužení při přetržení (tažnost)
- Zlepšení meze únavy (při střídavém ohybu)
- Zvýšení pevnosti studených spojů
- Nárůst tvrdosti
- Zlepšení otěruvzdornosti
- Zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem

Modifikace tepelných vlastností: [18]

- Zlepšení tvarové stálosti za tepla
- Zlepšení trvalé deformace při zatížení tlakem (tahem)
- Zvýšení tepelné odolnosti
- Zvýšení odolnosti proti působení žhavým drátem
- Vyšší odolnost proti stárnutí

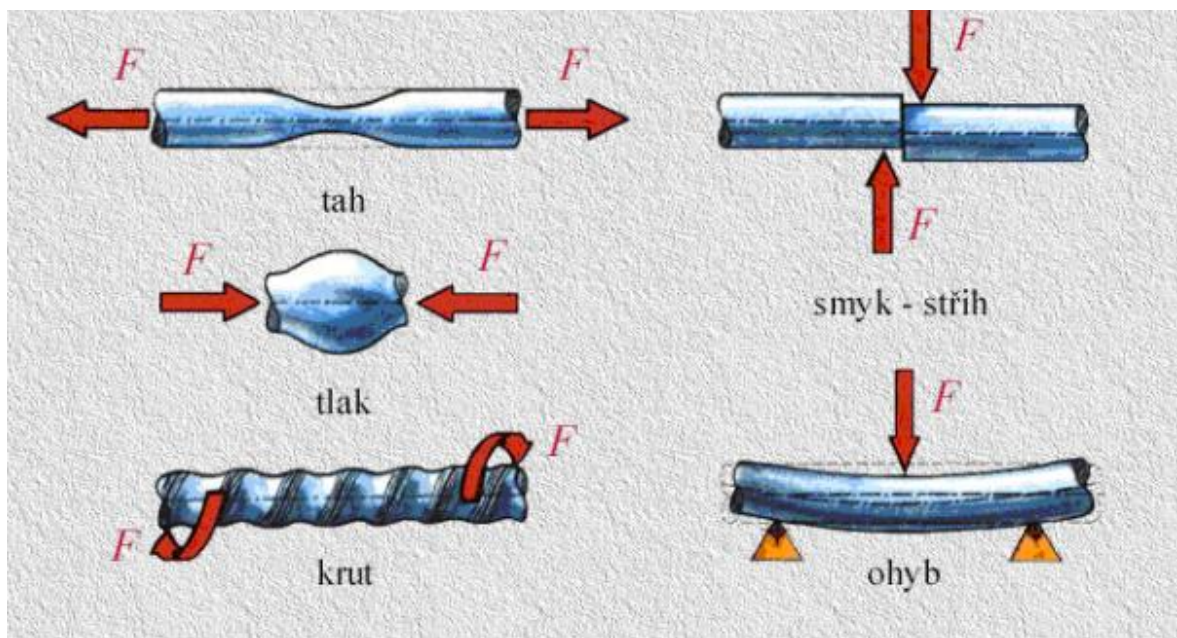
Modifikace chemických vlastností: [18]

- Zvýšení rozpustnosti
- Zlepšení odolnosti proti botnání
- Zvýšení odolnosti proti trhlinám způsobených pnutí
- Zlepšení odolnosti proti hydrolýze
- Zvýšení olejuvzdornosti

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. [5]

4 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Materiály jsou při zpracování i při používání vystaveny různým typům namáhání, jako je tah, tlak, krut, stříh a ohyb a především jejich kombinace. Mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti materiálů patří především pevnost, modul pružnosti, tažnost, houževnatost, tvrdost atd. Protože je potřeba porovnávat naměřené vlastnosti, jsou zkoušky těchto mechanických vlastností normalizovány. Normy předepisují způsoby, jakým budou zkušební tělíska připraveny, testovány a následně analyzovány. Mechanické zkoušky (na rozdíl od fyzikálních či elektrických) často zahrnují deformace nebo porušení zkušebního tělíska. [5][19]



Obr. 14. Příklady způsobů namáhání materiálu [19]

Z hlediska charakteru zatěžování můžeme rozdělit mechanické zkoušky na: [20]

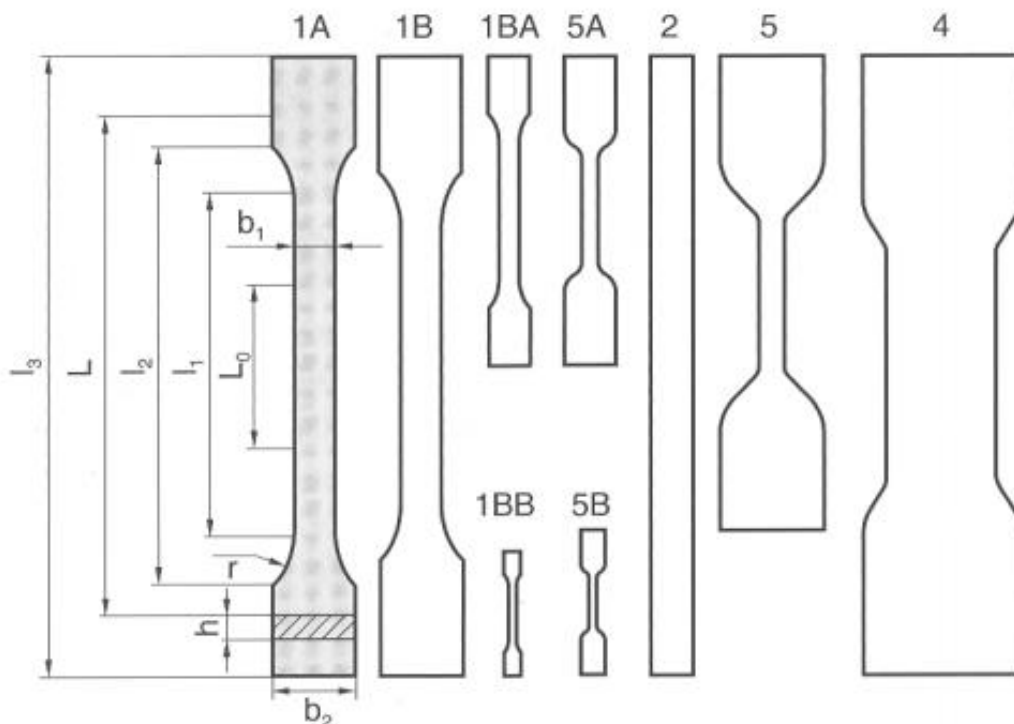
- **statické zkoušky** – Při těchto zkouškách je materiál namáhán pozvolně měnícími se silami, které působí obvykle až do okamžiku destrukce zkušebního tělíska. Mezi statické zkoušky patří především zkoušky tahové, tlakové, ohybové, tvrdosti, zkoušky pevnosti lepených spojů, zkoušky pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů, křipové zkoušky aj.

- **dynamické zkoušky** - Síla působí buď rázově, nebo jen v krátkém čase. Další možností je dlouhodobé působení síly, jejíž velikost se ve velmi krátkém čase periodicky mění.)
- **únavové zkoušky** – Vyznačují se dlouhodobým zkoumáním mechanických vlastností za předepsaných podmínek, obvykle až do okamžiku poškození materiálu.

4.1 Tahová zkouška

Zkouška tahem patří mezi nejstarší a nejfrekventovanější statistické zkoušky v technické praxi. Princip této zkoušky spočívá v zatěžování zkušebního tělesa statickým jednoosým tahem. Tahová zkouška se provádí na univerzálních zkušebních strojích, na kterých se může také provádět zatěžování tlakem, nebo ohybem, staticky či cyklicky. Způsob provádění zkoušky je daný normou ČSN EN ISO 527-1, 527-2. Grafickým znázorněním tahové zkoušky jsou pracovní diagramy, které poskytují informace o deformačním chování materiálu za různých podmínek zkoušení. U plastických hmot je v důsledku anizotropie napětí v tahu rozloženo po průřezu nerovnoměrně, což je příčinou vzniku smykových napětí. [5][21]

4.1.1 Zkušební tělesa



Obr. 15. Normalizovaná zkušební tělesa pro tahovou zkoušku [22]

Tvar a rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky jsou přesně definovány normou pro konkrétní polymerní materiál. Většinou se však používají zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek, takzvaných osmiček. Tvar lopatiček je zvolen záměrně, protože dovoluje dostatečně pevné uchycení vzorku v čelistech a napětí je přitom koncentrováno do zúžené části vzorku. Pro sledování mechanických vlastností kaučukových vulkanizátů lze použít také zkušební tělesa tvaru kroužků. Pro folie či desky lze využít pásků. [22]

4.1.2 Průběh tahové zkoušky

Po upnutí zkušebního tělíska do čelistí trhačího stroje nastává zatěžování. Následkem toho se začne zkušební těleso deformovat a měnit své rozměry až do okamžiku rovnováhy mezi deformací a vyvozeným napětím, pokud však předtím nedojde k celkové destrukci vzorku. Prodloužením zkušebního tělesa se mění jeho původní délka a nastalá délková změna se definuje jako poměrné (relativní) prodloužení.[22]

$$\varepsilon_L = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (5)$$

kde l [mm] je okamžitá délka zkušebního tělíska

l_0 [mm] je původní délka zkušebního tělíska

Současně však dochází také ke změně velikosti průřezu zkušebního tělesa, které se vyjadřuje jako poměrné zúžení.

$$\varepsilon_S = \frac{S_0 - S}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} \quad [-] \quad (6)$$

kde S [mm] je okamžitá plocha průřezu zkušebního tělíska

S_0 [mm] je původní plocha průřezu zkušebního tělíska

Vztah mezi poměrným zúžením a poměrným prodloužením je označován jako Poissonovo číslo.

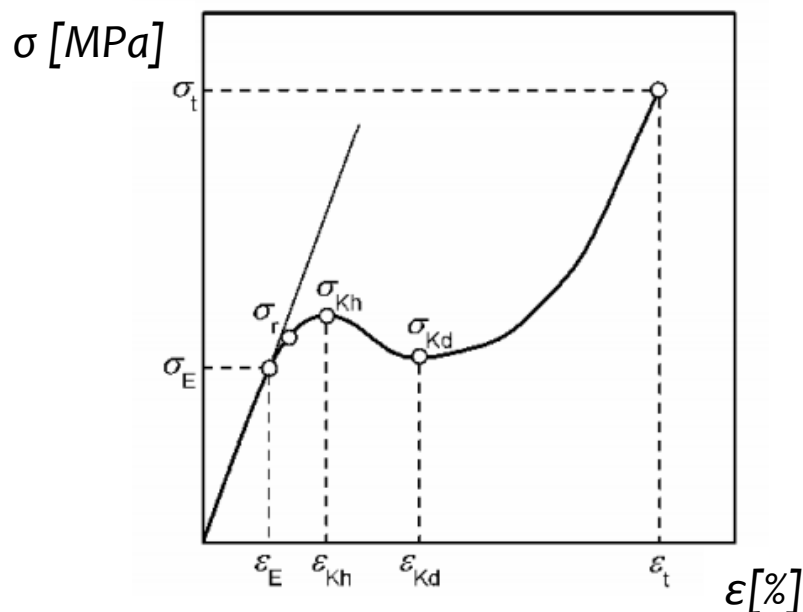
$$\nu = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} \quad [-] \quad (7)$$

Pro změnu objemu při prodloužení byl odvozen tento vztah:

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx (1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l_0} \quad (8)$$

Pokud se objem tělesa během tahové zkoušky nemění, tak Poissonovo číslo nabývá hodnoty 0,5. Ve většině případů se však průřez zmenšuje méně než by odpovídalo protažení, v důsledku čehož narůstá objem a hodnoty Poissonova poměru klesají. Vyšší hodnoty vypovídají o vyšší poddajnosti materiálu. Hodnota Poissonova poměru je prakticky teplotně nezávislá. [28]

4.1.3 Tahový diagram



Obr. 16. Obecný tahový diagram [22]

Z trhací zkoušky lze stanovit dvě hodnoty tahového napětí, a to efektivní napětí vztahující se na okamžitý průřez zkušebního tělesa (náročné na přesnost měření průřezu) anebo zjednodušené smluvní napětí vztahované na původní průřez vzorku. Chování elastických materiálů v oblasti malých deformací lze popsat Hookovým zákonem, který definuje přímo úměrný vztah mezi napětím a deformací. Konstantou této úměrnosti je Youngův modul pružnosti E . [22]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [\text{MPa}] \quad (9)$$

Hodnota modulu pružnosti se stanovuje z tahových křivek v oblasti, kde je patrná lineární závislost napětí na deformaci. Čím vyšší hodnota modulu pružnosti je, tím je vyšší tuhost zkoušeného materiálu. Jeho hodnota je, zvláště pak u polymerních materiálů, závislá na čase, teplotě a okolním prostředí (například vlhkost). [22]

Na tahové křivce je znázorněno několik důležitých bodů, mezi které patří:

- **Mez úměrnosti (E)** – v tomto bodě končí oblast hookovského chování. [22]
- **Mez pružnosti (R)** – Po překročení meze úměrnosti vzrůstá deformace zkušebního tělesa rychleji než příslušné napětí. Přestane-li v určitém okamžiku napětí působit, deformace okamžitě zcela nevymizí. Po okamžitém vymizení ideálně elastické deformace zůstává ještě deformace viskoelastická neboli zpožděně elastická, její vymizení je časově závislé. Působí-li napětí delší dobu, dochází k částečně plastické deformaci, dokonale nevratné. [21]
- **Mez kluzu (K)** – za mezí pružnosti dochází i při nepatrném zvýšení napětí k velké deformaci, nastává plastická (nevratná) deformace. Nastává mez kluzu. Pokud za tímto bodem dojde k poklesu napětí, hovoříme o horní mezi kluzu, zatímco minimum na pokračující křivce se definuje jako dolní mez kluzu. Za dolní mezi kluzu dochází k opětovnému nárůstu napětí až do určitého maxima, kdy dojde k přetržení zkušebního tělesa anebo k porušení soudržnosti doprovázené poklesem napětí a lomu. Pokud dojde k destrukci těsně za mezí pružnosti, při relativně nízkých deformacích, tak se jedná o křehký lom (polystyren, polymethylmetakrylát). Pokud tomu však předchází velká deformace spojená s orientací makromolekul, tak dochází k takzvanému tažnému lomu (polyamidy, polyolefiny, pryž). [22]
- **Mez pevnosti (M)** - pevnost v tahu se definuje jako napětí potřebné k přetržení zkušebního tělesa vztahované na původní průřez, tedy smluvní napětí potřebné k pře-

tržení. K výpočtu se používá maximální hodnota síly, i když k vlastnímu přetržení dochází při nižším napětí. [22]

$$\sigma_M = \frac{F_{\max}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (10)$$

I. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem této práce je zkoumání vlivu ionizujícího beta záření na mechanické vlastnosti vybraných polymerních materiálů v širokém spektru teplot měření. Materiály určené pro testování jsou LDPE a HDPE. Zkušební tělíska budou vyrobeny pomocí metody vstřikování na školním vstřikovacím stroji Arburg. Následně bude část zkušebních tělísek obou materiálů ozářena dávkou záření 132 kGy. Dávka záření je vybraná na základě literární rešerše a dle doporučení společnosti BGS Beta-Gama-Servise GmbH & Co, KG.

U ozářených tělísek bude změřen obsah gelu (nefiltrovatelné fáze). U ozářených i neo-zářených zkušebních tělísek budou dále změřeny vybrané mechanické vlastnosti za pomoci tahové zkoušky. Všechny zkušební tělíska budou zkoušeny v rozmezí od pokojové až po maximální měřitelnou teplotu – s krokem po 10°C. Měřenými veličinami budou modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu. Výsledky budou statisticky zpracovány a vyhodnoceny formou grafů a tabulek.

6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

6.1 Materiál zkušebních tělísek

Pro výrobu zkušebních tělísek byly zvoleny tyto materiály:

- **LDPE** (DOW LDPE 780 E NATURAL)

Tab. 2. Přehled vybraných vlastností LDPE

FYZYKÁLNÍ VLASTNOSTI - testovací metoda (norma)	
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] - ASTM D792	923
MECHANICKÉ VLASTNOSTI - testovací metoda (norma)	
Modul pružnosti v tahu [MPa] - ISO 527-2	164
Pevnost v tahu [MPa] -ISO 527-2	8,2
Tažnost [%] - ASTM D882	700
Tvrdost Shore D - ISO 868	49
Rázová-tahová houževnatost [kJ.m] - ISO 8256	286
TEPELNÉ VLASTNOSTI - testovací metoda (norma)	
Teplota měknutí dle Vicata [°C] - ASTM D1525	93
Tepelná vodivost [W/K.m] - DIN 52 612	0,3
Teplota tavení [°C] - ISO 11357	110

- **HDPE** (DOW LDPE 25055 E NATURAL)

Tab. 3. Přehled vybraných vlastností HDPE

FYZYKÁLNÍ VLASTNOSTI - testovací metoda (norma)	
Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] - ASTM D792	953
MECHANICKÉ VLASTNOSTI - testovací metoda (norma)	
Modul pružnosti v ohybu [MPa] - ASTM D790	870
Pevnost v tahu [MPa] -ASTM D638	25
Tažnost [%] - ASTM D882	200
Tvrdost Shore D - ISO 868	65
Rázová-tahová houževnatost [kJ.m] - ISO 8256	55
TEPELNÉ VLASTNOSTI - testovací metoda (norma)	
Teplota měknutí dle Vicata [°C] - ASTM D1525	124
Tepelná vodivost [W/K.m] - DIN 52 612	0,42
Teplota tavení [°C] - ISO 11357	135

6.2 Výroba zkušebních tělísek

Výroba tělísek pro trhací zkoušku byla realizována na vstřikovacím stroji značky ARBURG 420C Allrounder ve školních laboratořích.



Obr. 17. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C [28]

Tab. 4. Technické parametry stroje ARBURG Allrounder 420C

PARAMETRY VSTŘIKOVACÍHO STROJE	HODNOTA
Maximální uzavírací síla [kN]	1000
Maximální otevření [mm]	500
Velikost upínací desky (šířka x výška) [mm]	570 x 570
Maximální vyhazovací síla [kN]	40
Maximální zdvih vyhazovače [mm]	175
Průměr šneku [mm]	40
Poměr šneku [L / D]	20
Maximální zdvih šneku [mm]	145
Maximální objem dávky [cm ³]	182
Maximální vstřikovací tlak [bar]	2120
Maximální vstřikovací rychlost (objemová) [cm ³ .s ⁻¹]	168
Maximální krouticí moment šneku [Nm]	700
Objem násypky [l]	50
Hmotnost stroje [kg]	3700

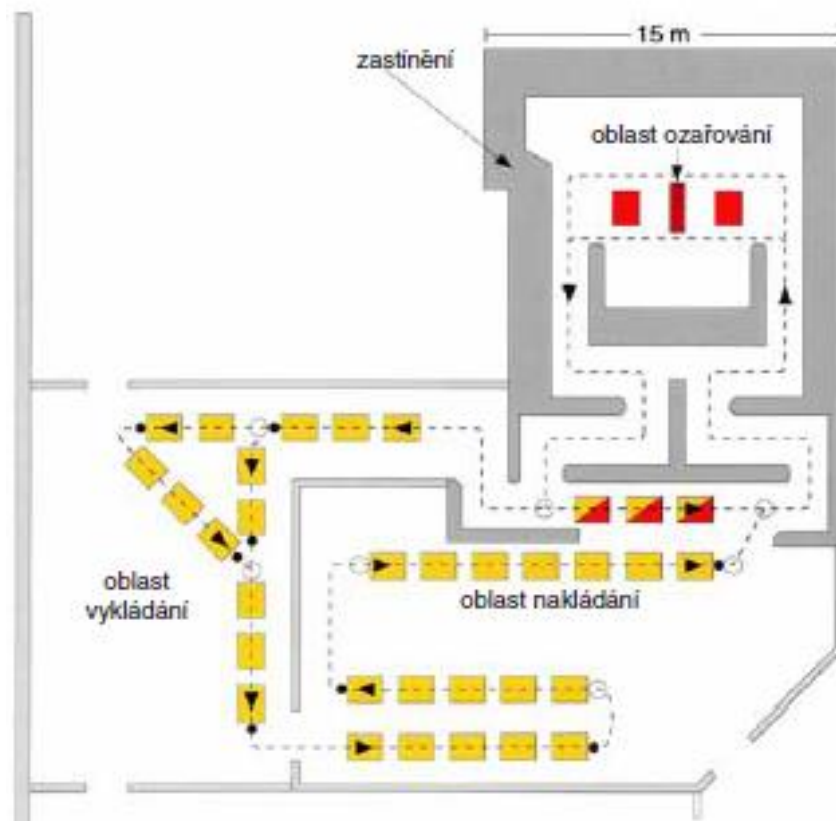
6.3 Ozařování zkušebních tělísek

Ozařování zkušebních tělísek se uskutečnilo v Německé firmě BGS Beta-Gama-Servise GmbH & Co, KG v pobočce Saal an der Donau. Zdrojem elektronového beta záření byl vysokonapěťový elektronový urychlovač Rhodotron s maximální energií 10 MeV. Dávka ozáření jak pro LDPE tak i pro HDPE byla zvolena 132 kGy. Tato dávka byla zvolena pro oba polymerní materiály na základě revize dostupné literatury. Aby nedocházelo k velkému tepelnému zatížení zkušebních tělísek vlivem ozařování, byla dávka záření při jednom průjezdu pod ozařovacím skenerem 33 kGy. Ozařování bylo tedy rozděleno na několik postupných průjezdů.

Na (obr. 18.) můžeme vidět polymerní materiály na válečkovém dopravníku před vstupem do ozařovacího bunkru, na (obr. 19.) zase schéma ozařovací linky.



Obr. 18. Linka pro ozařování polymerů ve firmě BGS [16]



Obr. 19. Schéma ozařovací linky [18]

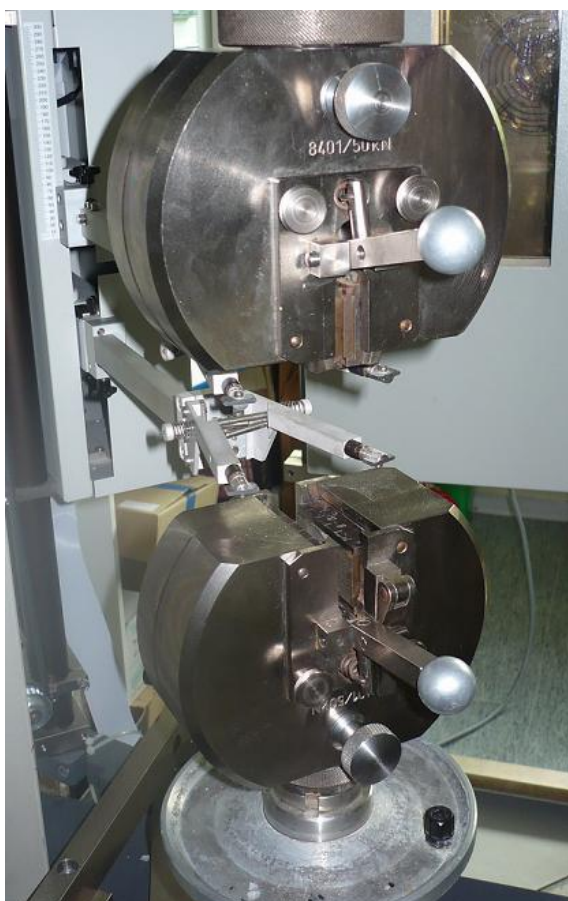
Následující tabulka zahrnuje data o změřeném obsahu gelové fáze polymerních materiálů LDPE a HDPE při ozáření dávkou 132 kGy (dle normy ČSN EN 579). Je patrné, že většího obsahu gelu při stejné dávce záření dosáhl materiál LDPE.

Tab. 5. Obsah gelu

Materiál	Obsah gelu
LDPE	66,3%
HDPE	51,9%

7 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Zkouška tahem byla realizována na zkušebním stroji ZWICK ROELL 1456 dle normy ČSN EN ISO 527-1, 527-2 . Naměřená data byla zaznamenávána ve formě tabulek a tahových diagramů pomocí osobního počítače. K vytemperování zkušebních tělísek a k provedení zkoušky za zvýšené teploty sloužila přídavná temperační komora. Všechna zkušební tělíska se před začátkem měření za zvýšené teploty temperovala minimálně 20 minut. Měření LDPE probíhalo při teplotách 23, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 a 100 °C, HDPE bylo zkoušeno navíc při teplotách 110, 120 a 130 °C. Pro každou teplotu bylo testováno minimálně 15 tělísek. Rychlost posuvu čelistí byla u obou materiálů nastavena na 50 mm/min. Pro přesnější zaznamenání modulu pružnosti v tahu bylo použito přídavného extenzometru, který i s čelistmi zkušebního stroje můžeme vidět na (obr. 20.)



Obr. 20. Čelisti zkušebního stroje ZWICK

8 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Pro interpretaci naměřených hodnot byly použity níže uvedené statistické veličiny. Pro jejich výpočet byl použit program Minitab 16, pomocí kterého byly zhotoveny také box-plotové diagramy. Tyto diagramy slouží pro grafické znázornění vybraných statistických parametrů a také jako test na vychýlené hodnoty.

Aritmetický průměr ... \bar{x} : představuje průměrnou, nebo typickou hodnotu výběrového souboru.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n} \quad (11)$$

kde: x_i ... jednotlivé hodnoty proměnné

n ... rozsah výběrového souboru

Výběrový rozptyl... s^2 : je nejrozšířenější mírou variability výběrového souboru. Je dán podílem součtu kvadrátů odchylek jednotlivých hodnot od průměru a rozsahu souboru sníženého o jedničku.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (12)$$

Směrodatná odchylka... s : je definována jako kladná odmocnina výběrového rozptylu.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (13)$$

Variační koeficient... V_x : vyjadřuje relativní míru variability proměnné x . Je bezrozměrný, uvádíme-li jej v procentech, používáme následující vztah.

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}} \quad (14)$$

Dolní kvartil... Q_1 : rozděluje datový soubor tak, že 25% hodnot je menších než tento kvartil a 75% hodnot je větších nebo rovno.

Horní kvartil... Q_3 : rozděluje datový soubor tak, že 75% hodnot je menších než tento kvartil a 25% hodnot je větších nebo rovno.

Medián... m : rozděluje datový soubor tak, že 50% hodnot je menších než medián a 50% hodnot je větších nebo rovno.

Interkvartilové rozpětí...IQR: je mírou variability výběrového souboru a je definováno jako vzdálenost mezi horním a dolním kvantilem.

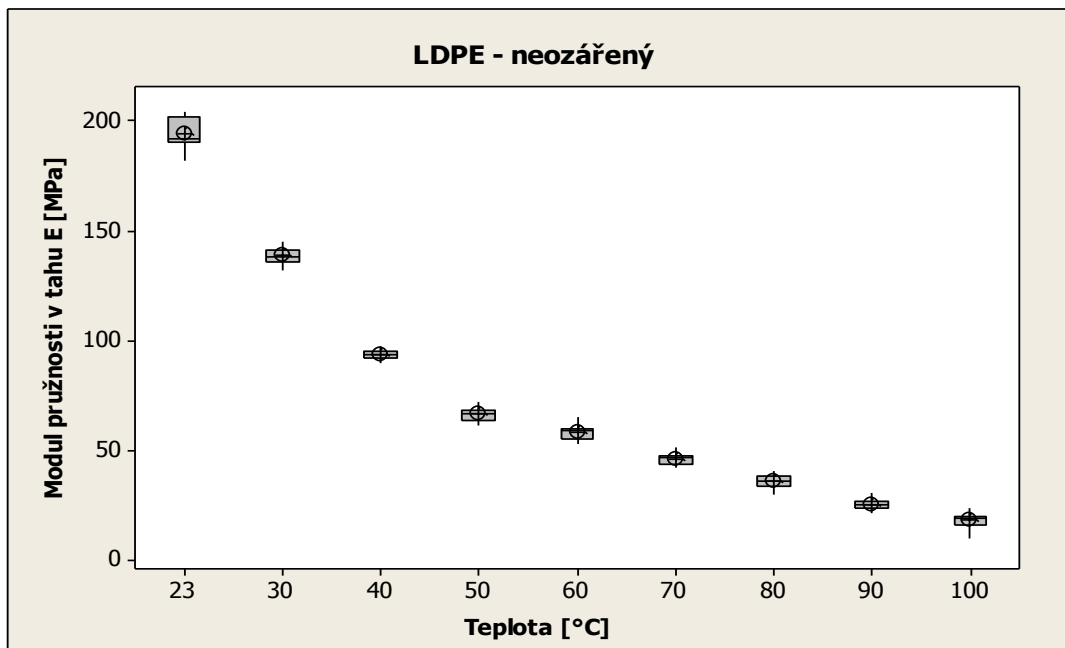
8.1 LDPE – neozářený

8.1.1 Modul pružnosti v tahu

Tab. 6. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu neozářeného LDPE při různých teplotách

Modul pružnosti v tahu - LDPE neozářený							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	194,33	6,48	3,33	190,00	192,00	202,00	12,00
30	138,67	3,42	2,46	136,00	138,00	141,00	5,00
40	93,93	2,27	2,42	92,30	93,70	95,30	3,00
50	66,37	3,02	4,54	63,40	66,50	68,40	5,00
60	58,00	3,45	5,94	55,00	58,90	60,00	5,00
70	46,21	2,65	5,72	43,50	46,80	47,90	4,40
80	35,97	2,99	8,32	33,80	35,70	38,10	4,30
90	25,41	2,24	8,83	23,80	25,30	26,80	3,00
100	18,22	3,40	18,69	15,70	19,40	19,70	4,00

Z (obr. 21.) je zřejmé, že se při měření modulu pružnosti v tahu u neozářeného LDPE nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



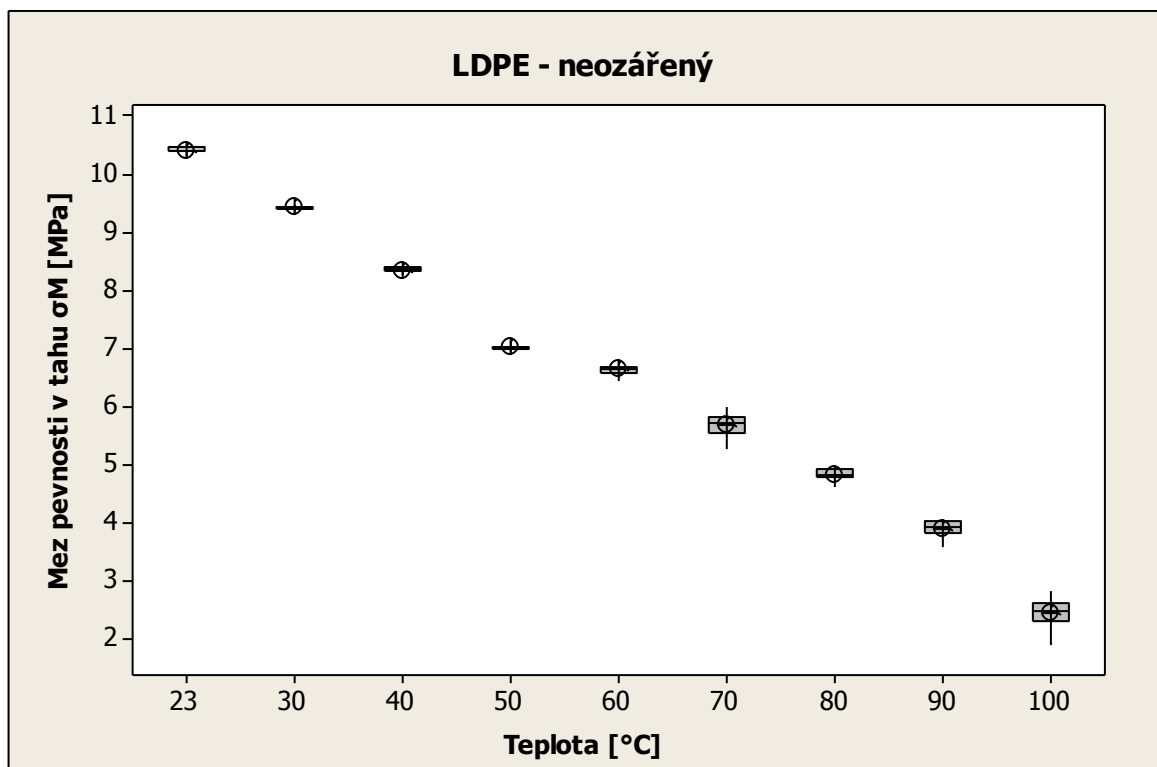
Obr. 21. Box-plotový diagram pro neozářený LDPE – modul pružnosti v tahu

8.1.2 Mez pevnosti v tahu

Tab. 7. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu neozářeného LDPE při různých teplotách

Mez pevnosti v tahu - LDPE neozářený							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	10,43	0,080	0,77	10,40	10,40	10,50	0,10
30	9,44	0,034	0,36	9,42	9,45	9,46	0,04
40	8,36	0,051	0,61	8,35	8,37	8,41	0,06
50	7,03	0,057	0,81	7,00	7,03	7,06	0,06
60	6,65	0,095	1,43	6,60	6,67	6,70	0,10
70	5,70	0,164	2,88	5,57	5,72	5,83	0,26
80	4,85	0,106	2,18	4,81	4,85	4,93	0,12
90	3,91	0,153	3,92	3,84	3,94	4,05	0,21
100	2,46	0,286	11,59	2,32	2,51	2,64	0,32

Z (obr. 22.) je zřejmé, že se při měření meze pevnosti v tahu u neozářeného LDPE nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



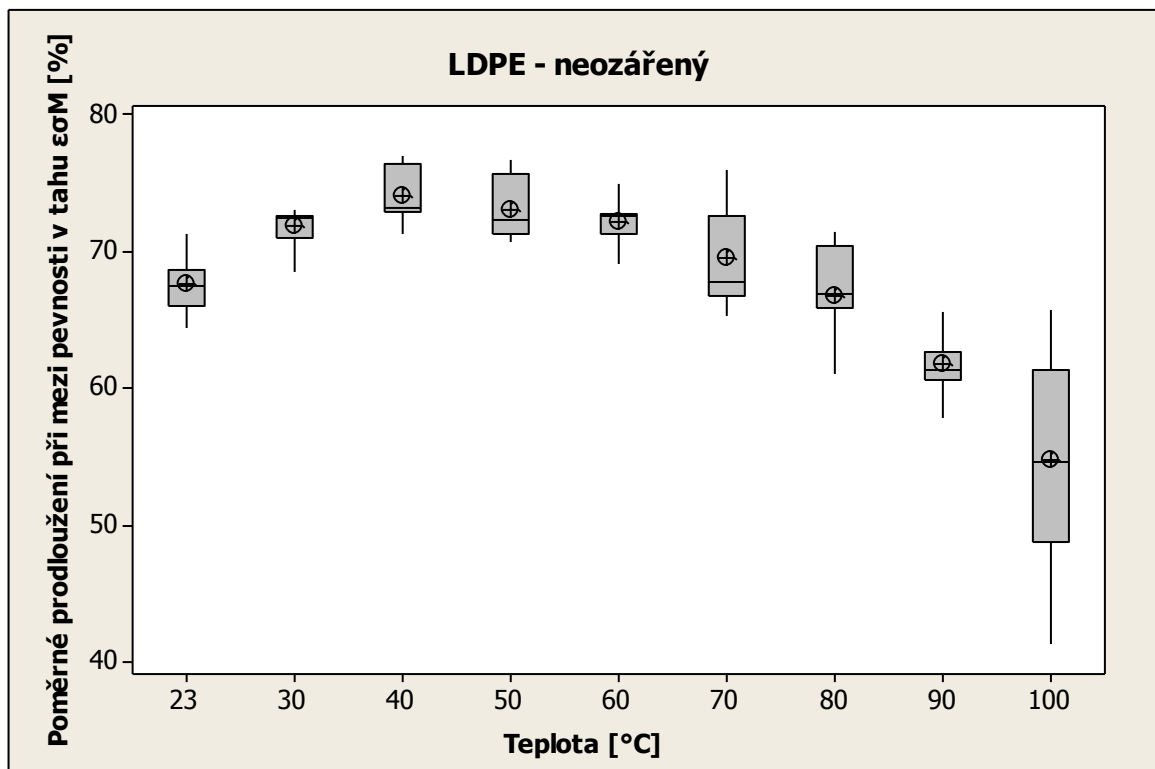
Obr. 22. Box-plotový diagram pro neozářený LDPE – mez pevnosti v tahu

8.1.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

Tab. 8. Naměřené hodnoty poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu neozářeného LDPE při různých teplotách

Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu - LDPE neozářený							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	67,63	1,95	2,89	66,10	67,50	68,70	2,60
30	71,87	1,23	1,71	71,00	72,50	72,70	1,70
40	74,13	1,93	2,60	72,90	73,20	76,50	3,60
50	73,11	2,25	3,08	71,40	72,40	75,80	4,40
60	72,28	1,62	2,24	71,30	72,70	72,80	1,50
70	69,55	3,34	4,80	66,80	67,80	72,70	5,90
80	66,82	3,42	5,11	65,90	67,00	70,50	4,60
90	61,80	2,23	3,60	60,60	61,40	62,70	2,10
100	54,84	8,25	15,05	48,80	54,60	61,40	12,60

Z (obr. 23.) je zřejmé, že se při měření poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu u neozářeného LDPE nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



Obr. 23. Box-plotový diagram pro neozářené LDPE – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

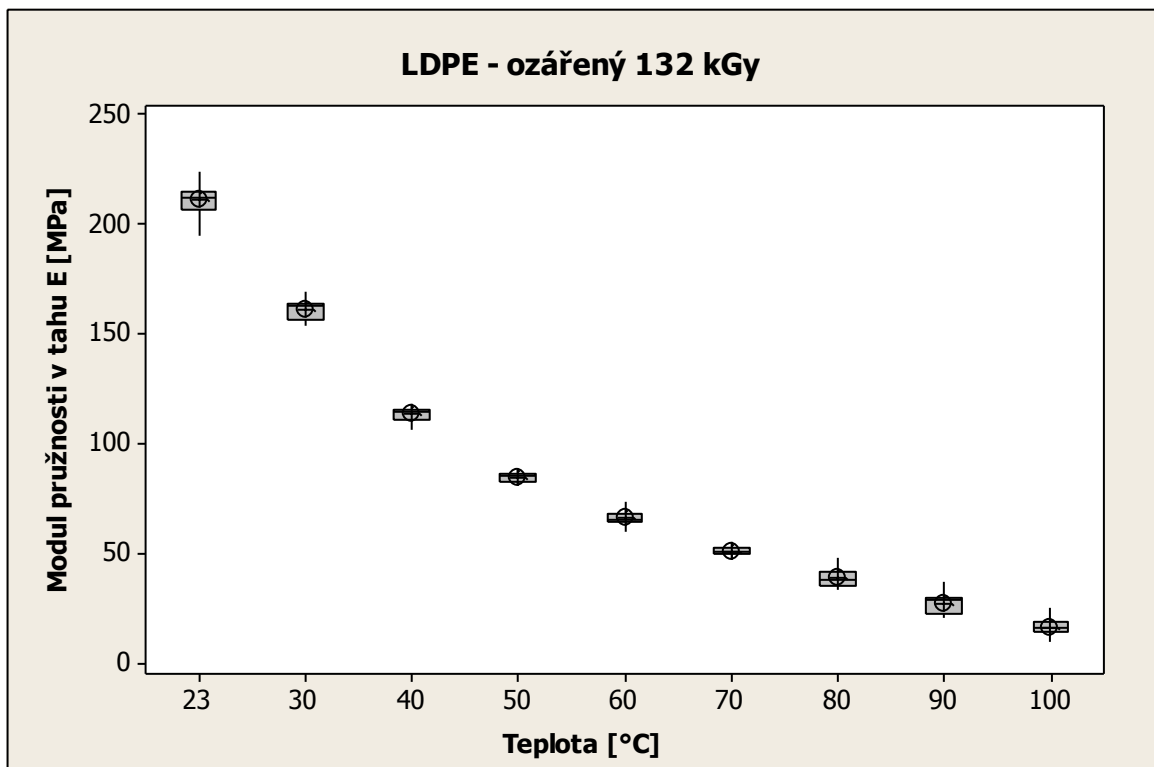
8.2 LDPE – ozářený 132 kGy

8.2.1 Modul pružnosti

Tab. 9. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu ozářeného LDPE 132 kGy při různých teplotách

Modul pružnosti v tahu - LDPE ozářený 132 kGy							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	211,13	7,83	3,71	207,00	212,00	215,00	8,00
30	161,67	4,43	2,74	157,00	163,00	164,00	7,00
40	113,67	3,66	3,22	111,00	115,00	116,00	5,00
50	85,31	2,07	2,43	83,30	85,60	86,60	3,30
60	66,69	3,12	4,68	65,10	66,10	68,50	3,40
70	51,68	2,35	4,55	50,50	51,70	52,70	2,20
80	39,18	4,05	10,35	35,70	38,70	42,00	6,30
90	27,97	5,01	17,93	23,00	29,00	30,50	7,50
100	17,01	3,90	22,93	14,70	16,50	19,30	4,60

Z (obr. 24.) je zřejmé, že se při měření modulu pružnosti v tahu u LDPE ozářeného 132 kGy nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



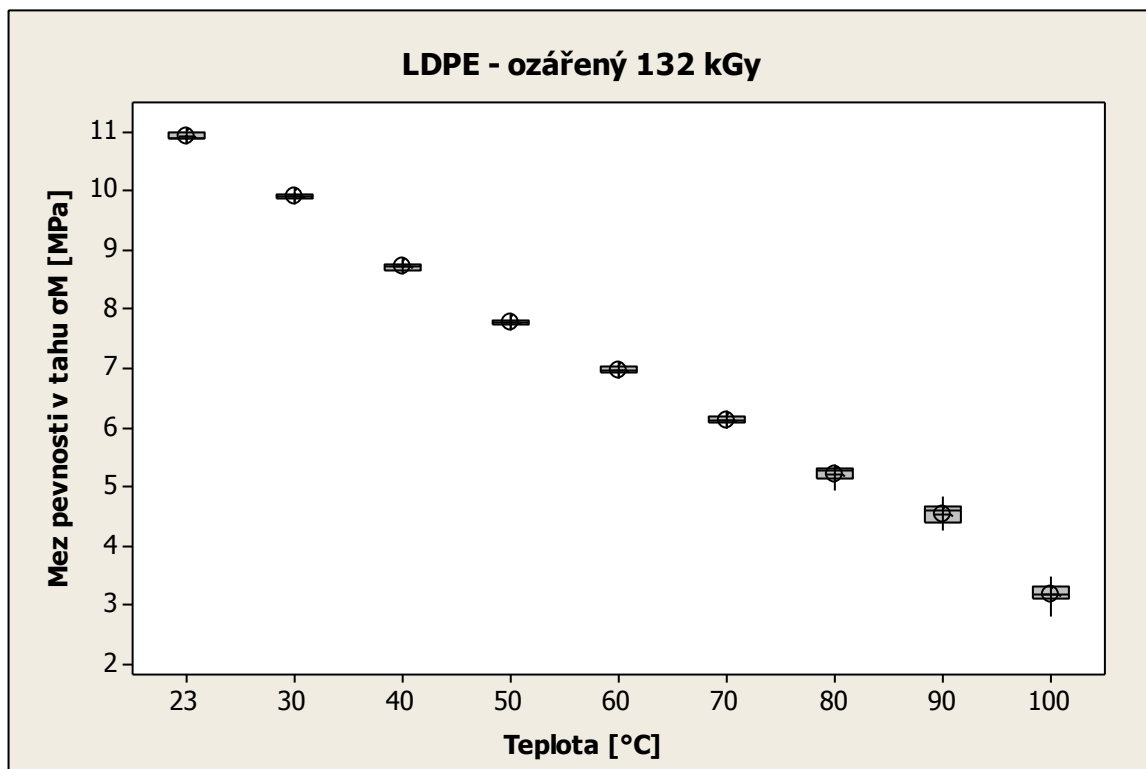
Obr. 24. Box-plotový diagram pro ozářené LDPE 132 kGy – modul pružnosti v tahu

8.2.2 Mez pevnosti v tahu

Tab. 10. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu ozářeného LDPE 132 kGy při různých teplotách

Mez pevnosti v tahu - LDPE ozářený 132 kGy							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	10,91	0,074	0,68	10,90	10,90	11,00	0,10
30	9,91	0,047	0,48	9,88	9,92	9,95	0,07
40	8,72	0,060	0,68	8,67	8,73	8,77	0,10
50	7,78	0,065	0,83	7,75	7,77	7,81	0,06
60	6,96	0,058	0,84	6,92	6,96	7,02	0,10
70	6,14	0,077	1,26	6,08	6,14	6,20	0,12
80	5,23	0,122	2,34	5,16	5,27	5,31	0,15
90	4,55	0,172	3,78	4,40	4,60	4,66	0,26
100	3,19	0,194	6,08	3,12	3,17	3,33	0,21

Z (obr. 25.) je zřejmé, že se při měření meze pevnosti v tahu u ozářeného LDPE 132 kGy nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



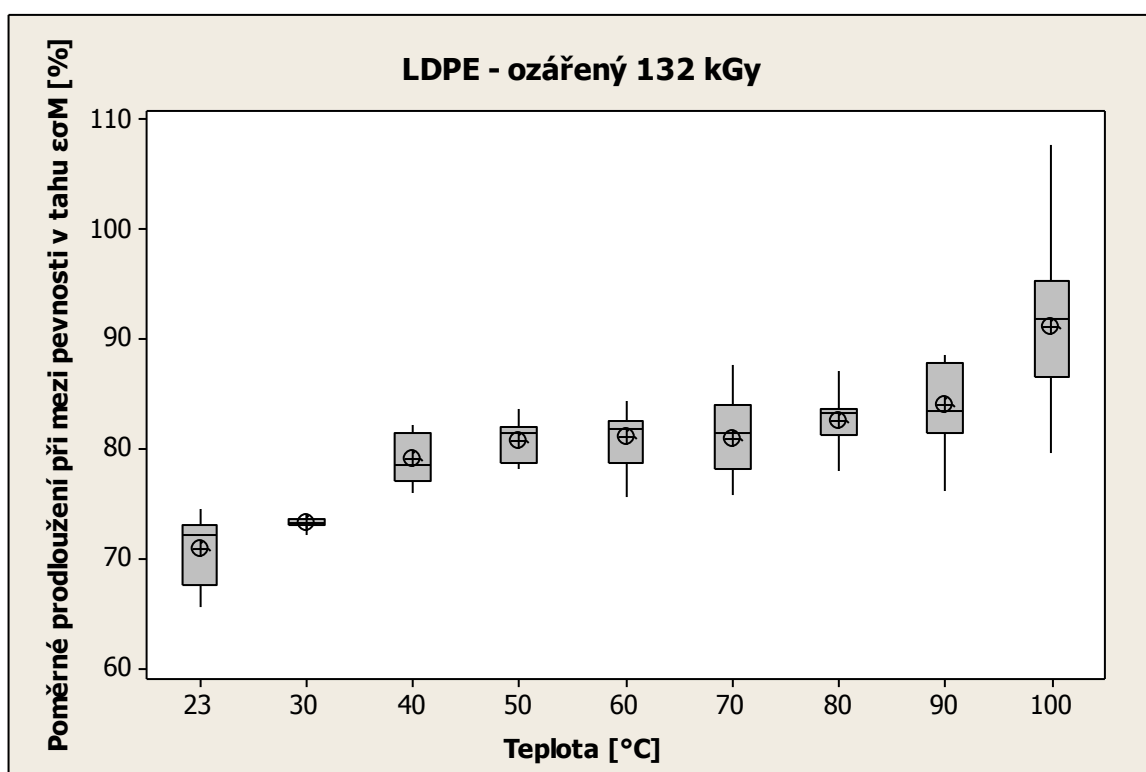
Obr. 25. Box-plotový diagram pro ozářené LDPE 132 kGy – mez pevnosti v tahu

8.2.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

Tab. 11. Naměřené hodnoty poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu ozářeného LDPE 132 kGy při různých teplotách

Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu - LDPE ozářený 132 kGy							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	70,99	2,89	4,07	67,80	72,30	73,20	5,40
30	73,33	0,51	0,70	73,20	73,40	73,80	0,60
40	79,13	2,19	2,77	77,10	78,70	81,60	4,50
50	80,79	1,72	2,12	78,90	81,50	82,10	3,20
60	81,11	2,41	2,97	78,80	81,90	82,60	3,80
70	81,01	3,57	4,40	78,20	81,60	84,00	5,80
80	82,70	2,78	3,36	81,40	83,30	83,70	2,30
90	84,07	3,67	4,36	81,60	83,50	87,90	6,30
100	91,23	7,64	8,38	86,60	91,90	95,30	8,70

Z (obr. 26.) je zřejmé, že se při měření poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu u ozářeného LDPE 132 kGy nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



Obr. 26. Box-plotový diagram pro ozářené LDPE 132 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

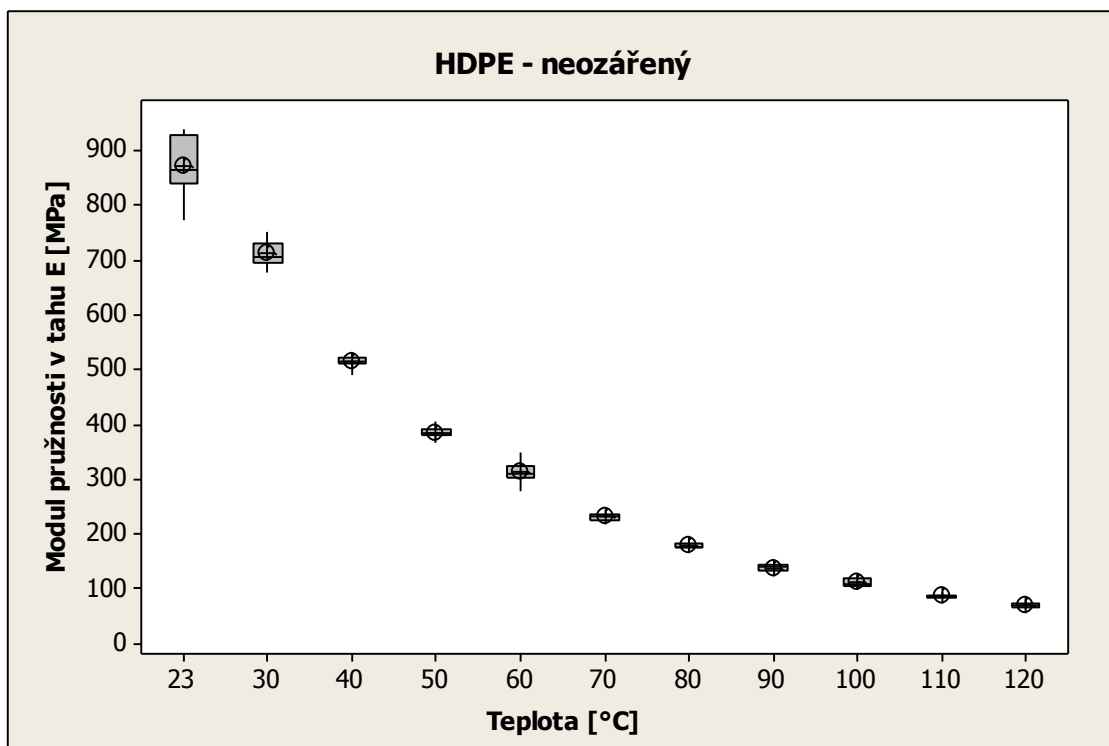
8.3 HDPE – neozářený

8.3.1 Modul pružnosti v tahu

Tab. 12. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu neozářeného HDPE při různých teplotách

Modul pružnosti v tahu - HDPE neozářený							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	873,1	48,9	5,6	840,0	863,0	929,0	89,0
30	712,7	22,2	3,1	695,0	706,0	731,0	36,0
40	514,7	11,5	2,2	510,0	515,0	524,0	14,0
50	386,3	10,1	2,6	382,0	385,0	392,0	10,0
60	313,7	17,3	5,5	305,0	309,0	323,0	18,0
70	232,8	7,2	3,1	227,0	233,0	238,0	11,0
80	179,1	4,9	2,7	175,0	178,0	184,0	9,0
90	139,1	6,5	4,7	133,0	140,0	144,0	11,0
100	111,7	7,2	6,4	106,0	110,0	119,0	13,0
110	88,0	3,5	4,0	85,2	86,9	89,2	4,0
120	70,9	5,0	7,0	66,9	70,3	74,2	7,3

Z (obr. 27.) je zřejmé, že se při měření modulu pružnosti v tahu u neozářeného HDPE nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



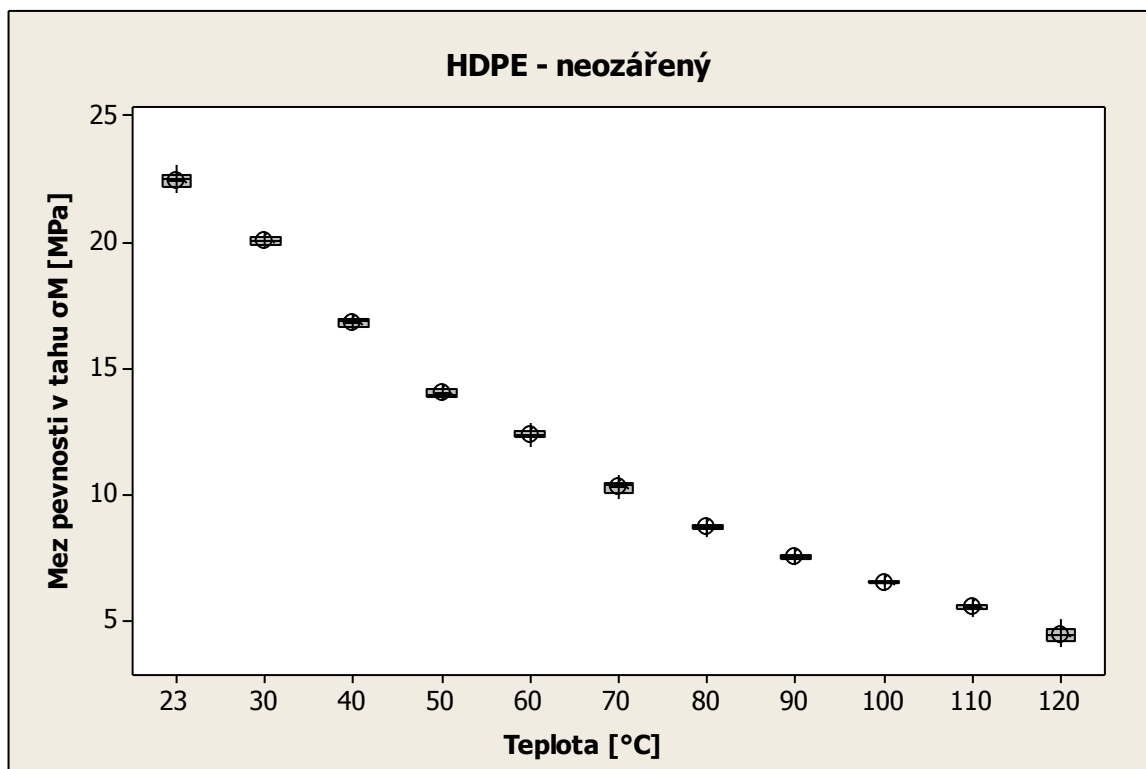
Obr. 27. Box-plotový diagram pro neozářený HDPE – modul pružnosti v tahu

8.3.2 Mez pevnosti v tahu

Tab. 13. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu neozářeného HDPE při různých teplotách

Mez pevnosti v tahu - HDPE neozářený							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	22,49	0,31	1,37	22,20	22,50	22,70	0,50
30	20,06	0,14	0,70	19,90	20,10	20,20	0,30
40	16,84	0,18	1,05	16,70	16,90	17,00	0,30
50	14,07	0,16	1,13	13,90	14,00	14,20	0,30
60	12,44	0,25	2,01	12,30	12,40	12,60	0,30
70	10,32	0,26	2,56	10,10	10,40	10,50	0,40
80	8,75	0,16	1,86	8,67	8,73	8,87	0,20
90	7,57	0,13	1,72	7,50	7,56	7,67	0,17
100	6,57	0,11	1,69	6,52	6,56	6,62	0,10
120	5,61	0,17	3,00	5,51	5,67	5,71	0,20
120	4,51	0,32	6,99	4,28	4,48	4,76	0,48

Z (obr. 28.) je zřejmé, že se při měření meze pevnosti v tahu u neozářeného HDPE nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



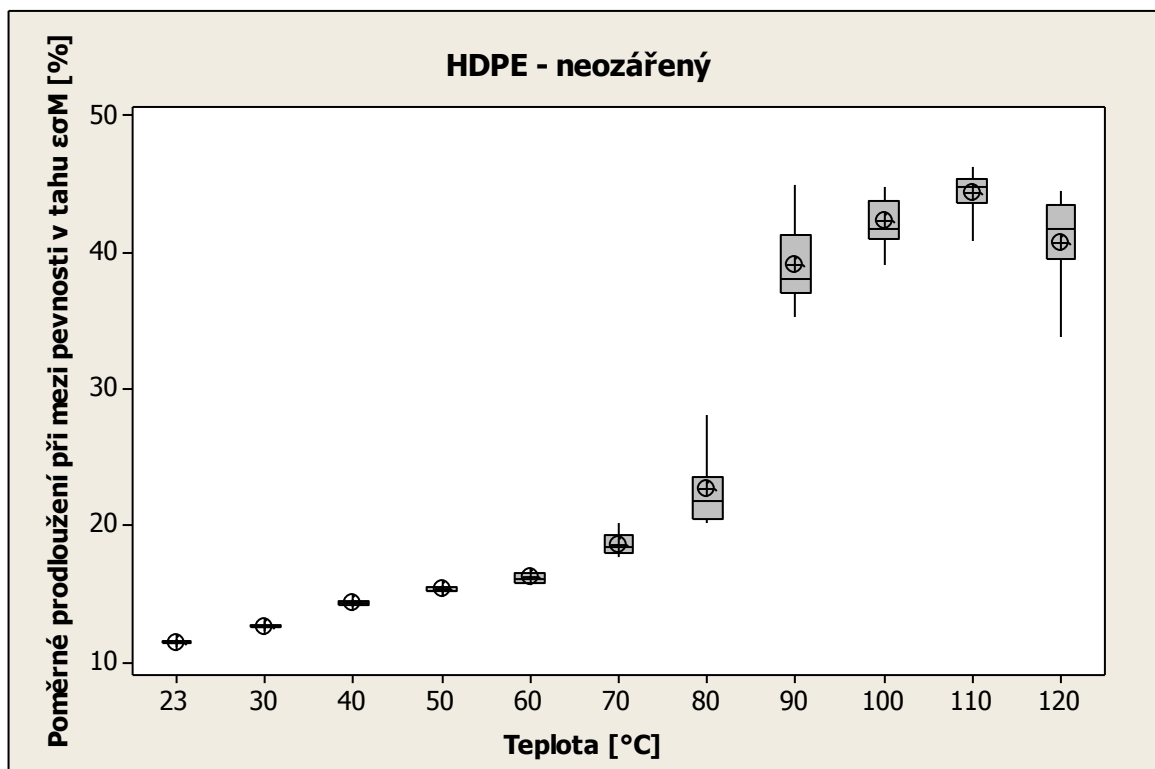
Obr. 28. Box-plotový diagram pro neozářené HDPE – mez pevnosti v tahu

8.3.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

Tab. 14. Naměřené hodnoty poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu neozářeného HDPE při různých teplotách

Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu - HDPE neozářený							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	11,507	0,162	1,41	11,4	11,6	11,6	0,2
30	12,66	0,188	1,49	12,6	12,6	12,8	0,2
40	14,333	0,154	1,08	14,2	14,3	14,5	0,3
50	15,353	0,223	1,45	15,2	15,3	15,6	0,4
60	16,2	0,439	2,71	15,8	16,1	16,6	0,8
70	18,647	0,837	4,49	18,0	18,4	19,3	1,3
80	22,747	2,601	11,43	20,5	21,9	23,6	3,1
90	39,087	2,739	7,01	37,1	38,1	41,3	4,2
100	42,307	1,606	3,8	41,1	41,8	43,8	2,7
110	44,453	1,453	3,27	43,6	44,9	45,4	1,8
120	40,707	3,365	8,27	39,6	41,7	43,5	3,9

Z (obr. 29.) je zřejmé, že se při měření poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu u neozářeného HDPE nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



Obr. 29. Box-plotový diagram pro neozářené HDPE – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

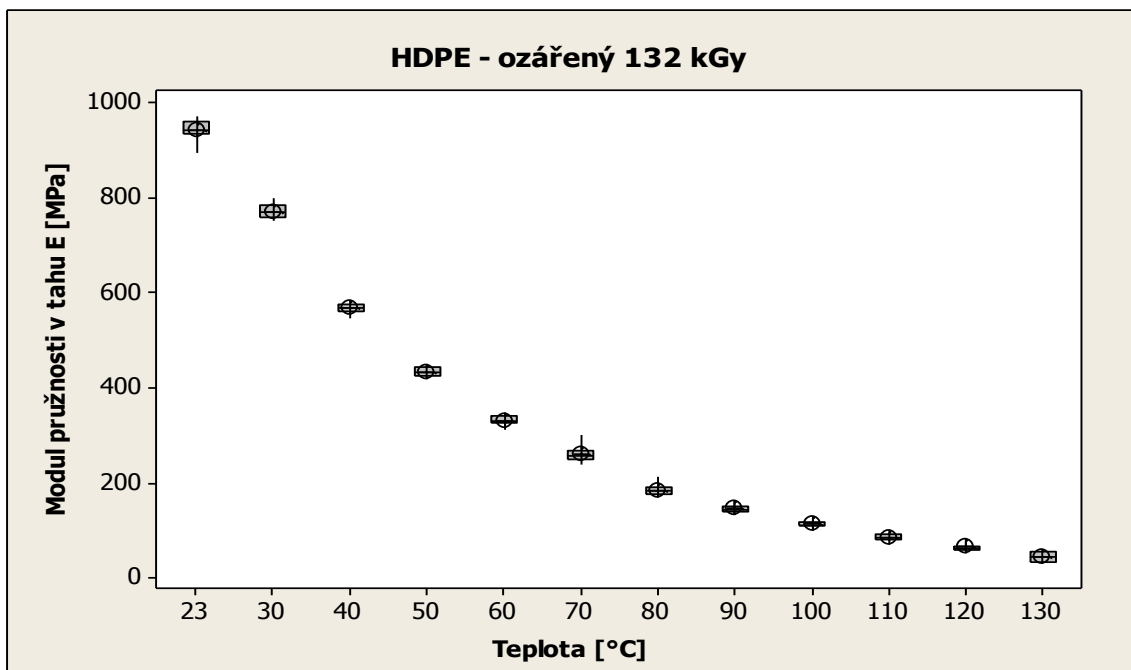
8.4 HDPE – ozářený 132 kGy

8.4.1 Modul pružnosti v tahu

Tab. 15. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu ozářeného HDPE 132 kGy při různých teplotách

Modul pružnosti v tahu - HDPE ozářený 132 kGy							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	941,9	19,5	2,1	933,0	943,0	960,0	27,0
30	771,1	14,4	1,9	760,0	770,0	784,0	24,0
40	567,7	10,5	1,8	563,0	570,0	576,0	13,0
50	434,5	7,9	1,8	427,0	434,0	443,0	16,0
60	332,0	9,9	3,0	326,0	331,0	341,0	15,0
70	259,9	15,0	5,8	250,0	257,0	270,0	20,0
80	185,8	10,2	5,5	177,0	183,0	191,0	14,0
90	146,3	8,0	5,5	141,0	146,0	150,0	9,0
100	114,2	4,9	4,3	112,0	113,0	119,0	7,0
110	86,6	5,5	6,4	82,7	85,0	92,4	9,7
120	66,0	6,8	10,3	61,2	63,6	68,4	7,2
130	45,8	11,1	24,2	36,0	45,5	56,0	20,0

Z (obr. 30.) je zřejmé, že se při měření modulu pružnosti v tahu u ozářeného HDPE 132 kGy nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



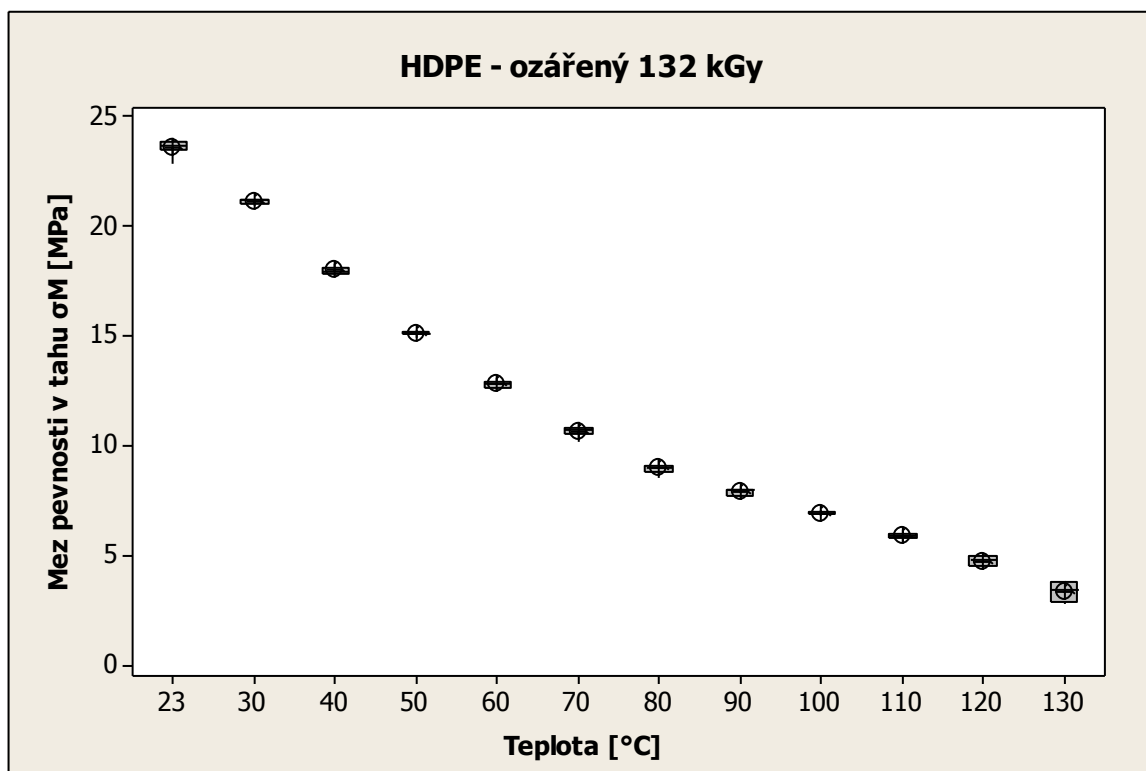
Obr. 30. Box-plotový diagram pro ozářené HDPE 132 kGy – modul pružnosti v tahu

8.4.2 Mez pevnosti v tahu

Tab. 16. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu ozářeného HDPE 132 kGy při různých teplotách

Mez pevnosti v tahu - HDPE ozářený 132 kGy							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	23,65	0,34	1,43	23,50	23,70	23,90	0,40
30	21,16	0,06	0,30	21,10	21,20	21,20	0,10
40	18,02	0,15	0,84	17,90	18,00	18,10	0,20
50	15,15	0,10	0,65	15,10	15,10	15,20	0,10
60	12,85	0,16	1,21	12,70	12,90	13,00	0,30
70	10,71	0,24	2,27	10,60	10,80	10,90	0,30
80	9,04	0,25	2,73	8,89	9,01	9,15	0,26
90	7,96	0,17	2,08	7,81	8,02	8,08	0,27
100	6,98	0,10	1,37	6,95	6,96	7,03	0,08
120	5,93	0,15	2,53	5,87	5,92	6,01	0,14
120	4,81	0,23	4,69	4,60	4,83	5,03	0,43
130	3,44	0,52	15,03	2,95	3,49	3,89	0,94

Z (obr. 31.) je zřejmé, že se při měření meze pevnosti v tahu u ozářeného HDPE 132 kGy nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



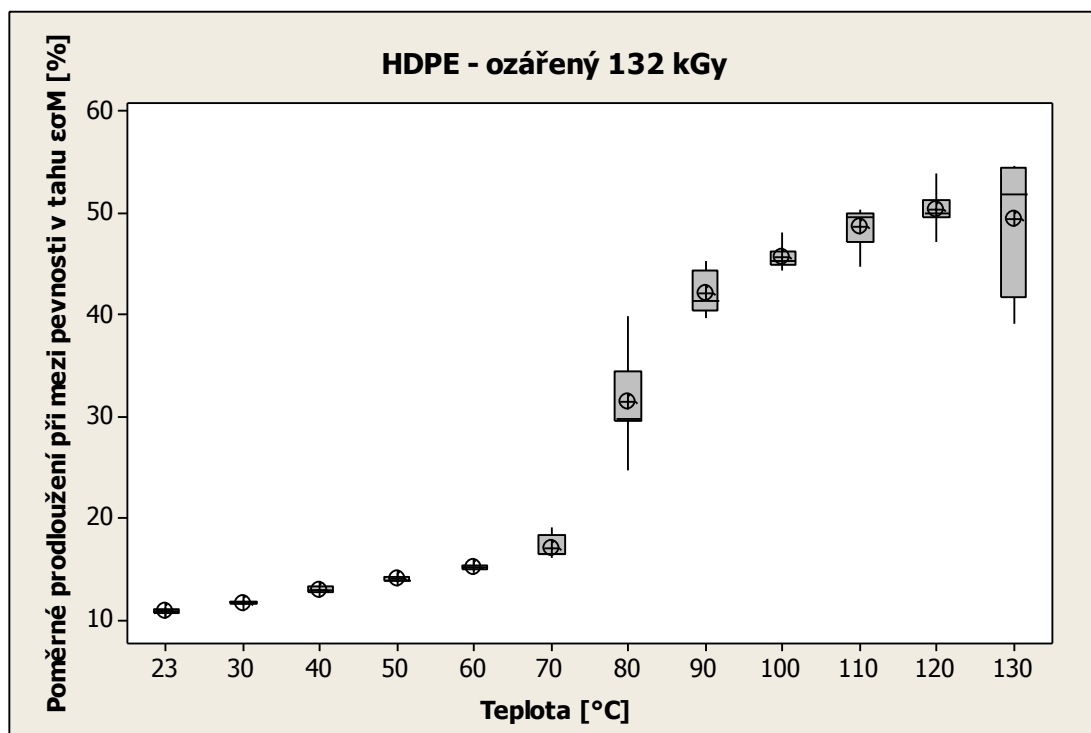
Obr. 31. Box-plotový diagram pro ozářené HDPE 132 kGy – mez pevnosti v tahu

8.4.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

Tab. 17. Naměřené hodnoty poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu ozářeného HDPE 132 kGy při různých teplotách

Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu - HDPE ozářený 132 kGy							
Teplota [°C]	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	V_x [%]	Q1 [MPa]	m [MPa]	Q3 [MPa]	IQR [MPa]
23	10,95	0,29	2,63	10,70	11,00	11,20	0,50
30	11,70	0,13	1,12	11,60	11,70	11,80	0,20
40	13,04	0,24	1,81	12,80	13,00	13,30	0,50
50	14,15	0,24	1,71	14,00	14,00	14,30	0,30
60	15,29	0,30	1,99	15,00	15,30	15,50	0,50
70	17,15	1,07	6,24	16,50	16,60	18,40	1,90
80	31,59	3,75	11,87	29,60	29,90	34,50	4,90
90	42,19	1,95	4,63	40,50	41,50	44,40	3,90
100	45,66	1,10	2,41	45,00	45,30	46,30	1,30
110	48,71	2,13	4,37	47,20	49,70	50,10	2,90
120	50,39	1,53	3,03	49,70	50,00	51,40	1,70
130	49,41	7,14	14,46	41,84	51,85	54,54	12,69

Z (obr. 32.) je zřejmé, že se při měření poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu u neozářeného LDPE nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



Obr. 32. Box-plotový diagram pro ozářené HDPE 132 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

9.1 Regresní analýza

Pro regresní analýzu jsme využili program Minitab 16. Podstatou této analýzy je stanovit nejlepší regresní model, neboli určit matematickou rovnici, která bude nejlépe popisovat danou závislost. K tomu, abychom posoudili, zda jsme proložili danou závislost nejlépe popisující funkcí, nám slouží statistická kritéria věrohodnosti regresního modelu. Mezi tyto kritéria patří především:

- **Koeficient determinace...R-Sq:** tento koeficient leží v intervalu $\langle 0;1 \rangle$, v našem případě je vyjádřen v procentech. Pokud regresní křivka přesně vystihuje všechny body $[x_i, y_i]$, tj. všemi body $[x_i, y_i]$ prochází, je koeficient determinace roven jedné. V praktických příkladech se pokládá koeficient determinace za dostatečně vysoký, když je v horní čtvrtině intervalu $\langle 0;1 \rangle$, tedy přesahuje 0,75.
- **Střední kvadratická chyba predikce...S:** čím je S menší, tím je predikční schopnost navrženého modelu lepší.

Pomocí derivace regresní funkce můžeme teoreticky určit extrémní hodnotu měřeného parametru (maximum, minimum). V našem případě jsme ji využili, pro hledání teploty, která odpovídá maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu.

9.1.1 LDPE – neozářený

Koeficient determinace i střední kvadratická chyba predikce vykazují relativně příznivé hodnoty při tomto regresním modelu.

Vytvořením kvadratické spojnice trendu jsme získali rovnici regrese:

$$y = 56,49 + 0,6964x - 0,007126x^2 \quad (15)$$

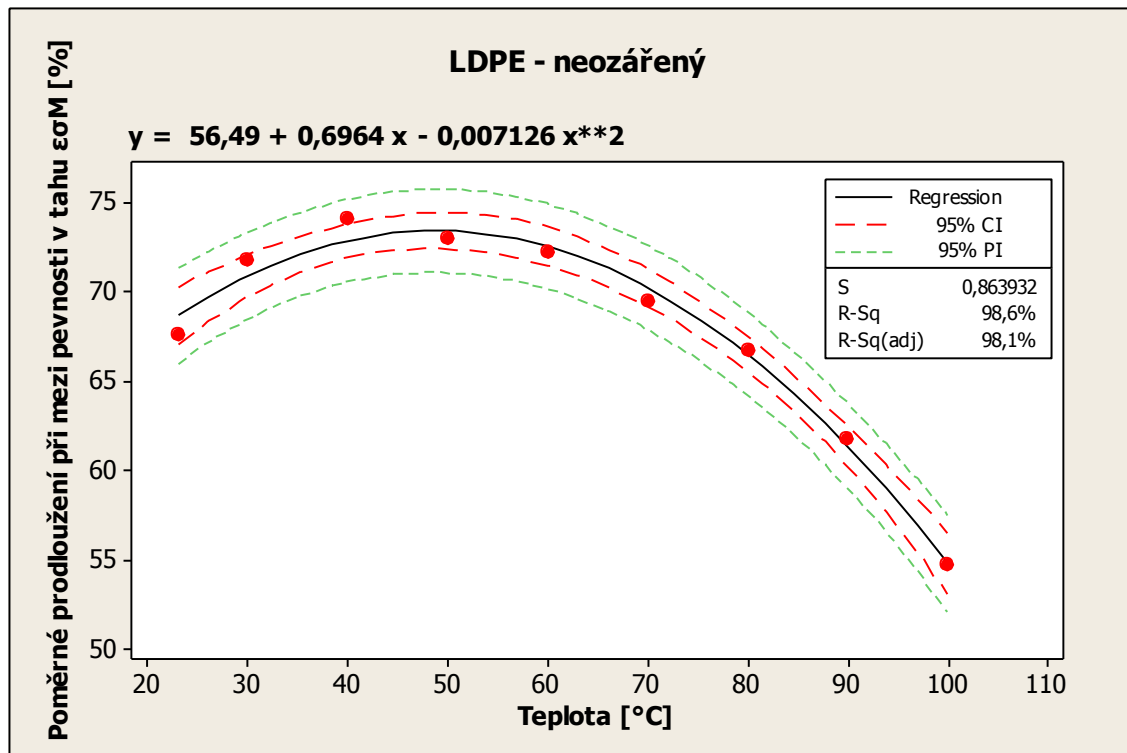
Derivací dostaneme:

$$x_{opt} = \frac{0,6964}{2 \cdot 0,007126} = 48,9 \quad (16)$$

Můžeme tedy říci, že teoreticky vypočítaná hodnota teploty, která odpovídá maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu u neozářeného LDPE je **48,9 °C**.

Dosazením x_{opt} do regresní rovnice získáváme teoreticky maximální poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu, což je **73,5 %**.

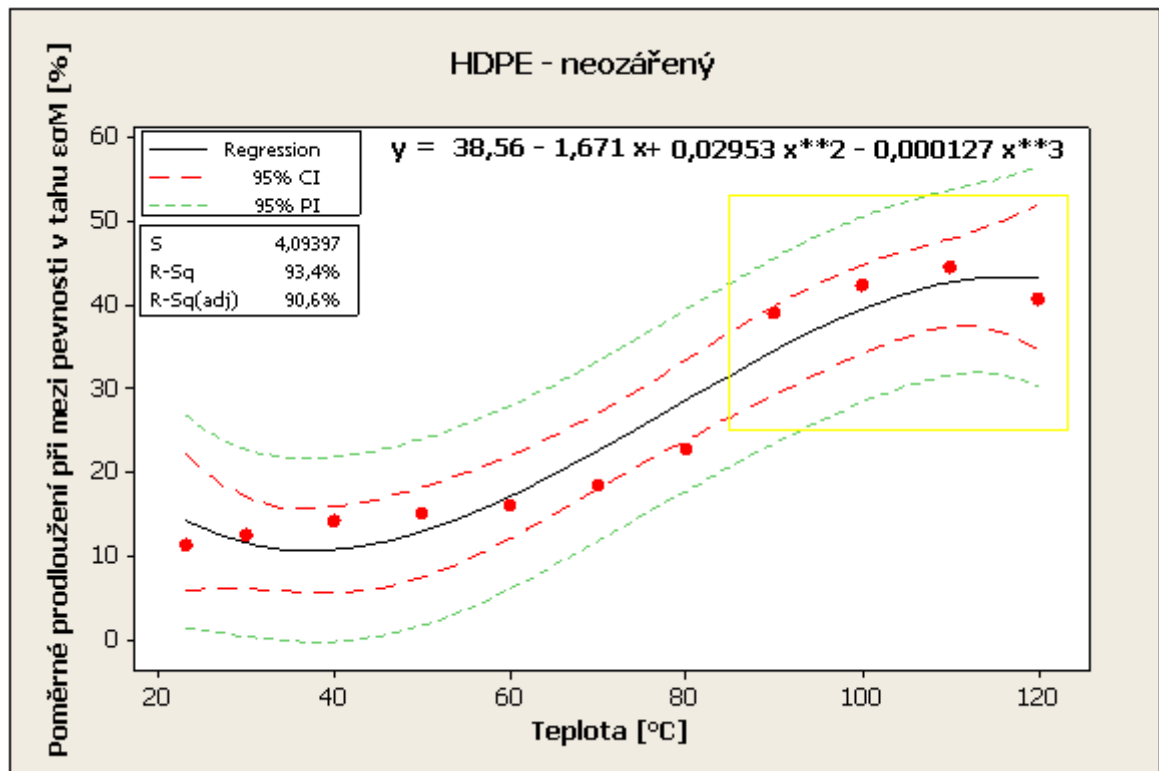
$$y = 56,49 + 0,6964 \cdot 48,86 - 0,007126 \cdot 48,86^2 = 73,5 \quad (17)$$



Obr. 33. Regresní analýza závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti na teplotě – neozářený LDPE

9.1.2 HDPE - neozářený

Závislost poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě u neozářeného HDPE nejlépe odpovídala kubickému regresnímu modelu (obr. 34.) Koeficient determinace nabýval dobré hodnoty a to 93,4 %. Naopak střední kvadratická chyba predikce vykazovala vysokou hodnotu 4,09 a z toho důvodu jsme pro zjištění lokálního maxima využili pouze vybrané části naměřených hodnot. Při použití kvadratického regresního modelu této části naměřených dat nabývala střední kvadratická chyba predikce o poznání příznivější hodnotu 0,86.



Obr. 34. Kubický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě – neozářený HDPE

Vytvořením kvadratické spojnice trendu u vybrané části naměřených hodnot jsme získali rovnici regrese:

$$y = -155,5 + 3,727x - 0,01742x^2 \quad (18)$$

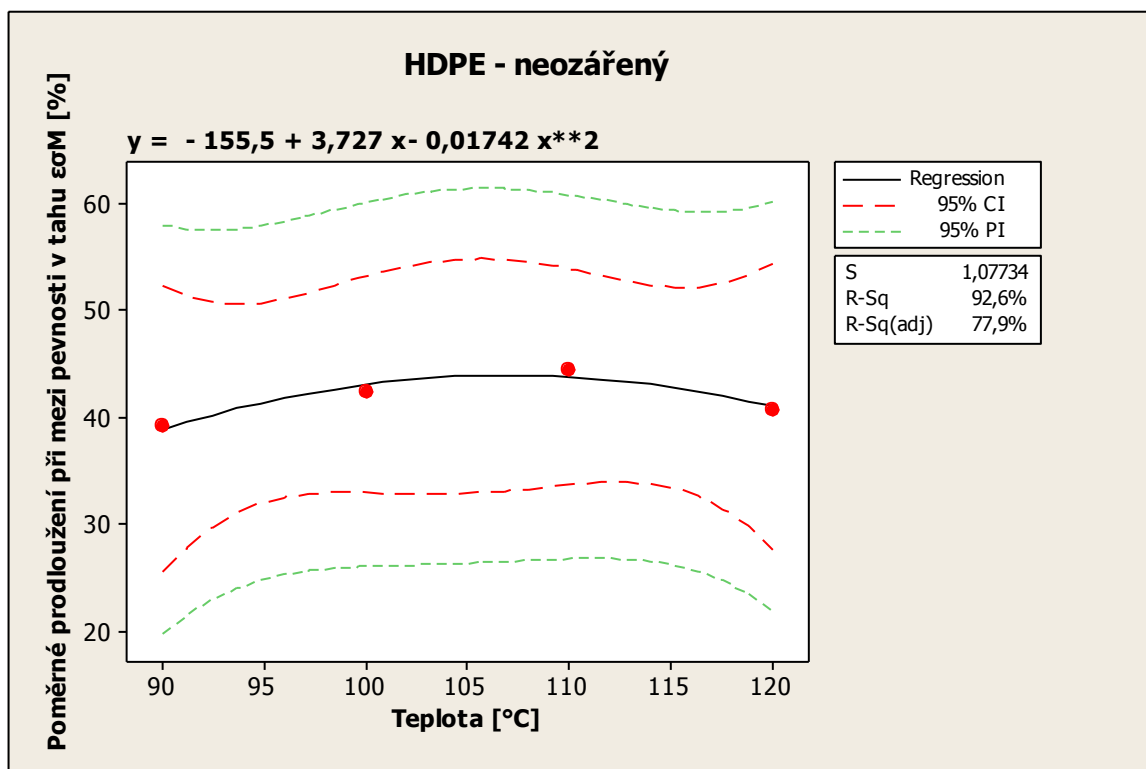
Derivací dostaneme

$$x_{opt} = \frac{3,727}{2 \cdot 0,01742} = 106,9 \quad (19)$$

Můžeme tedy říci, že teoreticky vypočítaná hodnota teploty, která odpovídá maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu u neozářeného HDPE je **106,9 °C**.

Dosazením x_{opt} do regresní rovnice získáváme teoreticky maximální poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu, což je **43,8 %**.

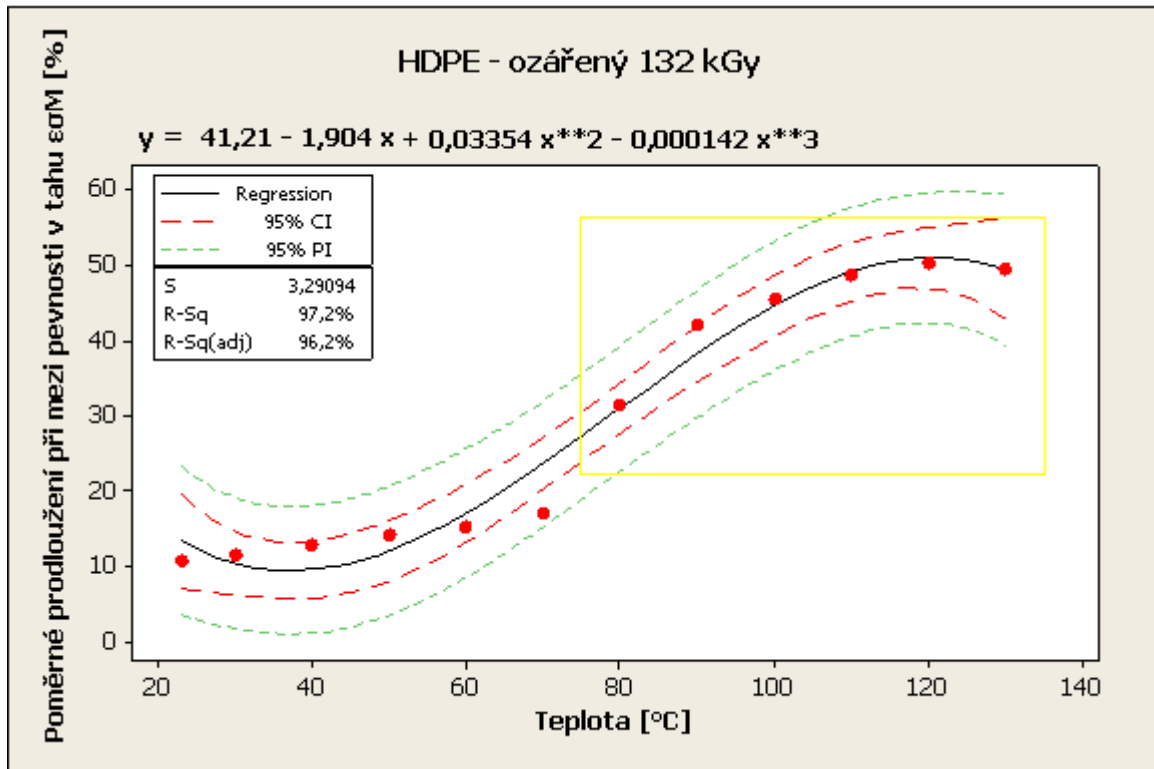
$$y = -155,5 + 3,727 \cdot 106,97 - 0,01742 \cdot 106,97^2 = 43,8 \quad (20)$$



Obr. 35. Regresní analýza závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti na teplotě – neozářený HDPE

9.1.3 HDPE – ozářený 132 kGy

Závislost poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě u ozářeného HDPE 132 kGy nejlépe odpovídala kubickému regresnímu modelu (obr. 36.) Koefficient determinace nabýval dobré hodnoty a to 97,2%. Naopak střední kvadratická chyba predikce vykazovala vysokou hodnotu 3,29 a z toho důvodu jsme pro zjištění lokálního maxima využili pouze vybrané části naměřených hodnot. Při použití kvadratického regresního modelu této části naměřených dat nabývala střední kvadratická chyba predikce o poznání příznivější hodnotu 1,24.



Obr. 36. Kubický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě – ozářený HDPE 132 kGy

Vytvořením kvadratické spojnice trendu u vybrané části naměřených hodnot jsme získali rovnici regrese:

$$y = -115,0 + 2,772x - 0,01161x^2 \quad (21)$$

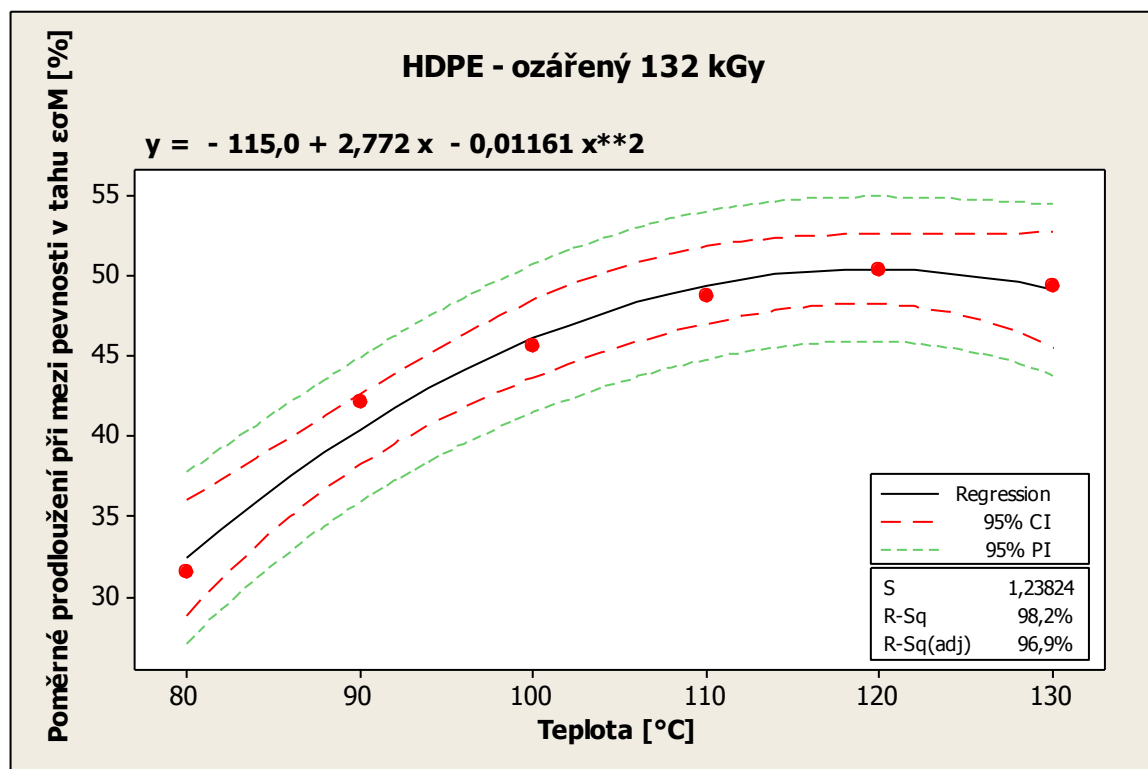
Derivací dostaneme

$$x_{opt} = \frac{2,772}{2 \cdot 0,01161} = 119,4 \quad (22)$$

Můžeme tedy říci, že vypočítaná hodnota teploty, která odpovídá maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu u ozářeného HDPE 132 kGy je **119,4 °C**.

Dosazením x_{opt} do regresní rovnice získáváme teoreticky maximální poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu, což je **50,5 %**.

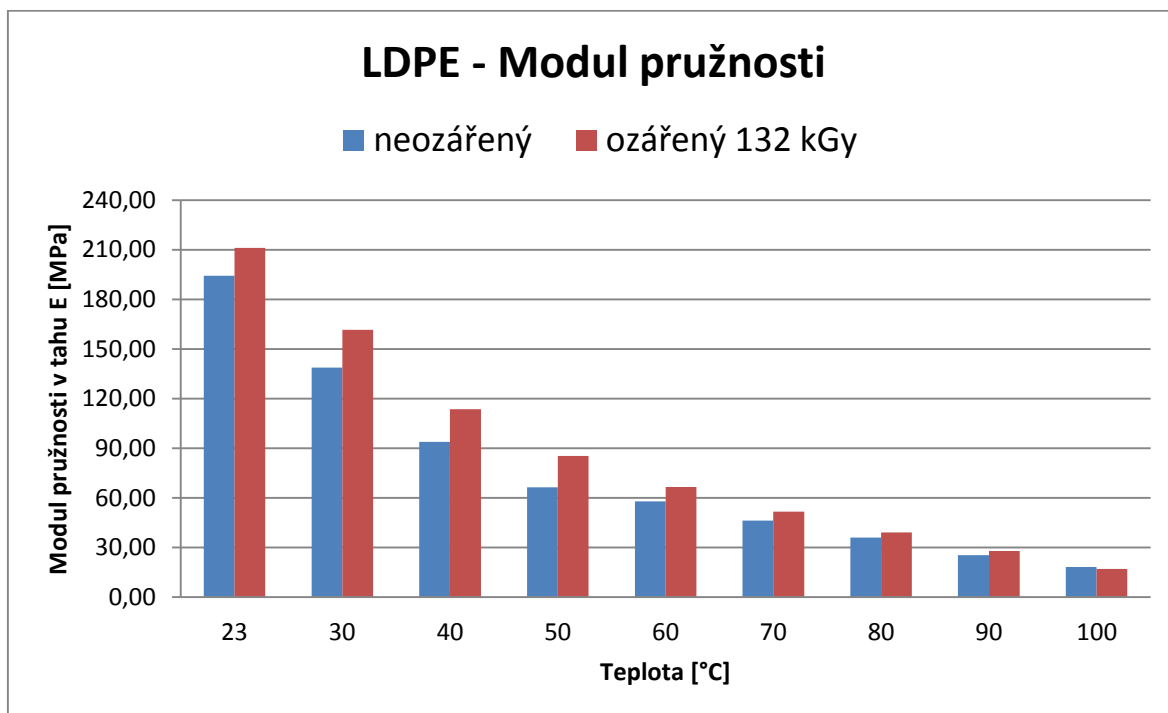
$$y = -115,0 + 2,772 \cdot 119,38 - 0,01161 \cdot 119,38^2 = 50,5 \quad (23)$$



Obr. 37. Regresní analýza závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti na teplotě – ozářený HDPE 132 kGy

9.2 Srovnání vlastností neozářeného a ozářeného LDPE

9.2.1 Modul pružnosti v tahu

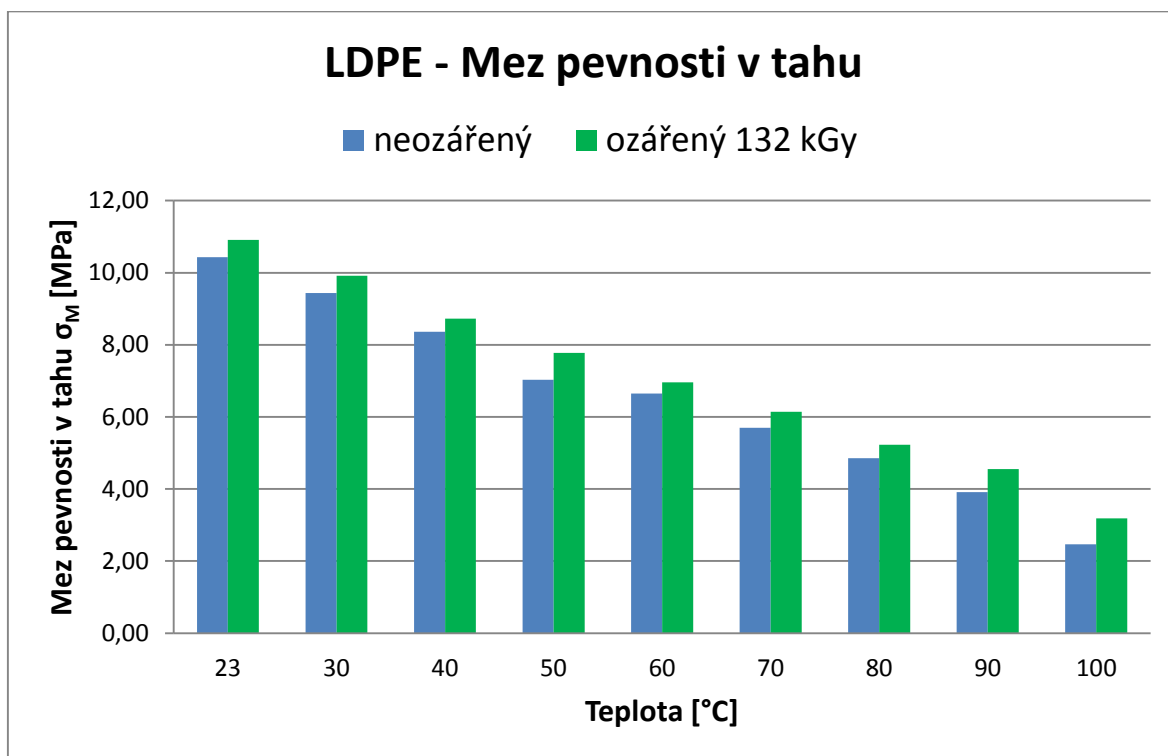


Obr. 38. Srovnání modulu pružnosti v tahu neozářeného a ozářeného LDPE při různých teplotách

Graf znázorňuje změnu modulu pružnosti u ozářeného a neozářeného LDPE v širokém rozmezí teplot od pokojové teploty (23°C) až po teplotu 100°C. Modul pružnosti v tahu jak u neozářeného LDPE tak i u ozářeného LDPE 132 kGy klesal s rostoucí teplotou exponenciálně. V případě neozářeného LDPE tomu bylo ze 194,3 MPa při pokojové teplotě až na 18,2 MPa při teplotě 100°C. U ozářeného LDPE modul pružnosti klesl z 211,1 MPa při pokojové teplotě až na 17,1 MPa při teplotě 100 °C.

Největší změna hodnoty modulu pružnosti v tahu před ozářením a po něm, byla naměřena při teplotě 50°C a to o 23% ve prospěch ozářeného LDPE. Nemenší změna byla naměřena při pokojové teplotě, kde změna hodnoty modulu pružnosti v tahu před a po ozáření byla pouze 8%.

9.2.2 Mez pevnosti v tahu

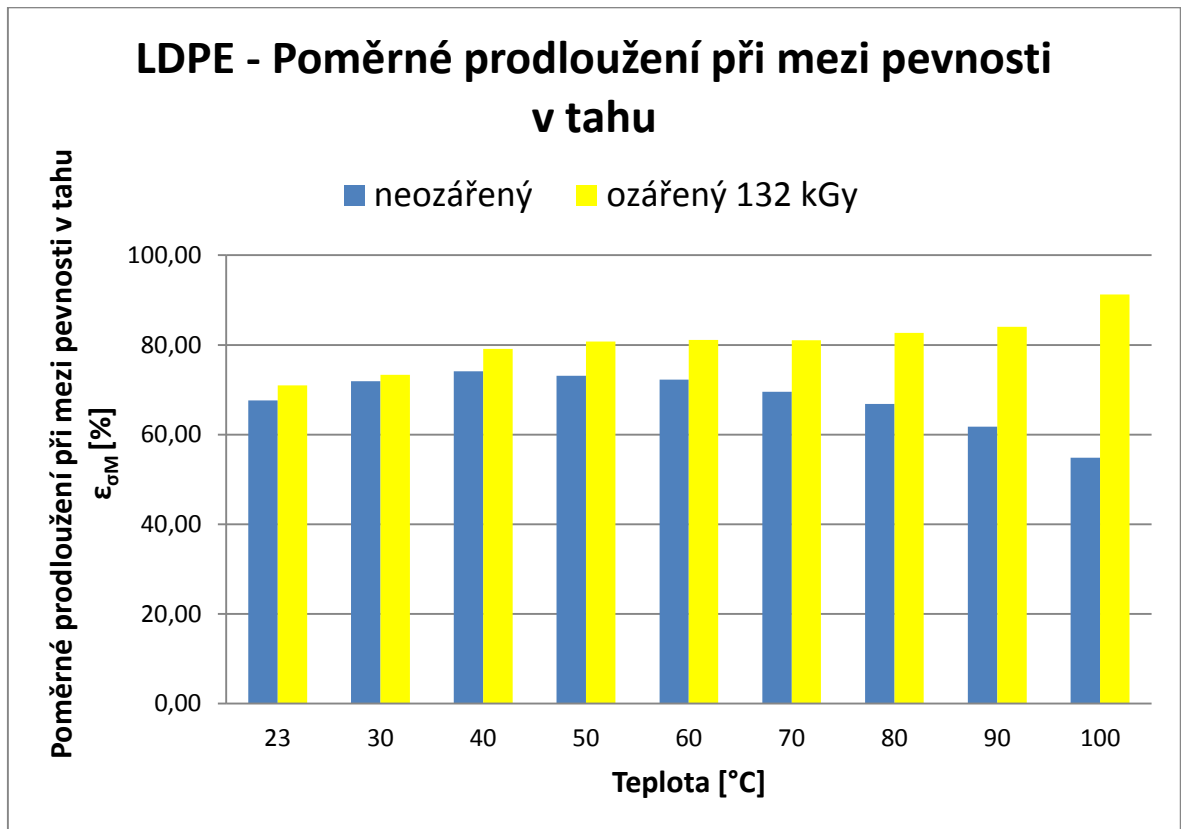


Obr. 39. Srovnání meze pevnosti v tahu neozářeného a ozářeného LDPE při různých teplotách

Stejně jako modul pružnosti v tahu, tak i mez pevnosti v tahu jak u neozářeného LDPE tak i u ozářeného LDPE 132 kGy klesala s rostoucí teplotou. Zatím co modul pružnosti klesal exponenciálně, mez pevnosti klesala spíše lineárně. V případě neozářeného LDPE tomu bylo z 10,43 MPa při pokojové teplotě až na 2,46 MPa při teplotě 100°C. Co se týká ozářeného LDPE, tam klesala z 10,91 MPa při pokojové teplotě až na 3,19MPa taktéž při teplotě 100 °C.

Největší změna meze pevnosti v tahu před ozářením a po něm, byla zaznamenána při teplotě 100°C a to o necelých 23% ve prospěch ozářeného LDPE. Při pokojové teplotě tomu bylo jen o necelých 5%.

9.2.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu

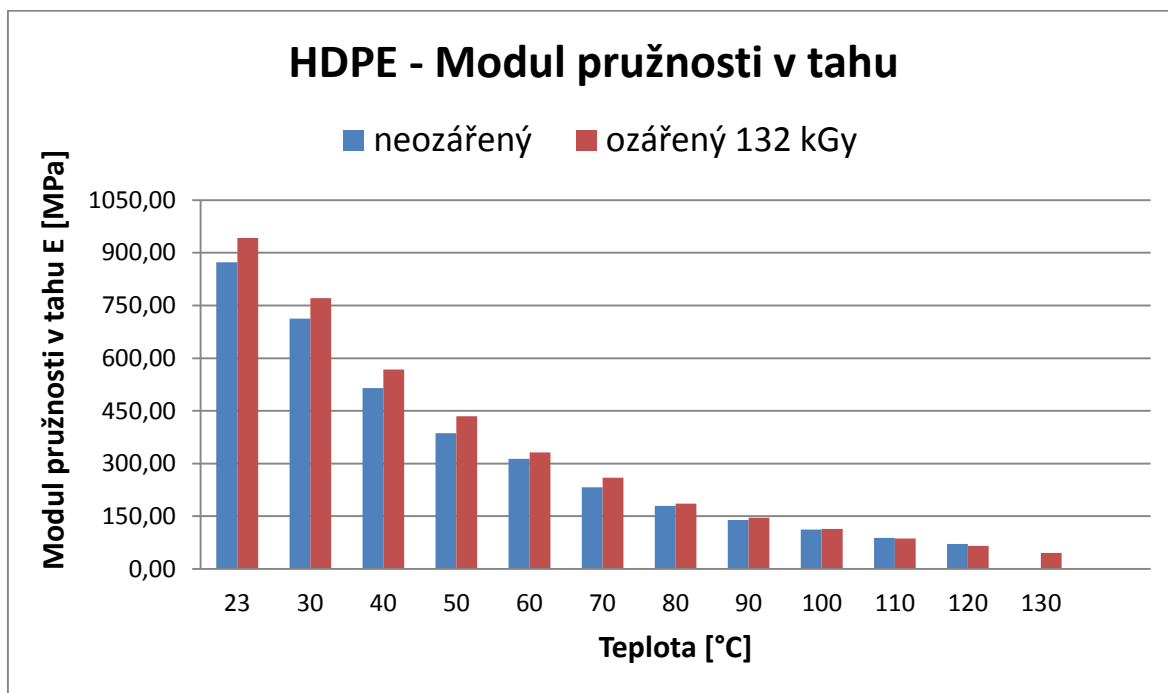


Obr. 40. Srovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu neozářeného a ozářeného LDPE při různých teplotách

Zatím co změna modulu pružnosti i meze pevnosti u LDPE měla podobný průběh před i po ozáření, u změny poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu byly průběhy zcela odlišné. Poměrné prodloužení u neozářeného LDPE nejdříve stoupalo z hodnoty 67,6% při pokojové teplotě na hodnotu 74,1% při teplotě 40°C a následně mělo klesající tendenci až na hodnotu 54,8% při maximální měřené teplotě 100°C. Naproti tomu u ozářeného LDPE mělo poměrné prodloužení rostoucí tendenci v celém měřeném rozsahu teplot z hodnoty 70,9% až na hodnotu 91,2%.

9.3 Srovnání vlastností neozářeného a ozářeného HDPE

9.3.1 Modul pružnosti v tahu

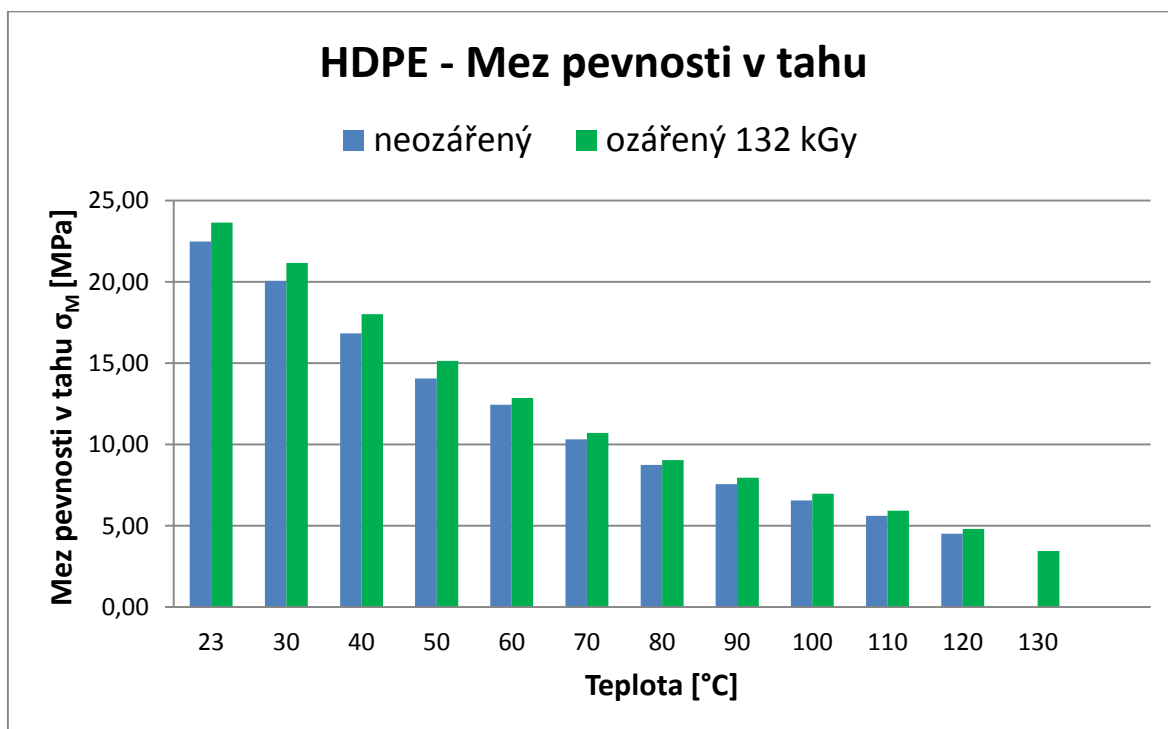


Obr. 41. Srovnání modulu pružnosti v tahu neozářeného a ozářeného HDPE při různých teplotách

Graf znázorňuje změnu modulu pružnosti u ozářeného a neozářeného HDPE v širokém rozmezí teplot od pokojové teploty (23°C) až po teplotu 130°C. Modul pružnosti v tahu jak u neozářeného HDPE tak i u ozářeného HDPE 132 kGy klesal s rostoucí teplotou exponenciálně. V případě neozářeného HDPE tomu bylo z 873,1MPa při pokojové teplotě až na 70,9 MPa při teplotě 120°C (neozářené zkušební tělíska z HDPE nebyly při teplotě 130°C měřitelné). Co se týká ozářeného HDPE, modul pružnosti klesal z hodnoty 941,9 MPa při pokojové teplotě až na 45,8 MPa při teplotě 130 °C.

Největší změna modulu pružnosti v tahu po ozáření HDPE 132 kGy byla zaznamenána při teplotě 50°C o 11%. Při pokojové teplotě tomu bylo o 7%.

9.3.2 Mez pevnosti v tahu

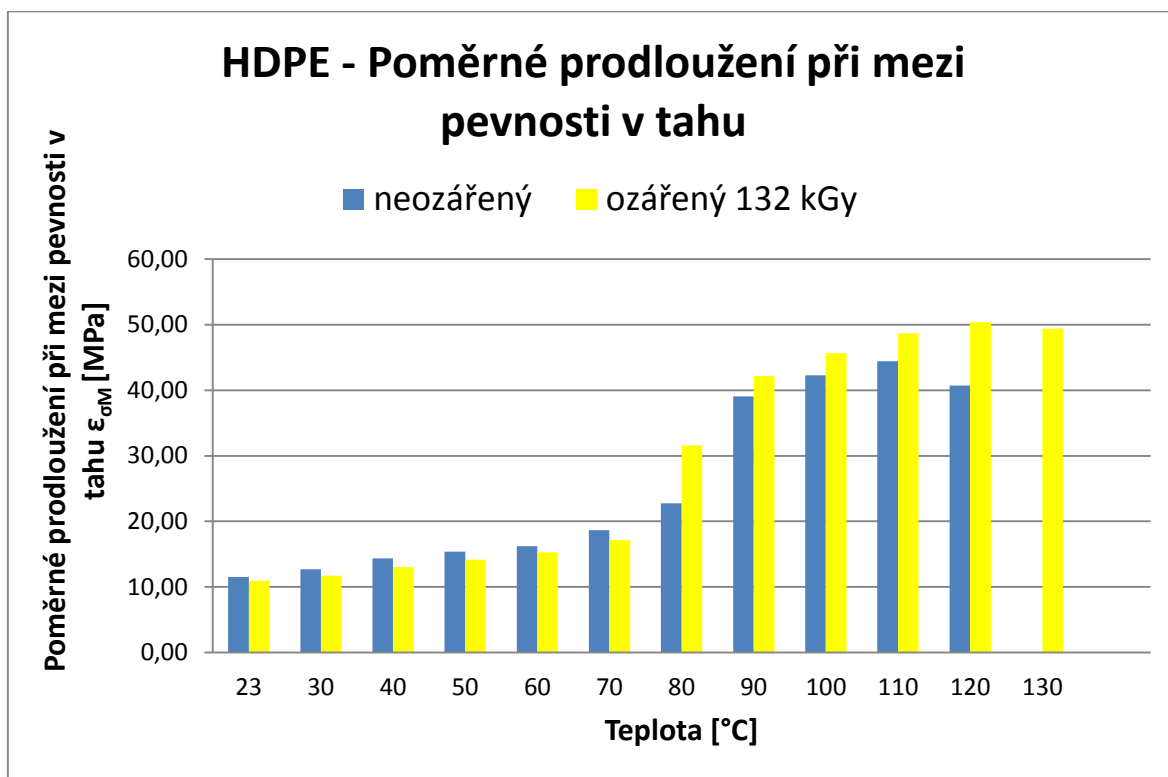


Obr. 42. Srovnání meze pevnosti v tahu neozářeného a ozářeného HDPE při různých teplotách

Stejně jako modul pružnosti v tahu, tak i mez pevnosti v tahu jak u neozářeného HDPE tak i u ozářeného HDPE 132 kGy klesala s rostoucí teplotou exponenciálně. V případě neozářeného HDPE tomu bylo z 22,5 MPa při pokojové teplotě až na 4,5MPa při teplotě 100°C. Co se týká ozářeného HDPE, mez pevnosti klesala z 23,7MPa při pokojové teplotě až na 3,4 MPa při teplotě 130 °C.

Největší změna meze pevnosti v tahu před ozářením a po něm, byla zaznamenána při teplotě 50°C a to o necelých 8% ve prospěch ozářeného HDPE. Při pokojové teplotě tomu bylo jen o necelých 5%.

9.3.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu



Obr. 43. Srovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu neozářeného a ozářeného LDPE při různých teplotách

Z grafu je zřejmé, že nejdříve se zvyšující se teplotou rostlo lineárně poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu jak u neozářeného tak i u ozářeného HDPE. Přičemž neozářené HDPE dosahovalo vyšších hodnot. Zlom nastal kolem teploty 80 °C, od této teploty dosahovalo vyšších hodnot poměrného prodloužení při mezi pevnosti výhradně ozářené HDPE. Rostoucí trend poměrného prodloužení při zvyšování teploty pokračoval u neozářeného HDPE do hodnoty 44,5% při teplotě 110 °C, u ozářeného HDPE do hodnoty 50,4 % při teplotě 120 °C. Po dosažení maximální hodnoty poměrné prodloužení opět klesalo jak u neozářeného tak i u ozářeného HDPE. Teploty, které odpovídaly maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu, byly již dříve vypočítány pomocí regresní analýzy.

Největší difference poměrného prodloužení mezi neozářeným a ozářeným HDPE byla při teplotě 80 °C a to 28% ve prospěch ozářeného HDPE.

ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo zkoumání vlivu ionizujícího beta záření na mechanické vlastnosti vybraných polymerů HDPE a LDPE v širokém rozmezí teplot měření. Zkoumané mechanické vlastnosti byly modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu, získané pomocí tahové zkoušky. Rozsah teplot při měření byl zvolen od pokojové teploty (23°C) až po maximální teplotu, kdy byla zkušební tělíska ještě měřitelná.

Z výsledků měření vyplývá, že modul pružnosti i mez pevnosti u LDPE i HDPE, ozářených i neozářených zkušebních tělísek měl klesající tendenci se stoupající teplotou měření, přičemž u ozářených zkušebních tělísek bylo naměřeno vyšších hodnot ve všech případech. Největší difference modulu pružnosti před a po ozáření u obou materiálů byla při teplotě 50°C ve prospěch ozářených zkušebních tělísek. U meze pevnosti v tahu byla naměřena největší difference při teplotě 100°C u LDPE a 50°C u HDPE taktéž ve prospěch ozářených vzorků. Z toho můžeme usuzovat, že ozáření má největší příznivý vliv na modul pružnosti i mez pevnosti v tahu u obou materiálů při vyšších teplotách měření.

Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu se oproti modulu pružnosti i mezi pevnosti chovalo při zvyšujících se teplotách zcela odlišně. U neozářeného LDPE mělo nejdříve rostoucí a následně klesající tendenci. Pro zjištění teploty při maximálním poměrném prodloužení byla využita regresní analýza. U ozářeného LDPE mělo poměrné prodloužení rostoucí tendenci v celém rozsahu teplot a dosahovalo vyšších hodnot než u neozářeného LDPE. Největší difference poměrného prodloužení před a po ozáření LDPE byla při teplotě 100°C.

Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu u ozářeného i neozářeného HDPE mělo rostoucí trend se zvyšující se teplotou měření. Z výsledků měření je patrné i maximum měřené veličiny, po kterém následoval klesající trend. Pro zjištění teploty při maximálním poměrném prodloužení byla využita regresní analýza, jak u ozářeného tak i u neozářeného HDPE. Vyšších hodnot poměrného prodloužení nejdříve dosahovalo neozářené HDPE a to až do teploty 80 °C, za vyšších teplot dosahovalo vyšších hodnot ozářené HDPE.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Makromolekulární látky (polymery)* [online]. [cit. 2014-01-22]. Dostupné z WWW: <http://www.gvi.cz/files/chemie/mml.pdf>
- [2] ŠMACH, Petr. *Vliv množství polybutenu na mikrotvrdotost PP*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [3] ZMEKOVÁ, Marcela. *Mikrotvrdotost polymerov*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [4] MLEZIVA, Josef. *Polymery: struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993, 528 s. ISBN 80-901570-4-1.
- [5] MACOUREK, Jiří. *Vliv ozáření na mechanické a termomechanické vlastnosti LDPE a HDPE: diplomová práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2010. Vedoucí diplomové práce: Miroslav Maňas.
- [6] OVŠÍK, Martin. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů: disertační práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2013.
- [7] DUCHÁČEK, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. VŠCHT v Praze, 2006. 280 s, ISBN 80-7080-617-6.
- [8] DROBNÝ, J.G.: *Radiation Technology for Polymers*, BocaRaton: CRC Press, 2003, 206s, ISBN 1-58716-108-7.
- [9] *Polymerní materiály* [online]. [cit. 2014-01-22]. Dostupné zWWW: http://www.ateam.zcu.cz/download/Polymery_2010.pdf
- [10] *Keramika, kompozity, polymery*, [online]. [cit. 2013-11-27]. Dostupný z WWW: <http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet3.htm>.
- [11] *Polyolefiny, polyetylen, polypropylen* [online]. [cit. 2014-02-27]. Dostupný z WWW: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/PE%20a%20PP2013.pdf>
- [12] MLEZIVA, J, ŠŇUPÁREK, J.: *Polymery: Výroba struktura, vlastnosti a použití*, 2.vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [13] Ullmann V.: *Jaderná fyzika a fyzika ionizujícího záření*. Ostrava 2002., [online]. [cit. 2014-01-07]. Dostupný z WWW: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>.

- [14] Fyzika v moderním lékařství, [online], [cit. 20014-02-04], Dostupný z WWW:<http://cz7asm.wz.cz>
- [15] Wikipedia: Otevřená encyklopedie, [online], [cit. 2014-02-15], Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org>
- [16] Vaculík, J., Diplomová práce – Vlastnosti radiačně síťovaných polymeru. Zlín UTB 2010. 123 s.
- [17] Encyklopedie energie-radioaktivní záření. [online], [cit. 2014-02-15], Dostupný z WWW: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=rad_zar.html.
- [18] Radiační síťování plastů. BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG, 40 s.
- [19] Mechanické vlastnosti materiálů, [online], [cit. 2014-02-15], Dostupný z WWW: http://spstjbc.cz/spst_files/projekty/vyuka_v_cizim_jazyce/moduly/modul%20stt/de/sttn1_mechanicke%20vlastnosti%20materialu.pdf
- [20] ČECHAL, Rudolf. *Polymery vyztužené modifikovanými vláknovými plnivý: diplomová práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2011. Vedoucí diplomové práce: Michal Daněk.
- [21] RYBNIKÁŘ, F., et al. *Analýza a zkoušení plastických hmot*. Praha, SNTL, MÍR, 1965. 420 s. ISBN 04-628-65
- [22] Statické zkoušky krátkodobé, [online], [cit. 2014-02-15], Dostupný z WWW: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [23] Podlahy Trade s.r.o., [online], [cit. 2014-05-7], Dostupný z WWW: <http://www.lite-podlahy-maw.cz>
- [24] Technika kolem nás, [online], [cit. 2014-05-7], Dostupný z WWW: <http://technet.idnes.cz>
- [25] Zdravotnictví a medicína, [online], [cit. 2014-05-7], Dostupný z WWW: <http://zdravi.e15.cz>
- [26] Irradiation Services, [online], [cit. 2014-05-7], Dostupný z WWW: <http://www.leoni-irradiation-services.com> fashion-writings
- [27] Fashion-writings, [online], [cit. 2014-05-7], Dostupný z WWW: <http://www.fashion-writings.com>

[28] Vstřikovací stroje Arburg, [online], [cit. 2014-05-7], Dostupný z
WWW:<http://www.arburg.com>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

\bar{x}	Aritmetický průměr
°C	Stupeň Celsiův
Bq	Becquerel
C	Uhlík
Co	Kobalt
ČSN	Česká technická norma
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
EN	Evropská norma
eV	Elektronvolt
F	Síla [N]
Gy	Gray
H	Vodík
HDPE	Vysoko-hustotní polyetylen
He	Helium
IQR	Interkvartilové rozpětí
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
J	Joule
kg	Kilogram
l	Okamžitá délka zkušebního tělíska [mm]
l ₀	Původní délka zkušebního tělíska [mm]
LDPE	Nízko-hustotní polyetylen
LLDPE	Nízko-hustotní lineární polyetylen
m	medián
m ³	Metr krychlový

MDPE	Polyetylen o střední hustotě
mm	Milimetr
MPa	Megapascal
MW	Moelkulová hmotnost
Q1	Dolní kvartil
Q3	Horní kvartil
R-Sq	Koeficient determinace
s	Směrodatná odchylka
s_1	Okamžitá plocha průřezu zkušebního tělíska [mm ²]
S	Střední kvadratická chyba predikce
s_0	Původní plocha průřezu zkušebního tělíska [mm ²]
s^2	Výběrový rozptyl
UHMWPE	Polyetylen o velmi vysoké hustotě
V	Objem [mm ³]
V_x	Variační koeficient
W	Watt
ϵ	Poměrné prodloužení [%]
ϵ_L	Poměrné prodloužení [%]
ϵ_S	Poměrné zúžení [%]
$\epsilon_{\sigma M}$	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu [%]
σ	Napětí [MPa]
σ_M	Mez pevnosti v tahu [MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [9]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2. Struktura polymerů: a) lineární; b) rozvětvená; c) zesíťovaná; d) prostorově zesíťovaná [10]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3. Strukturní vzorec etylenu C₂H₄ [9]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4. Schéma větvení makromolekul: a) HDPE; b) LDPE [11].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5. Trubky v podlahovém vytápění [23]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6. Izolace kabelů a drátů [24]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 7. Sterilizované lékařské pomůcky [25].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 8. Pronikavost jednotlivých druhů ionizujícího záření. [17].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 9. Princip radiačního síťování [18].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 10. Pronikání beta záření do materiálů [6].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 11. Elektronový urychlovač Rhodotron [26]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 12. Pronikání gama záření do materiálu [6].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 13. Zdroj gama záření ve vodní nádrži.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14. Příklady způsobů namáhání materiálu [19].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 15. Normalizovaná zkušební tělesa pro tahovou zkoušku [22]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 16. Obecný tahový diagram [22].....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 17. Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C [28].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 18. Linka pro ozařování polymerů ve firmě BGS [16]</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 19. Schéma ozařovací linky [18]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 20. Čelisti zkušebního stroje ZWICK</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 21. Box-plotový diagram pro neozářené LDPE – modul pružnosti v tahu</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 22. Box-plotový diagram pro neozářené LDPE – mez pevnosti v tahu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 23. Box-plotový diagram pro neozářené LDPE – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 24. Box-plotový diagram pro ozářené LDPE 132 kGy – modul pružnosti v tahu.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 25. Box-plotový diagram pro ozářené LDPE 132 kGy – mez pevnosti v tahu.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 26. Box-plotový diagram pro ozářené LDPE 132 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 27. Box-plotový diagram pro neozářené HDPE – modul pružnosti v tahu.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 28. Box-plotový diagram pro neozářené HDPE – mez pevnosti v tahu.....</i>	<i>52</i>

<i>Obr. 29. Box-plotový diagram pro neozářené HDPE – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu</i>	53
<i>Obr. 30. Box-plotový diagram pro ozářené HDPE 132 kGy – modul pružnosti v tahu</i>	54
<i>Obr. 31. Box-plotový diagram pro ozářené HDPE 132 kGy – mez pevnosti v tahu</i>	55
<i>Obr. 32. Box-plotový diagram pro ozářené HDPE 132 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu</i>	56
<i>Obr. 33. Regresní analýza závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti na teplotě – neozářený LDPE</i>	58
<i>Obr. 34. Kubický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě – neozářený HDPE</i>	59
<i>Obr. 35. Regresní analýza závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti na teplotě – neozářený HDPE</i>	60
<i>Obr. 36. Kubický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě – ozářený HDPE 132 kGy</i>	61
<i>Obr. 37. Regresní analýza závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti na teplotě – ozářený HDPE 132 kGy</i>	62
<i>Obr. 38. Srovnání modulu pružnosti v tahu neozářeného a ozářeného LDPE při různých teplotách</i>	63
<i>Obr. 39. Srovnání meze pevnosti v tahu neozářeného a ozářeného LDPE při různých teplotách</i>	64
<i>Obr. 40. Srovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu neozářeného a ozářeného LDPE při různých teplotách</i>	65
<i>Obr. 41. Srovnání modulu pružnosti v tahu neozářeného a ozářeného HDPE při různých teplotách</i>	66
<i>Obr. 42. Srovnání meze pevnosti v tahu neozářeného a ozářeného HDPE při různých teplotách</i>	67
<i>Obr. 43. Srovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu neozářeného a ozářeného LDPE při různých teplotách</i>	68

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Srovnání vybraných vlastností LDPE a HDPE</i>	17
<i>Tab. 2. Přehled vybraných vlastností LDPE.....</i>	39
<i>Tab. 3. Přehled vybraných vlastností HDPE</i>	39
<i>Tab. 4. Technické parametry stroje ARBURG Allrounder 420C</i>	40
<i>Tab. 5. Obsah gelu.....</i>	42
<i>Tab. 6. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu neozářeného LDPE při různých teplotách</i>	45
<i>Tab. 7. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu neozářeného LDPE při různých teplotách</i>	46
<i>Tab. 8. Naměřené hodnoty poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu neozářeného LDPE při různých teplotách</i>	47
<i>Tab. 9. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu ozářeného LDPE 132 kGy při různých teplotách</i>	48
<i>Tab. 10. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu ozářeného LDPE 132 kGy při různých teplotách</i>	49
<i>Tab. 11. Naměřené hodnoty poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu ozářeného LDPE 132 kGy při různých teplotách.....</i>	50
<i>Tab. 12. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu neozářeného HDPE při různých teplotách</i>	51
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu neozářeného HDPE při různých teplotách</i>	52
<i>Tab. 14. Naměřené hodnoty poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu neozářeného HDPE při různých teplotách.....</i>	53
<i>Tab. 15. Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu ozářeného HDPE 132 kGy při různých teplotách</i>	54
<i>Tab. 16. Naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu ozářeného HDPE 132 kGy při různých teplotách</i>	55
<i>Tab. 17. Naměřené hodnoty poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu ozářeného HDPE 132 kGy při různých teplotách</i>	56