Vliv ozáření na mechanické a termomechanické vlastnosti LDPE a HDPE

Bc. Jiří Macourek

Diplomová práce
2010

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Jiří MACOUREK**
Studijní program:	**N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Konstrukce technologických zařízení**
Téma práce:	**Vliv ozáření na mechanické a termomechanické vlastnosti LDPE a HDPE**

Zásady pro vypracování:

1. **Vypracujte literální rešerši na dané téma**
2. **Připravte zkušební tělíska**
3. **Proveďte test vybraných mechanických vlastností**
4. **Vyhodnoťte výsledky experimentu**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

VISHU S.: Handbook of Plastics Testing Technology Second Edition, Performence Engineered Products Inc., 1998
ROGER BROWN: Handbook of Polymer Testing, Marcel Dekker Inc., 1999
RENFREW A., MORGAN P.: Polyethylen, Slovenské vydavatelství technické literatůry Bratislava, 1966
MLEZIVA J.: Polymery – struktura, vlastnosti a použití, Sobotáles, 1993

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2010**

Ve Zlíně dne 16. února 2010

L.S.

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan

doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Macoun Jiří Obor: KT 3

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby [1];
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 [2];
- beru na vědomí, že podle § 60 [3] odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 [3] odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoli 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 13.05.2010 .....

[1] *zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:*
(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

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

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

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

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

Cílem diplomové práce je zjistit závislosti mechanických a termomechanických vlastností modifikovaného LDPE a HDPE materiálu vlivem ionizačního beta ozařování. Porovnávána byla zkušební tělíska neozářená a ozářená dávkami 15, 30, 45, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy.

Klíčová slova:

LDPE, HDPE, polyetylén, měření mechanických vlastností, měření termomechanických vlastností, ionizační záření

ABSTRACT

The purpose of diploma work is determining an effect to mechanical and thermomechanical properties of modified LDPE and HDPE influence of ionizing radiation. Compared the non-irradiated test specimens and irradiation test specimen of doses 15, 30, 45, 66, 99, 132, 165 and 198 kGy.

Keywords:

LDPE, HDPE, polyethylen, measurement mechanic properties, measurement termomechanic propertis, ionizing radiation

Děkuji mému vedoucímu doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc., za ochotu, inspiraci a odbornou pomoc, kterou mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych poděkoval za poskytnuté rady a technickou asistenci panu Ing. Zdeňku Holíkovi a Ing. Milanovi Žaludkovi, Ph.D. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Daňkovi za odbornou konzultaci a firmě BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG, která zajistila ozáření zkušebních tělísek.

OBSAH

ÚVOD **11**

I TEORETICKÁ ČÁST **12**

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY **13**

1.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ 13

1.1.1 Rozdělení polymerů dle výchozích surovin 14

1.1.2 Rozdělení podle tvaru makromolekulárních řetězců 15

2 CHARAKTERISTIKA POLYETYLÉNU **16**

2.1 KLASIFIKACE POLYETYLÉNU 17

2.2 VLASTNOSTI A MOŽNOSTI POUŽITÍ POLYETYLÉNU 19

2.3 NÍZKO-HUSTOTNÍ POLYETYLÉN LDPE 22

2.4 VYSOKO-HUSTOTNÍ POLYETYLÉN HDPE 23

2.5 OZAŘOVÁNÍ POLYETYLÉNU 24

2.5.1 Zajímavé vlastnosti zesíťovaného polyetylénu 25

2.5.1.1 Paměťový efekt 26

2.5.1.2 Vysokoteplotní provoz 26

3 POLYMERY VHODNÉ K OZAŘOVÁNÍ **27**

4 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ **29**

4.1 ZÁKLADNÍ DRUHY IONIZAČNÍHO ZÁŘENÍ 30

4.1.1 Záření alfa 30

4.1.2 Záření beta 30

4.1.3 Záření gama 31

4.1.4 Hloubka průniku záření 32

4.1.4.1 Penetrace alfa částice 32

4.1.4.2 Penetrace beta záření 33

4.1.4.3 Penetrace gama záření 34

5 OZAŘOVÁNÍ POLYMERŮ **35**

5.1 ZÁKLADNÍ METODY OZAŘOVÁNÍ POLYMERŮ POMOCÍ ELEKTRICKY VYTVÁŘENÝCH ZDROJŮ ZÁŘENÍ 37

5.2 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ 39

5.2.1 Alternativní způsob síťování k ionizačnímu ozařování 39

5.2.2 Síťování pomocí ionizačního záření 39

5.2.2.1 Rozdíl mezi použitím gama záření a elektronovým beta záření 41

5.2.2.2 Podpora síťování při ozařování 42

5.2.2.3 Zpomalovače ionizačního síťování 43

5.2.2.4 Degradace polymeru 44

5.2.2.5 Druhotný efekt při ozařování polymerů 44

5.2.3 Výhody vyplívající ze síťování polymerů pomocí ionizačního záření 44

5.3 SPECIFICKÉ VÝHODY OZAŘOVACÍCH PROCESŮ NAD OSTATNÍMI CHEMICKÝMI ALTERNATIVY 46
5.4 ZÁKLADNÍ VELIČINY A JEDNOTKY Z OBORU ZÁŘENÍ 47
5.4.1 Veličiny charakterizující zdroje záření 47
5.4.2 Veličiny charakterizující působení záření na látku 49
5.5 ZAŘÍZENÍ PRO OZAŘOVÁNÍ POLYMERŮ 50
5.5.1 Zařízení pro gama ozařování 51
5.5.2 Urychlovače elektronů 51
5.5.2.1 Lineární urychlovače 55
5.5.2.2 Kruhové urychlovače 56
6 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ 57
6.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA POLYMERU 58
6.1.1 Měřené veličiny a jejich symboly 59
6.1.2 Zkušební tělíska 63
6.2 ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI V OHYBU 64
6.2.1 Zkušební tělesa 65
6.2.2 Typy vrubů 65
6.3 ZKOUŠKA TVRDOSTI 66
6.3.1 Měření tvrdosti podle Brinella 66
6.3.2 Měření tvrdosti podle Vickerse 67
6.3.3 Měření tvrdosti podle Rockwela 67
6.3.4 Měření tvrdosti podle Shore 68
6.3.5 Faktory ovlivňující výsledky měření 69
II PRAKTICKÁ ČÁST 70
7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE 71
8 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ 72
8.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ 72
8.2 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKU TAHEM 74
8.2.1 Teplotní komora 75
8.3 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKU VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI 76
8.3.1 Vrubovací stroj 77
8.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKU TVRDOSTI SHORE D 77
8.5 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ TMA 78
8.6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK 79
8.6.1 Vlastnosti zkušebního materiálu HDPE a LDPE 80
8.7 OZÁŘENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK 81
8.8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ 82
9 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 84
9.1 ZKOUŠKA TAHEM 84
9.1.1 Tahová zkouška HDPE při pokojové teplotě 23°C 86
9.1.2 Tahová zkouška LDPE při pokojové teplotě 23°C 88

9.1.3 Tahová zkouška HDPE při teplotě 100°C 90
9.1.4 Tahová zkouška LDPE při teplotě 100°C 92
9.2 MĚŘENÍ VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI 94
9.2.1 Vrubová houževnatost HDPE při teplotě 23°C 95
9.2.2 Vrubová houževnatost LDPE při teplotě 23°C 96
9.2.3 Vrubová houževnatost HDPE při teplotě -20°C 97
9.2.4 Vrubová houževnatost LDPE při teplotě -20°C 98
9.3 MĚŘENÍ TVRDOSTI SHORE D 99
9.3.1 Tvrdost Shore D u HDPE při 23°C 99
9.3.2 Tvrdost Shore D u LDPE při 23°C 100
9.4 MĚŘENÍ TMA 101
9.4.1 Změřená data z TMA zkoušky 101
9.5 ZMĚNA OPTICKÝCH VLASTNOSTI 102
10 DISKUZE VÝSLEDKŮ 104
10.1 VYHODNOCENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY 104
10.2 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI 108
10.3 VYHODNOCENÍ TVRDOSTI SHORE D 112
10.4 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY TMA 113
ZÁVĚR 114
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 115
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 118
SEZNAM OBRÁZKŮ 121
SEZNAM TABULEK 124
SEZNAM PŘÍLOH 125

ÚVOD

Plasty a kaučuky, tedy souhrnně „polymerní materiály“, v průběhu dvacátého století zásadně vstoupily do historie lidstva a pronikavě ovlivnily charakter současné civilizace. Příčin, proč si plasty získaly takovou oblibu, je celá řada. Patří sem především snadná zpracovatelnost, nízká měrná hmotnost a cena výrobku.

Jedním ze způsobu, jak docílit požadovaných vlastností polymerů je použití síťování pomocí ozařování. V dnešní době se využívá několik druhů záření a každé má své přednosti a své uplatnění. Během několika posledních desetiletí se využití síťování vlivem ozařování v průmyslovém odvětví zvýšilo obrovským tempem. Důvod tohoto nárůstu spočívá ve zlepšení vlastností plastů (mechanické, tepelné i chemické). Ozařování plastů se ukázalo být zajímavé i z hlediska ekonomických důvodů a to nejen v nákladech na výrobu, ale především i v životnosti produktu. Plasty jsou nízko-nákladové materiály, které mohou být přizpůsobeny tak, aby vyhovovali určitým aplikacím, a lze je snadno přizpůsobit pro využití v hromadné výrobě.

Hlavním cílem této práce je zkoumání vlastností termoplastických materiálů vlivem ozařování. Jedná se o modifikované LDPE a HDPE a to konkrétně na tělískách ozářených dávkami 15, 30, 45, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy. Zkušební tělíska PE budou vyrobeny na vstřikovacím stroji v podobě „tyčinek a lopatiček“. Tělíska PE se ve firmě BGS nechají ozářit požadovanými dávkami. Následně se provede řada měření, bude se jednat především o tahovou zkoušku za pokojové teploty a za zvýšené teploty 100°C. Dále se bude provádět zkouška rázové houževnatosti PE za pokojové teploty a při snížené teplotě -20°C. Na závěr práce bude provedeno porovnání a vyhodnocení získaných výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

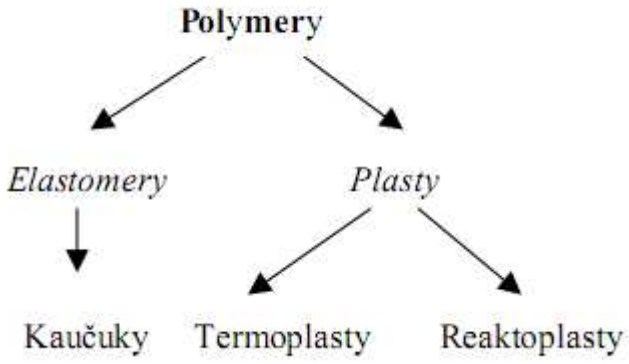
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymerní materiály jsou z hlediska chemického složení látky sestávající se z molekul jednoho nebo více druhů atomů, většinou se jedná o atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru či jiných prvků. Tyto molekuly polymerních látek jsou navzájem spojené převážně v řetězovou strukturu, v níž je chemickými vazbami spojen velký počet stejných nebo různých nízkomolekulárních článků (strukturních jednotek).

Plasty jsou tvořeny nejen z makromolekulární látky, která tvoří hlavní složku, ale také řadou příměsí (aditiv). Každá přísada ať už se jedná o plniva, stabilizátory, změkčovadla, maziva, barviva, atd., více či méně ovlivňuje jak vlastnosti polymerní směsi, tak produktu, který je výsledkem jejího zpracování.

1.1 Rozdělení polymerů

Polymery můžeme rozdělit do dvou základních skupin: elastomery a plasty. Plasty můžeme dále rozdělit na termoplasty a reaktoplasty.



Obr. 1 Základní rozdělení polymerů

Eleastomer – jsou polymery, které mají ve svém makromolekulárním řetězci reaktivní místa, např. dvojné vazby, umožňující chemickou síťovací reakci – vulkanizaci. Reakcí vulkanizačního činidla za vhodných reakčních podmínek se vytváří prostorová síť, ve které jsou původně lineární makromolekulární řetězce kaučuku pospojovány chemickými vazbami, které nazýváme příčné. Vlastnosti pryže jsou určovány koncentrací příčných vazeb a chemickou strukturou, při vulkanizaci se tvárným kaučuk mění na pryž, jejíž základní vlastností je schopnost velké elastické deformace při zatěžování v tahu. [16]

Termoplast – je plastický, neformovatelný materiál, který si tyto vlastnosti uchovává i po zahřátí a opětovném ochlazení. Většina termoplast jsou vysokomolekulární polymery, jejichž řetězce mezi sebou interagují slabými Van der Waalsovými silami, silnějšími dipól-dipólovými interakcemi a vodíkovými vazbami (nylon) nebo interakcemi mezi aromatickými kruhy (polystyren). [17]

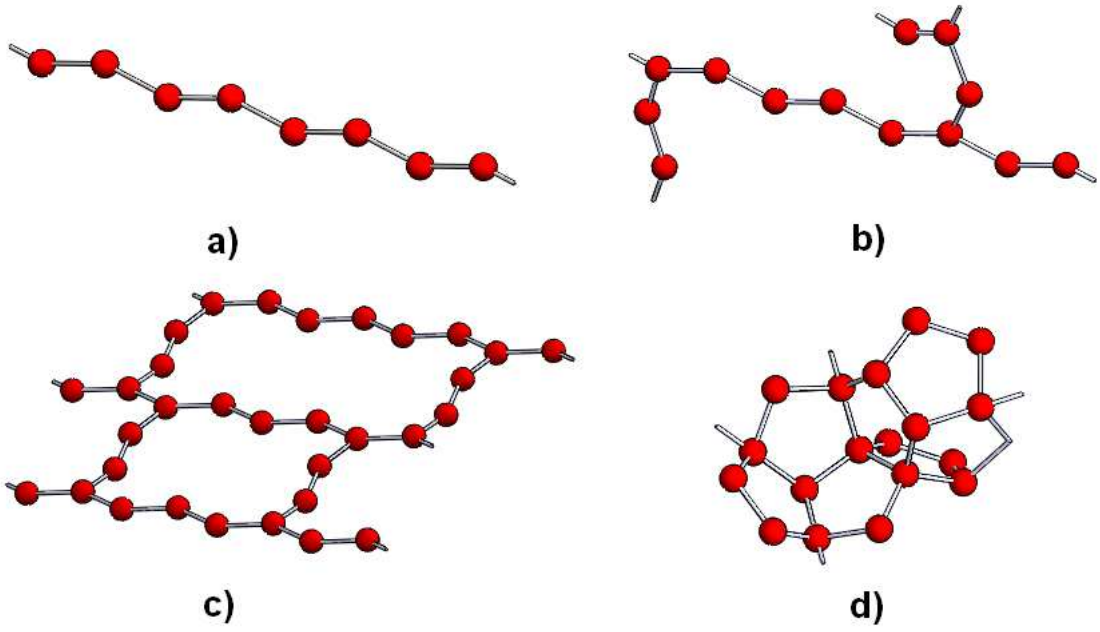
Reaktoplast - zesíťovaný polymer, který vytváří prostorovou trojrozměrnou síť. Zesíťování nastává až při tváření plastu vlivem tepla a tlaku, někdy působením katalyzátorů. Jakmile je zesíťování dokončeno, není další tváření možné, protože opětovným dodáváním tepelné energie není možno hmotu roztavit. Husté příčné zesíťování se nazývá vytvrzování.

1.1.1 Rozdělení polymerů dle výchozích surovin

- *přírodní* – též označované jako organické polymery, mohou být původní (bílkoviny, škrob, celulóza, kaučuk) anebo chemicky upravené, ale přírodním polymerům podobné (celuloid, umělé hedvábí, umělá rohovina apod.).
- *syntetické* – vznikají z nízkomolekulárních sloučenin chemickými reakcemi, podle typu reakce můžeme syntetické polymery rozdělit na polymery vzniklé:
    - polymerací
    - polykondenzací
    - polyadicí

1.1.2 Rozdělení podle tvaru makromolekulárních řetězců

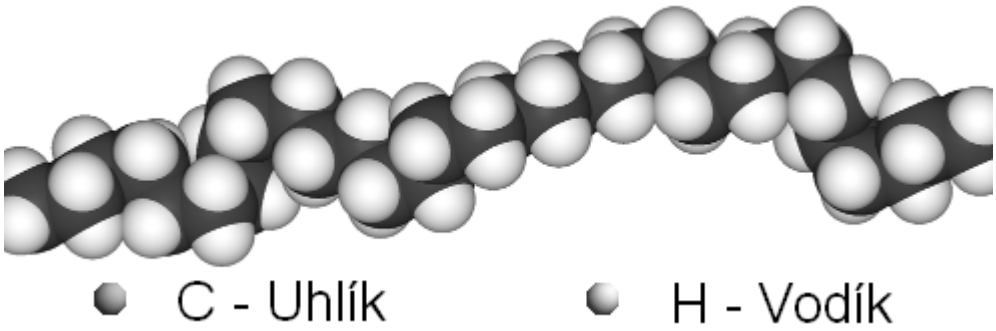
- **lineární polymer** – jednotlivé monomery jsou seřazeny za sebou, viz *Obr. 2 a)*, takže vytváří jednoduchý řetězec
- **rozvětvený polymer** – makromolekula se vyznačuje hlavním řetězcem, z něhož vystupují postranní větve, viz *Obr. 2 b)*. Celá struktura má menší hustotu, než lineární polymery
- **zesíťovaný polymer** – sousední řetězce těchto polymerů jsou mezi sebou propojeny články, které jsou vázány pomocí silně kovalentní vazby, viz *Obr. 2 c)*
- **prostorově zesíťovaný polymer** – trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby vytvářející trojrozměrnou síť, viz Obr. 2 d). Tyto polymery mají zajímavé mechanické vlastnosti. Patří sem epoxidy a fenolformaldehydy.



Obr. 2: Tvar makromolekulárních řetězců: a) lineární polymer, b) rozvětvený polymer, c) zesíťovaný polymer, d) prostorově zesíťovaný polymer

2 CHARAKTERISTIKA POLYETYLÉNU

Polyetylén (PE) patří do kategorie polyolefinu, ty představují kvantitativně největší skupinu syntetických polymerů, to je dáno hlavně snadnou dostupností surovin pro výrobu monomerů a tím, že jde o výrobu poměrně levnou. Polyolefiny jsou polymery vzniklé z prostého olefinu, nenasyceného uhlovodíku s jednou dvojnou vazbou mezi atomy uhlíku v otevřeném řetězci. Molekulová struktura polyetylénu je zobrazena na *Obr. 3*.



Obr. 3 Molekulová struktura polyetylénu

Polyetylén s různými vlastnostmi se dnes ve světě vyrábí řadou výrobních technologií. Vzhledem k tomu, že rozdíly ve struktuře se nejvíce projeví v hustotě PE, dělí se obvykle na polyetylén o nízké hustotě (low density polyethylen, LDPE), který má při 23°C hustotu pod 0,94 g.cm^{-3}, zpravidla 0,915 až 0,925 g.cm^{-3}, a polyetylén o vysoké hustotě (high density polyethylene, HDPE) o hustotě při 23°C nad 0,94 g.cm^{-3}, zpravidla 0,945 až 0,96 g.cm^{-3}. Polyetylén o hustotě 0,925 až 0,94 g.cm^{-3} bývá často označován jako polyetylén o střední hustotě (medium density polyethylen, MDPE). Malý, ale rychle vzrůstající objem výroby je zaznamenán u lineárního polyetylénu o nízké hustotě (Linear low density polyethylen, LLDPE) s hustotou při 23°C 0,915 až 0,93 g.cm^{-3}. Schematická struktura makromolekul různých typů polyetylénu.

2.1 Klasifikace polyetylénu

Polyetylén je klasifikovaný do několika různých kategorií umístěný většinou na jeho hustotě a odvětvování. Mechanické vlastnosti PE závisí významně na proměnných takový jako rozsah a druh odbočení, krystalové soustavy a molekulární váhy. [7]

Tab. 1 Základní druhy polyetylénu

Zkratka	Název	Hustota kg/m^3
UHMWPE	Ultra-vysokomolekulární polyetylén	930 - 940
HDPE	Vysoko-hustotní polyetylén	940 - 970
PEX	Zesíťovaný vysoko-hustotní polyetylén	940 - 960
MDPE	Středo-hustotní polyetylén	926 - 940
LDPE	Nízko-hustotní polyetylén	915 - 935
LLDPE	Lineární nízko-hustotní polyetylén	910 - 925
VLDPE	Velmi nízko-hustotní polyetylén	880 - 915

UHMWPE je polyetylén s molekulární váhou v miliónech, obvykle mezi 3,1 a 5,67 milióny. Vysoká molekulární váha vyúsťuje v méně výkonné zaplétání řetězců do krystalové soustavy. Vyznačuje se hustotami od 0.930 do 0.940 kg/m^3. Vysoká molekulární váha dává vzniknout velmi tuhému materiálu.

HDPE má obvykle hustotu v rozmezí od 940 po 970 kg/m^3. Vzhledem k jeho velmi nízké úrovni větvení se někdy HDPE označuje jako lineární polyetylén (LPE). [27] Základní strukturo znázorněna na Obr. *4 a)*

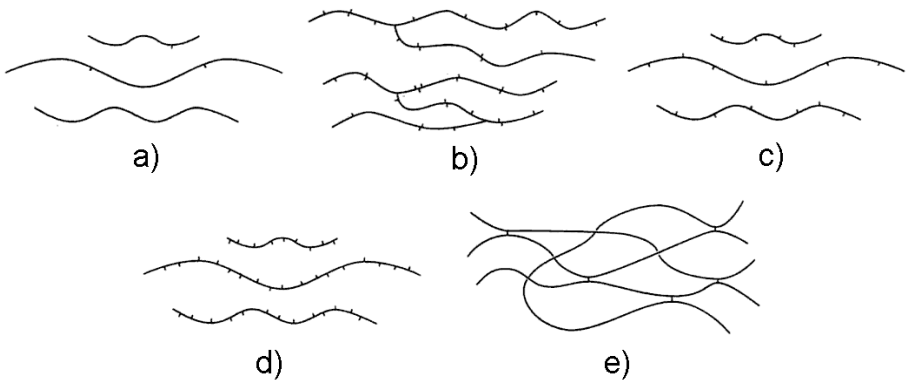
PEX známe též jako XLPE se skládá z polyetylénu, který byl chemicky upraven tak, aby došlo ke kovalentnímu propojení sousedních řetězců. [27] Dochází ke změně termoplastu na elastomer. Tepelné vlastnosti polymeru jsou zlepšeny, jeho tok je redukován a jeho chemická stálost je zlepšená. Základní struktura je znázorněna na *Obr. 4 e)*

MDPE je definován hustotním rozsahem od 926 do 940 kg/m^3, má nižší tuhost a tvrdost než HDPE

LDPE nízko-hustotní polyetylén získal toto označení kvůli značnému množství bočních řetězců, které brzdí proces krystalizace, což vede k relativně nízké hustotě. Nízko-hustotní polyetylén se vyznačuje hustotou od 915 do 935 kg/m^3. Řetězce makromolekul LDPE jsou silně rozvětvený, to vyústí v nižší pevnost v tahu a zvýšené tažnosti. Vysoká míra větví s dlouhými řetězy dá roztavenému LDPE jedinečné a žádoucí tokové vlastnosti. Základní struktura je znázorněna na *Obr. 4 b)*

LLDPE se skládá z hlavního lineárního řetězce polyetylénu, ke kterému jsou připojeny krátké alkyl skupiny v náhodných intervalech. Řetězce, se kterými se nejčastěji setkáváme, jsou etyl, butyl či hexyl skupiny, ale mohou být různě větveny podél hlavního řetězce. Různost větví je v rozmezí od 25 do 100 atomů uhlíku. LLDPE může obsahovat i malé množství delších větví, ale nejde o stejný stupeň větvení, jako u LDPE. Chemicky si lze představit, že se jedná o kompromis mezi lineárním polyetylénem a LDPE, proto název lineární nízko-hustotní polyetylén. Větve brání od určité míry krystalizaci a dochází ke snížení hustoty v porovnání s HDPE. [27] Hustotním rozsahem se pohybuje od 910 do 925 kg/m^3, jde v podstatně o lineární polymer s významnými množstvími krátkých větví. Základní struktura znázorněna na *Obr. 4 c)*

VLDPE známe také jako ULDPE je specializovaná forma lineárního LDPE, která má mnohem vyšší koncentraci krátkých bočních řetězců. Typické rozmístění řetězců kleslo na rozmezí od 7 až do 20 atomů uhlíku na hlavním řetězci. Vysoká úroveň větvení omezuje velmi efektivně krystalizaci, což vede k materiálu, který je převážně nekrystalický. [27] Hustotním rozsah je definován od 880 do 915 kg/m^3. Základní struktura je znázorněna na *Obr. 4 d)*



Obr. 4 Struktura makromolekul různých typů polyetylénu:

a) – HDPE, b) – LDPE, c) – LLDPE, d) – VLDPE, e) – PEX

2.2 Vlastnosti a možnosti použití polyetylénu

Polyetylén je tuhá látka, v tenkých vrstvách nebo filmech ohebná, elastická, téměř průhledná, popř. s mléčným zákalem. Na omak má voskovitý charakter. Všechny typy PE mají vysokou krystalitu. Teplota tání se pohybuje mezi 105 až 136°C. PE má vysokou houževnatost a tažnost. Omezená je jeho stálost proti oxidačním činidlům. Za normální teploty se nerozpouští v žádném rozpouštědle, při teplotách nad 50°C se většina typů PE rozpouští v aromatických nebo chlorovaných uhlovodících či dekalinu. LDPE se při teplotách nad 70°C se úplně rozpouští v *p*-xylenu, HDPE se v něm rozpouští teprve nad 100°C. PE nepropouští vodní páru a je mrazuvzdorný. Absorbuje tuky, uhlovodíky, aminy, ethery, ketony i jiné kapalné organické sloučeniny, které jím zvolna difundují. Podléhá studenému toku a má skol k praskání pod napětím. [1]

Vzrůstající hustota je příčinou vyššího obsahu krystalického podílu, zhoršení zpracovatelnosti, z mechanických vlastností se zlepšuje tvrdost a tuhost, ale klesá tažnost a houževnatost. Index toku se výrazně nemění. Vzrůstá teplota tání a tvarová stálost za tepla. Teplota křehnutí se posunuje k vyšším hodnotám. Odolnost vůči chemikáliím se zlepšuje. Nízkou hustotu obvykle doprovází hodně a často rozvětvená makromolekula, zatím co pro vysokou hustotu je typická lineární makromolekula s malým počtem krátkých větví. [8]

Způsob přípravy ovlivňuje strukturu, molekulovou hmotnost a vlastnosti PE. Zásadní rozdíl mezi jednotlivými druhy spočívá ve stupni větvení, který ovlivňuje rozsah krystalinity a hustotu. Srovnání různých druhů PE je uvedeno v *Tab. 2.*

Tab. 2: Srovnání vybraných charakteristik LDPE a HDPE [1]

	Teplota zpracování	Teplota tání	Hustota	Mez pevnosti v tahu	Modul *E*
	℃	℃	g.cm $^{-3}$	MPa	MPa
LDPE	160 - 260	105 - 115	0,915 - 0,935	9 - 15	200 - 400
HDPE	180 - 280	125 - 136	0,940 - 0,97	20 - 33	700 - 1400

Výhodnými charakteristikami PE jsou:

- nízká cena
- snadná zpracovatelnost
- výborné elektroizolační vlastnosti
- velmi dobrá chemická odolnost
- tuhost a vláčnost i při nízkých teplotách
- průhlednost tenkých fólií
- zdravotní nezávadnost

Použitelnost PE je omezena:

- nízkým bodem měknutí
- sklon k oxidaci
- zákalem materiálu v tlustších vrstvách
- voskovitým vzhledem a nízkou odolností proti poškrábání
- nízkou pevností v tahu
- hořlavostí (přičemž rozšiřování požáru je podporováno odkapáváním hořící taveniny)

Téměř všechny vlastnosti polyetylénu závisí do značné míry na teplotě. Například u HDPE dávají produkty amorfní podíly vláčnost a ohebnost do značné nízkých teplot. Krystalický podíl, částečně převládající nad amorfním, zabezpečuje dobrou pevnost. Při teplotě okolo 60°C se začnou krystalické podíly tavit a při 110 až 115 °C jsou poslední části krystalů roztaveny a polyetylén se dostává do vysoko-elastického stavu. Předměty z PE zůstávají tvarově stálé do teploty 100 °C. Při velmi nízkých teplotách, níž jak -120 °C, je PE tvrdý a křehký. Se stoupající teplotou pomalu měkne a stává se ohebným. [8]

Nestabilizovaný PE patří mezi plasty s nízkou odolností proti povětrnosti, zejména proti slunečnímu záření. Rychlost fotooxidačního odbourávání stoupá s koncentrací terciálních uhlíků v řetězcích a klesá se zvyšující se krystalinitou, neboť k fotooxidaci dochází hlavně v amorfních oblastech polymeru. Oxidační stabilita proto klesá zpravidla od HDPE přes LDPE k PP. Pevnost v tahu u HDPE klesne v našich klimatických podmínkách na polovinu asi za 10 měsíců při jeho vystavení povětrnosti (za nepřístupu světla se mechanické vlastnosti nezmění ani za 10 let). Antioxydanty v PE mají vysokou stabilizační účinnost proti tepelné oxidaci, ale jsou málo účinné proti fotooxidaci. 1 % vhodného absorbéru UV-záření zvýší u fólie tloušťky 0,4 mm životnost z 1 roku na 10 let. Nejúčinnějším stabilizátorem PE jsou saze (po 10 letech nedošlo u PE plněného sazemi k výrazným změnám pevnosti). [1]

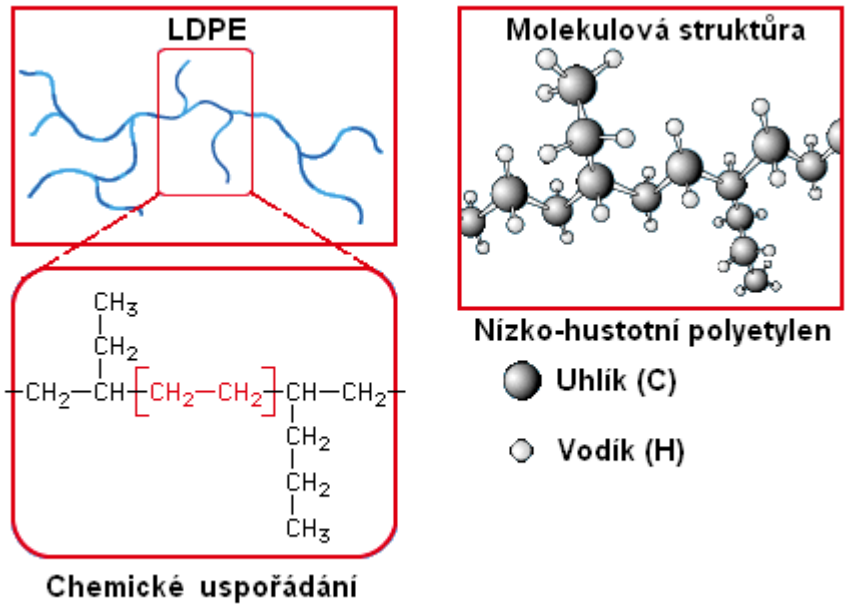
Polyetylén je termoplastický a jako takový může být zpracováván lisováním, vstřikování či vytlačováním do desky, folie, trubice, tyče, vlákna a jiných tvarů. Liší se však od většiny termoplastických pryskyřic v tom, že má výrazně krystalickou strukturu.

2.3 Nízko-hustotní polyetylén LDPE

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

Vzhledem k povaze vysokého tlaku při procesu polymerace, kterým se vyrábí LDPE, butyl a etyl větve jsou často seskupovány dohromady oddělené dlouhými nerozvětvenými řetězci. Dlouhé řetězce větví vznikají náhodně podél hlavního řetězce. Dlouhé řetězce se mohou zase sami rozvětvit. Velké množství větví, charakteristické pro nízko-hustotní polyetylénové molekuly, omezují jejich schopnost krystalizovat, což má za následek snížení hustoty oproti HDPE. [27]

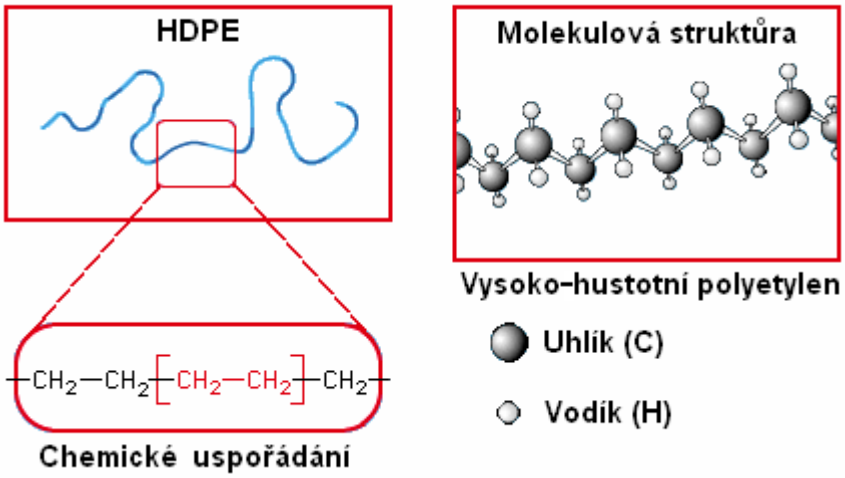
Nízko-hustotní polyetylén je nejstarší typ polyetylénu. Je vyráběn za použití vysokého tlaku. Je to měkký, pevný a ohebný druh polyetylénu vzhledem k jeho vysoce rozvětvené struktuře. Je používán pro pevné, poddajné předměty jako jsou např. víka a podobné výrobky. Byl dlouho používán jako izolační materiál. V současnosti je nejvíce oblíbenou aplikací folie, mezi další příklady patří například balící. *Obr. 5* ukazuje vysoce rozvětvenou molekulární strukturu nízko-hustotního polyetylénu. [17]



Obr. 5 Nízko-hustotní polyetylén

2.4 Vysoko-hustotní polyetylén HDPE

HDPE je chemicky nejbližší strukturou čistého polyetylénu. Je tvořen převážně z nerozvětvených molekul s nízkou mírou větvení a s velmi malým počtem kazů, které vedou k porušení linearity. S extrémně nízkou úrovní vad ve struktuře je možno dosáhnout vysokého stupně krystalinity, které mají vysokou hustotu (ve srovnání s ostatními druhy polyetylénu). [27] Připravuje se z etylénu katalytickým procesem. Nepřítomnosti větví má za následek více „zabalenou“ strukturu s vyšší hustotou a poněkud vyšší chemickou odolností než LDPE. HDPE je také o něco těžší a více neprůhledný. Může vydržet poměrně vysoké teploty (120 °C, na krátkou dobu, 110 °C nepřetržitě). Lineární polyetylén se běžně vyrábí s molekulovou hmotností v rozmezí 200.000 až 500.000, ale může být ještě vyšší. Jeho výroba se uskutečňuje při nízkých nebo středních tlacích. *Obr. 6* ukazuje lineárně rozvětvenou molekulární strukturu vysoko-hustotního polyetylénu.



Obr. 6 Vysoko-hustotní polyetylén

2.5 Ozařování polyetylénu

Polyetylén 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. [21]

Důležitou část při ozařování polyolefinu představuje zejména zpracování polyetylénu. Nízko- a vysoko- hustotní síťovaný polyetylén je v současné době běžně používán v průmyslových oborech. Polyetylény 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 polyetylénu zářením, patří molekulová hmotnostní distribuce, větvení, stupeň nenasycení a morfologie. [2]

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. [25]

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. [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 vyplívá, že hustota síťování je téměř rovnoměrně rozložena. Radiační síťování polyetylénu vyžaduje podstatně nižší celkovou energii, je rychlejší, efektivnější a je ekologicky přijatelnější. Chemicky síťovaný PE obsahuje chemické látky, ty mají často nežádoucí účinky na dielektrické vlastnosti a v některých případech jsou prostě nepřijatelné. [2]

Teplota vzorku v době působení záření je důležitá. Například snížení teploty pomocí tekutého dusíku se zabraňuje vzniku *allyl* dvojné vazby 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 PE v tekutém stavu způsobuje větší stupeň síťování než při pokojové teplotě. Stupeň zesíťování se s rostoucí teplotou na Tg (~ -40°C) neustále zvyšuje a pod teplotou Tg se PE stává *necitlivý*. [21]

Existují studie dokazující velké rozdíly ve vzniku sítí vlivem ozařování při ozařování lineárního PE v tuhém stavu a v tavenině. [24]

Pokud se nezamezí přítomnost molekul kyslíku při ozařování, bude u polyetylénu probíhat zvýšený výskyt degradace. To povede ke křehnutí a štěpení řetězců. [23]

2.5.1 Zajímavé vlastnosti 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.

2.5.1.1 Paměťový efekt

Při pokojové teplotě je PE převážně krystalický. Při zahřátí na teplotu přibližně 120°-145° tyto krystaly zmizí a polymer se přemění na vysoce viskózní taveninu. Při opětovném ochlazení dojde ke krystalizaci a polymer začne tuhnout do tvaru podobnému tomu, který měl před teplotou tání krystalu. Velmi rychlé či na druhou stranu velmi pomalé chlazení, může ovlivnit jeho konfiguraci a následné chování. [21]

U PE podrobeného ozařování se fyzikální chování při pokojové teplotě moc nemění, i bod tání zůstává zhruba na stejné úrovni. Nicméně při vyšší teplotě působí na molekuly 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). [21]

2.5.1.2 Vysokoteplotní provoz

Přetrvávání vazeb mezi molekulami u ozářeného PE 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 PE při pokojové teplotě, a že daleko více oxiduje při těchto vyšších teplotách. Proto musí být v rámci dlouhodobého používání ozářeného PE vystaveného vyšším teplotám prováděny přísnější kontroly, ale při působení krátkodobých vyšších teplot dokáže nabídnout ozářený PE značné bezpečnostní vlastnosti. [21]

3 POLYMERY VHODNÉ K OZAŘOVÁNÍ

Tab. 3 Klasifikace polymerů podle jejich reakce na ionizující záření [2]

Polymery s převažujícím síťováním	Polymery s převažují degradací
Polyetylén	Polyisobutylen
Polypropylen	Poly(α-metylstyren)
Polystyren	Poly(vinylden chlorid)
Poly(vinylchlorid)	Poly(vinyl fluorid)
Poly(vinylden fluorid)	Polychlorotrifluoroethylene
Poly(vinyl alkohol)	Polyakrylonitril
Poly(vinyl acetat)	Polyvinyl butyral
Kopolimer etylenu a vinyl acetatu	Poly(methyl metakrylát)
Poly(vinyl methyl ether)	Polymethakrylonitril
Polybutadien	Poly(methakrylamid)
Polychloropren	Polyoxymethylen
Kopolymer styrenu a akrylonitrilu	Poly(propylen sulfid)
Kopolymer styrenu a butadienu	Poly(ethylen sulfid)
Přírodní kaučuk	Polyanin
Chlorovaný polyetylén	Polylysin
Chloro-sulfovaný polyetylén	DNA
Polyamid	
Polyester	
Polyuretan	
Polyakrilat	
Polyakrilamid	
Polydimetylsiloxan	
Kopolymer vinylidenfluoridu a hexafluoropropylen	
Kopolymer etylenu a tetrafluoronu	
Polydimethylfenylsiloxan	
Fenol formaldehyd	
Močoviny formaldehyd	
Melaminoformaldehyd	

Při hodnocení vhodnosti polymerů pro ozařování by měli být vzaty v úvahu i některé další faktory uvedené níže:

Teplota – zvýšená teplota také podporuje vyšší míru radiačně-chemické přeměny v polymeru. To je zvláště patrné při průchodu taveninou nebo při teplotě skelného přechodu. [20]

Fázový stav polymeru – účinnost radiační přeměny v polymerech se zvyšuje jejich přechodem ze skelného na vysoce elastický stav a ještě víc se zvětšuje při přechodu do viskózního stavu. Pokud polymer obsahuje viskózní a krystalické fáze bude radiačně-chemická přeměna probíhat rychleji v amorfní části a na rozhraní, než v krystalické fázi. [20]

Vady v polymerních materiálech – tuhé polymery vždy obsahují některé druhy vad: mikrodutiny, mikrotrhliny, nečistoty, rozhraní, atd., které ovlivňují prostorové lokalizace energie ionizujícího záření. Proto, radiační odolnost polymeru závisí také na jeho historii. [20]

Tlak – rychlost a směr transformace polymerů jsou hluboce ovlivněny vnějším tlakem. Například, při vysokém tlaku (okolo 3GPa) se snižuje degradace polymeru. U elastomerů vystavených velkému tlaku při radiačně-chemickém procesu, probíhá síťování 3 - 15x rychleji než u atmosférického tlaku. [20]

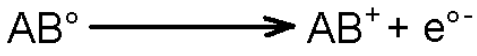
Ozáření – kombinované působení ionizujícího záření, UV záření, viditelného a infračerveného světla způsobí ještě hlubší změny ve fyzicko-chemických vlastnostech polymerů. Tuto skutečnost je třeba vzít v úvahu při hodnocení radiační odolnosti. [20]

4 IONIZAČNÍ ZÁŘENÍ

Ionizační záření nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. Toto záření je ve formě korpuskulárního a elektromagnetického. Korpuskulární záření je druh částicového záření představující proud částic o uspořádaném pohybu s nenulovou klidovou hmotností, pohybující se rychlostí menší než rychlost světla. Zachovává si svou existenci i po zastavení pohybu. Mezi tato záření se řadí záření α, β^- (elektrony), β^+ (pozitrony), protonové záření p^+, neutronové záření n^0, atd. Elektromagnetické záření je záření ve tvaru příčné vlny charakterizované dvěma na sebe navzájem kolmými vektory (intenzitou elektrického pole a magnetickou indukcí). Kvanta tohoto záření nemají klidovou hmotnost, jsou to kvanta vlnění, pohybující se rychlostí světla (fotony – záření γ). [17]

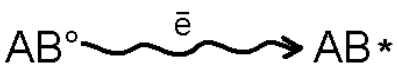
Primární účinky pozorované při ozařování materiálů jsou:

Ionizace **-** Obdrží-li elektron dost energie na to, aby se zcela uvolnil z vazby k mateřskému atomu, vzdálí se od něj trvale - dochází k ionizaci atomu, jeho rozdělení na záporný elektron a kladný iont. Primární ionizací se rozumí počet iontových párů vytvořených vyražením elektronů primární částicí. Některé elektrony vyražené při ionizaci mají tolik energie, že mohou samy dále po své dráze ionizovat - jedná se o sekundární ionizaci. *Obr. 7* [28]



Obr. 7 Schématické znázornění ionizace

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 "vyzdvižení" 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 excitace, přičemž rozdíl energií se vyzáří ve formě **fotonu** elektromagnetického záření. *Obr. 8* [28]



Obr. 8 Schématické znázornění excitace

4.1 Základní druhy ionizačního záření

4.1.1 Záření alfa

Částice alfa jsou jádra helia atomů. To je tvořeno dvěma protony a dvěma neutrony, značí se ${}_2^4H$. Mají nízkou hloubku průniku. Běžná velikost energie alfa částice je přibližně 5 MeV s typickou hloubkou penetrace ve vzduchu 50 mm a 23 μm v silikonu. [22] Alfa částice je schematicky znázorněna na *Obr. 9*. V důsledku rozkladu alfa částici je atomové číslo sníženo o dvě jádra a hmotnostní číslo se sníží o čtyři. Lze tedy reakci obecně napsat jako:

$$ {}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He + Q $$

kde Q představuje celkovou energii uvolněnou v procesu, rozkladovou energii. Tato energie, která se rovná rozdílu v hmotnosti mezi původním jádrem a vzniklým jádrem, se objeví jako kinetická energie alfa částice a kinetická energie vzniklého jádra. Typickým příkladem alfa rozpadu je přeměna z radium na radon:

$$ {}_{88}^{226} Ra \underset{1,622\,years}{\overset{\tau}{\rightarrow}} {}_{86}^{222} Rn + {}_2^4 He + 4{,}78 MeV $$

Hybnost částice alfa se musí rovnat zpětné pohybové energii jádra radonu a jádro radonu je mnohem těžší než alfa částice. Můžeme tedy ukázat, že kinetická energie vzniklého jádra radonu je zanedbatelně malá (0,09MeV), a že rozkladová energie se zdá téměř výhradně jako kinetická energie z alfy částice (4,78MeV). [29]

4.1.2 Záření beta

Beta částice mají stejnou hmotnost jako elektrony, ale můžou být buď negativně, nebo pozitivně nabité. Díky svým malým rozměrům a náboji proniknou snadněji materiálem než alfa částice, ale jsou snadněji odchýlitelné. Jejich vysoká rychlost, obvykle blížící se rychlosti světla, znamená, že jsou lehce ionizující. [22] Beta částice je schematicky znázorněna na *Obr. 9*.

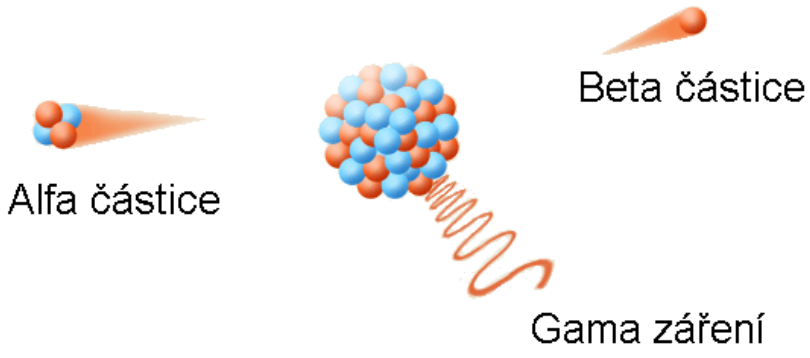
Beta záření může pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou. K jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1 m nebo kovu o šířce 1 mm. Jednomu typu přeměny beta podléhá bismut ^{212}Bi. Při ní se v jádře atomu přemění neutron na proton,

elektron a antineutrino. Proton zůstane v jádře a elektron s antineutrinem jádro opustí. Pohybující se elektron se stane beta zářením. Nové jádro má o jeden proton více. Beta rozpadem bismutu pak vzniká polonium ^{212}Po. [17]

4.1.3 Záření gama

Jedná se o elektromagnetické záření s vlnovými délkami kratšími než 300 pm. Protože fotony nemají elektrický náboj, záření γ se neodchyluje od svého původního směru ani v elektrickém poli a ani v magnetickém poli. Proto se látkou volně šíří a značně se rozptyluje. Látku, s níž interaguje, silně ionizuje a uvolňuje z ní nabité částice. Záření lze oslabit silnou vrstvou materiálu obsahující jádra těžkých prvků (např. Pb). [26] Gama záření je schematicky znázorněno na *Obr. 9.*

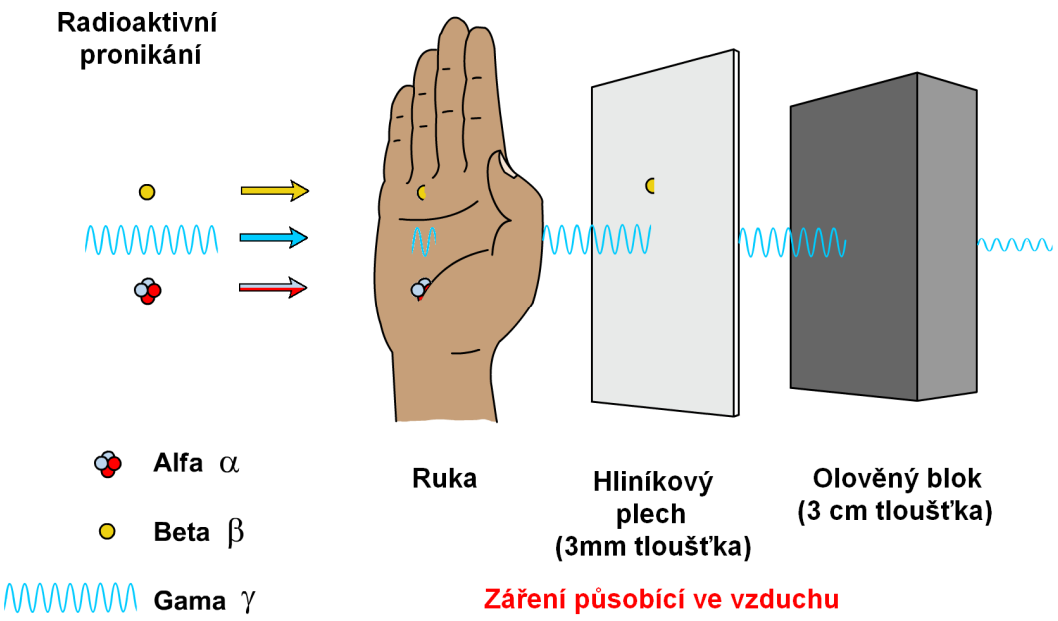
Na pohlcení záření γ je třeba velké masy materiálu. Vhodnější jsou materiály s vyšším atomovým číslem a s vysokou hustotou. Čím energetičtější je záření, tím tlustší stínění je zapotřebí. Schopnost materiálu pohlcovat záření zpravidla vyjadřujeme polotloušťkou materiálu, tj. tloušťkou, po jejímž průchodu se původní intenzita záření sníží na polovinu. Například záření γ, jehož intenzitu zredukuje 1cm olova na 50%, bude mít poloviční intenzitu také po průchodu 6 cm betonu. Vysoko energetická povaha záření gama z něj činí účinný prostředek hubení bakterií, čehož se využívá například při sterilizaci lékařských nástrojů nebo při ošetřování potravin, zejména masa a zeleniny, aby déle zůstalo čerstvé. Přestože může samo způsobovat rakovinu, používá se při jejím léčení. [17]



Obr. 9 Typy záření při rozkladu jádra

4.1.4 Hloubka průniku záření

Jedním z charakteristik různých typů záření je hloubka (penetrace) záření do materiálu. Na *Obr. 10* je znázorněna pro představu penetrace alfa částic, beta a gama záření. Mezi dva nejčastěji používané typy záření pro průmyslové procesy jsou gama záření a urychlené elektrony v podobě beta záření. Volba, kterou z těchto metod použít pro daný proces je do značné míry daná otázkou ekonomie, tvaru a hustoty materiálu výrobku, který je ozařován. Kromě těchto faktorů je efekt těchto dvou typů ozařování materiálů prakticky stejný.



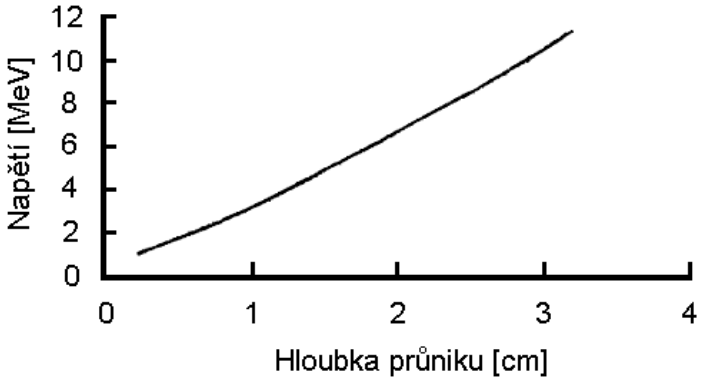
Obr. 10 Schéma průniku záření

4.1.4.1 Penetrace alfa částice

Alfa částice mají velmi malý průnik do jakéhokoliv typu materiálu a to ještě za předpokladu, že zdroj záření je umístěn blíže, než několik centimetrů od materiálu a to z důvodu zastavení částic již ve vzduchu.

4.1.4.2 Penetrace beta záření

Beta záření má výrazně vyšší prostup materiálem, než alfa částice, ale vzhledem k nepravidelné trase elektronu v materiálu nelze jejich hloubku průniku přesně definovat. Lze však maximální hloubku odhadnout. Závislost hloubka penetrace na velikosti napětí urychlovače je znázorněna na *Obr. 11*. Hloubka se samozřejmě liší u různých typů polymerů a kompozitů a to především v závislosti na hustotě materiálu.



Obr. 11 Hloubka průniku urychlených elektronů v závislosti na napětí urychlovač

Dávka energie při ozáření materiálu není v dosahu elektronů konstantní, jak je patrno i z *Obr. 12*. Proto se musí volit dávka energie tak, aby zaručila minimální dávku ozáření napříč celou vrstvou materiálu. Pro větší tloušťky materiálu se volí ozařování ze dvou či více stran.

Pro výpočet optimální tloušťky materiálu můžeme použít zjednodušený vzorec:

$$t_{opt} = 2/3s$$

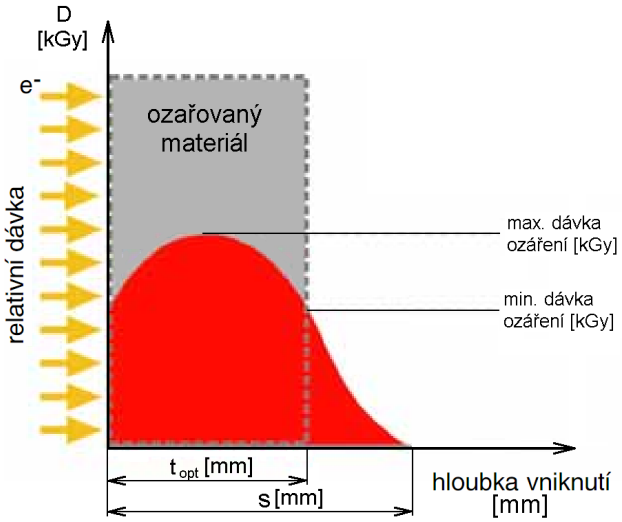
$$s_e = \frac{1}{\rho}(5{,}1 \cdot E - 2{,}6) \text{ [13]},$$

kde ρ je hustota ozařovaného materiálu (g/cm3)

s_e je dosah elektronů (mm)

E je energie částic (MeV)

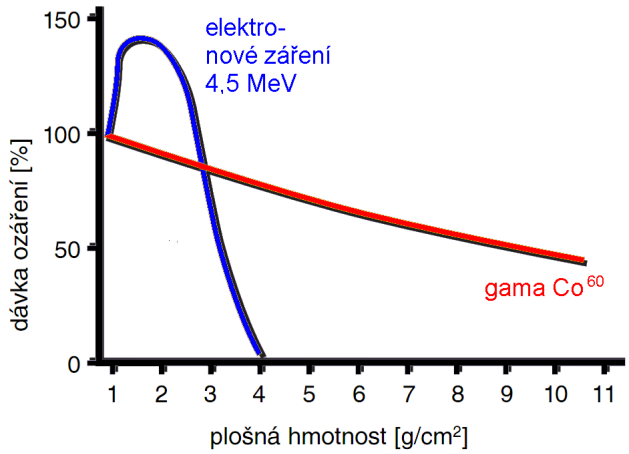
t_{opt} je optimální tloušťka materiálu (mm)



Obr. 12 Průběh dávky energie při jednostranném beta záření [13]

4.1.4.3 Penetrace gama záření

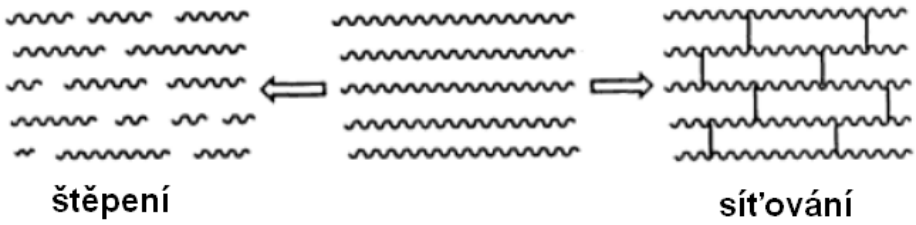
Gama záření má velmi velkou pronikající schopnost při relativně nízké intenzitě dávky ozáření. To je dané skutečností, že nevyzařují elektrický náboj, a proto nejsou tak silné v interakci s hmotou, jako nabité částice beta záření. Záření gama reaguje s materiály třemi hlavními způsoby: fotoelektrickým jevem, Comptonovým jevem a vznikem elektron-pozitronového páru. Z nich první dva způsobují ionizaci atomů, s nimiž se kvanta dostanou do interakce. Velikost dávky je dána především zdrojem záření. Srovnání gama záření s beta zářením je vyobrazeno na *Obr. 13*.



Obr. 13 Schopnost pronikání elektronů a gama záření [13]

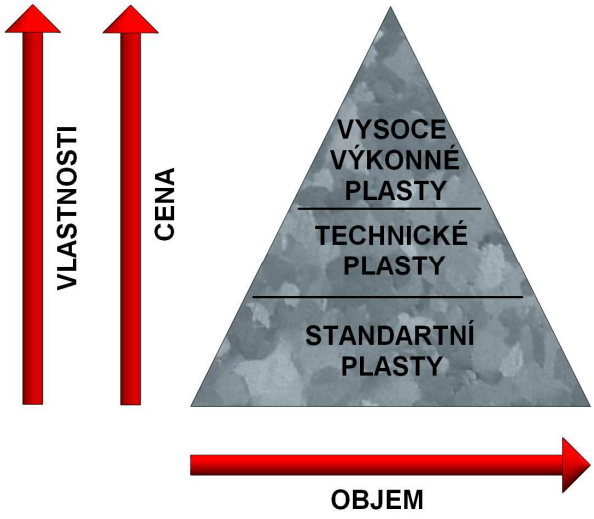
5 OZAŘOVÁNÍ POLYMERŮ

Radiační zpracování se začalo velmi brzy používat pro modifikaci polymerů. Ozařování polymerních materiálů ionizujícím zářením (záření gama, X-paprsky, urychlené elektrony, iontové paprsky) vede k tvorbě velmi reaktivních polotovarů, u kterých dochází k disproporci, odběru vodíku, a následně ke vzniku nových vazeb (síťování) či zániku původních vazeb (degradace, štěpení). Stupeň těchto transformací závisí na struktuře polymeru a na procesních podmínkách před, během a po ozařování. V mnoha případech probíhá síťování a štěpení (degradace) současně, ale jeden nebo druhý proces převažuje, vzhledem k molekulární struktuře. Ilustrace těchto dvou zářením indukovaných procesů je uvedeno na *Obr. 14*.



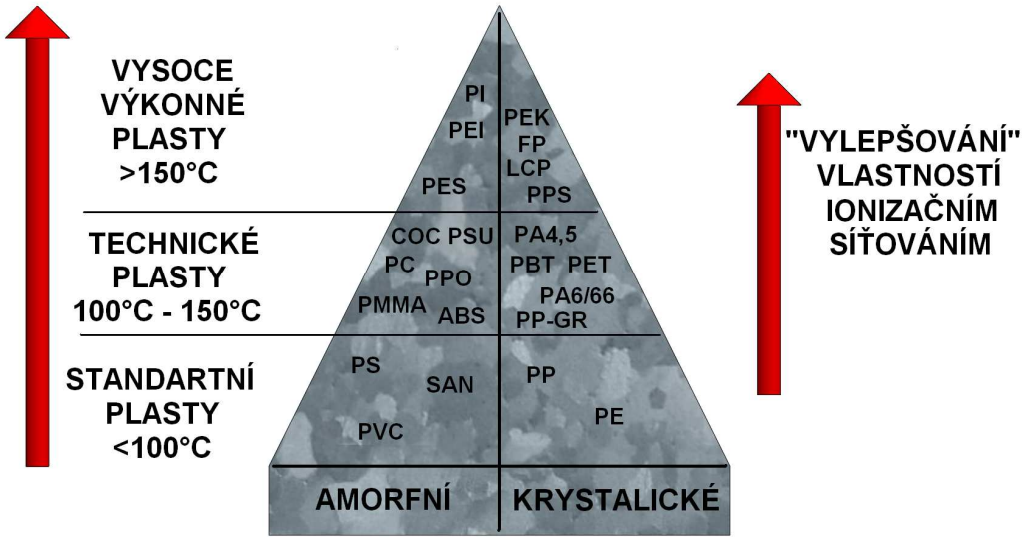
Obr. 14 Ilustrace zářením indukovaných procesů

Úspěch radiační technologie pro zpracování syntetických polymerů lze připsat dvěma faktorům. Jednoduchost zpracování různých tvarů a velikostí a jednak tomu, že většina těchto polymerů se dobře síťuje vlivem záření. Kdežto přírodní polymery jsou obtížně zpracovatelné a dochází spíše k degradaci při vystavení vysoko-energetického záření. [9]



Obr. 15 Klasifikace termoplastických polymerů

Obr. 15 ukazuje celkovou klasifikaci plastů. Od něj můžeme snadno vidět, že ceny plastů se odvíjí od zlepšení jejich vlastností. Například prostřednictvím vylepšení procesů ionizačním zářením mohou být technické plasty zdokonaleny na vysoce-výkonné plasty. To je samozřejmě možné pouze s ohledem na vybraný materiál a jeho vlastnosti, jakou je například tepelná odolnost. Na obr. 16 jsou uvedeny jednotlivé druhy plastů a jejich mezinárodní zkratky. Amorfní a krystalické plasty jsou vhodné pro síťování. Některý z těchto plastů, například PE, může být více či méně vhodný pro ionizační síťování bez potřeby speciálních síťovacích přísad. Na druhou stranu, například PA, vyžaduje použití síťovacích přísad před zpracováním, aby během ozařování došlo k síťovací reakci. [11]



Obr. 16 Klasifikace termoplastických polymerů

Ozařování polymerů můžeme rozdělit do následujících části:

- polymerizace indukovaná zářením, tvorba polymeru ionizačním ozařováním monomeru
- radiačně-chemické transformace v polymerním systému, která zahrnuje:

  a) zářením indukované roubování kopolymerů, modifikace polymerů a polymerních materiálů štěpením monomeru/ů;

  b) zářením indukované síťování, tvorba z lineárních nebo větvených oligomerů nebo polymerů 3D zesíťovaný systém a cyklických makromolekul;

  c) polymerní radiolýza vedoucí k štěpení a degradaci
- ochrana polymerů proti záření

5.1 Základní metody ozařování polymerů pomocí elektricky vytvářených zdrojů záření

Průmyslové využití ozařování monomerů, oligomerů a polymerních látek je v podstatě závislé na dvou elektricky vytvářených zdrojích záření: urychlených elektronů (EB) a fotonů z vysoce-intenzivní ultrafialové lampy (UV). Rozdíl mezi těmito dvěma metodami je ten, že urychlené elektrony mohou proniknout látkou a mohou se zastavit pouze ve hmotě, kdežto vysoce-intenzivní ultrafialové světlo působí pouze na povrchu. [3]

Proces přeměny taveniny na pevnou látku je převážně navržený pro použití u kompozitů založených na netěkavých monomerech a oligomerech s molekulární hmotnosti menší než 10.000. Ty mají dostatečné nízkou viskozitu, aby byly použity bez prchavého rozpouštědla. [3]

UV ozařovací proces je z hlediska nákladů lepší možnost, protože zařízení je jednodušší a menší. Podstatně levnější je i samotné pořízení a provoz. Není nutnost používat dusík, který zvyšuje provozní výdaje. Volné radikály, vznikající při UV ošetřování, vyžadují přísady foto-iniciátorů, některé z nich jsou nákladné a mohou způsobit nežádoucí efekty, které zbarvují povrchovou vrstvu a nezřídka také způsobují zápach. Oba tyto efekty mohou být minimalizovány nebo eliminovány pomocí dusíku. [4]

Je mnohem složitější používáním UV ozařování ošetřit pigmentovaný povrch, obzvlášť pokud se jedná o tlusto-stěnou vrstvu, než při použití elektronových paprsků, který je pro tento účel bezproblémový. V mnoha případech se tyto problémy nevyskytují u EB ošetřených produktů. Stejné materiály, ale ošetřené buď UV, nebo EB ozařováním, mají jiné fyzikální vlastnosti, jako odolnost proti poškrábání a ochrana proti nabobtnání. To je možné, protože tyto dva procesy jsou podstatně odlišné. [5]

Organické molekuly se stanou elektricky vybuzené nebo ionizované po absorbování energie. Pro změnu organických molekul ze základního stavu na vybuzený stav je požadovaná energie v rozsahu od 2 do 8 eV. [6] Vybuzené molekuly jsou schopné vstoupit do chemických reakcí vedoucí k polymeraci, síťování a radikálovému roubování. [2]

Ionizace organických molekul vyžaduje vyšší energii. Ionizační proces generuje pozitivní ionty a sekundární elektrony. Při reakcí s odpovídajícími molekuly (např. akrylát) se pozitivní ionty přemění na volné radikály. Sekundární elektrony ztrácejí svou nadbytečnou energii, zpomalují se a připojí se k monomeru. Radikální anionty, tvořené touto cestou, jsou dále zdrojem radikálů schopných indukovat rychlou přeměnu. [6]

V průmyslovém ozařování se používají buď UV fotony s energií mezi 2,2 až 7 eV nebo urychlených elektronů s energií mezi 100 až 300 kV. Urychlené elektrony přenášejí jejich energii do molekul hmoty schopné reakce (tavenina či pevná látka) během série elektrostatických interakcí s elektrony sousedních molekul. To vede k vybuzení, ionizaci a nakonec k utváření chemických reakcí. UV-aplikace využívají speciální fotoiniciátory, tak že absorbují fotony a generují radikály nebo protony. Rychlá přeměna z taveniny na tuhou látku se může dít pomocí volných radikálů nebo katonickou polymerizací, která je v mnohých případech kombinována se síťováním. Přeměna v tavenině trvá obvykle 1/100 sekundy až 1 sekundu. Přeměna v tuhé polymerní matrici pomocí volných radikálů nebo kationů trvá déle než několik sekund. [6]

UV a EB technologie zvyšují produktivitu, snižují náklady a vytváří nové a často lepší produkty. Přitom, při využití méně energie, výrazně redukují znečištění emisí, odstraňují hořlavost a znečišťující rozpouštědla. Tato technologie je velmi používaná pro ochranu, dekoraci nebo pro vznik vazby mezi věcmi, včetně optických vláken, CD, DVD, kreditních karet, obaly časopisů, zdravotní zařízení, automobilové a letecké výrobky a mnoho další. [2]

5.2 Síťování polymerů

Síťování je nejdůležitější reakcí polymerů, které výrazně mění vlastnosti produktu. Při síťování se molekuly spojí a vytvoří síť, jež se chová funkčně. U síťování, pomocí záření, se síťováním změní termoplast v termoset. S rostoucí hustotou síťování se zvyšuje tuhost, tvrdost a snižuje se stupeň bobtnání, zvětšuje se elektrický odpor a rezistence vůči rozpouštědlům. [10]

5.2.1 Alternativní způsob síťování k ionizačnímu ozařování

U polymerů se kromě síťování pomocí ozařování a síťování vulkanizací sírou může setkat se dvěma metodami síťování vlivem chemické reakce:

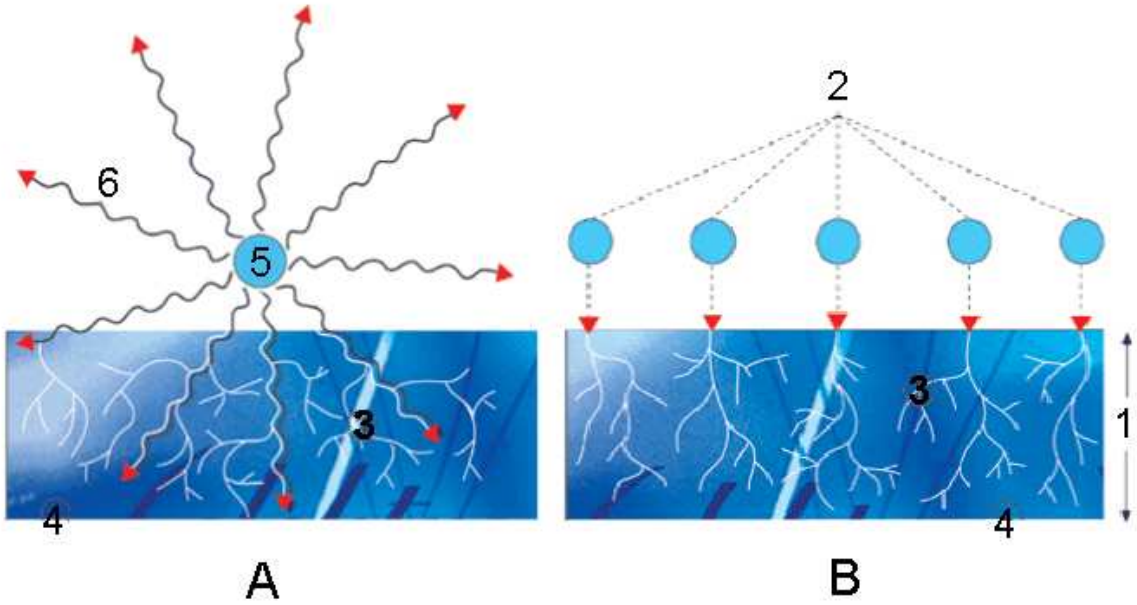
- Síťování pomocí peroxidu
- Síťování pomocí silanu

Při síťování pomocí peroxidu se obvykle používají vyšší teploty (dochází k tavení polymeru). Pomocí zvýšené teploty se rozkládá peroxid ROOR na volné radikály RO. Při této rekombinaci dochází ke spojení volných radikálů a vzniku vazby C-C. Tento typ síťování je nevhodný vzhledem k nízké účinnosti, vedlejším reakcím peroxidů a volných radikálů a také nutnost použít velké množství poměrně drahých peroxidů. U síťování pomocí silanu je využito peroxidu k vytvoření primárních radikálů, molekuly silanu se poté naroubují na primární radikály. Vytvoří se Si-O-Si můstky. Síťování se provádí za zvýšené teploty, u PE je to v rozmezí od 80°C do 90°C, a je zde nutnost využití katalyzátorů. Při reakci vznikají vedlejší produkty, kterými jsou metanol a voda.

5.2.2 Síťování pomocí ionizačního záření

I když se k síťování polymerů často používají čistě chemické procesy, má síťování pomocí ionizačního záření svoje přednosti a někdy nelze dosáhnout zesítění jinými prostředky. Výhody ionizujícího záření jsou především v rozsáhlém spektru dávky ozáření a absence chemických katalyzátorů nebo zbytkových chemikálií (kromě H_2, CH_4, atd., které jsou obvykle ve formě těkavých plynů). Dalšími přednostmi radiačního síťování je široký rozsah teplot, při kterých lze vyvolat síťovací reakci a diferenciální účinek, kterým lze dosáhnout odlišných hodnot stupně zesítění v materiálu.

Ionizační síťování termoplastických materiálů se provádí pomocí elektronového paprsku nebo cobaltu 60 (gama záření) a provádí se odděleně po zpracování. Stupeň zesítění je možné upravit dávkou záření. Hlavním rozdílem mezi elektronovým paprskem a gama zářením je jejich rozdílná schopnost pronikat materiálem. Gama paprsky mají vysokou schopnost penetrace, kdežto při užití elektronového paprsku je závislá hloubka penetrace na velikosti energie urychlených elektronů. Znázornění principu ozařování pomocí gama parsků a elektronových paprsků a jejich penetrace ozařovaným materiálem je znázorněna na *Obr. 17*.



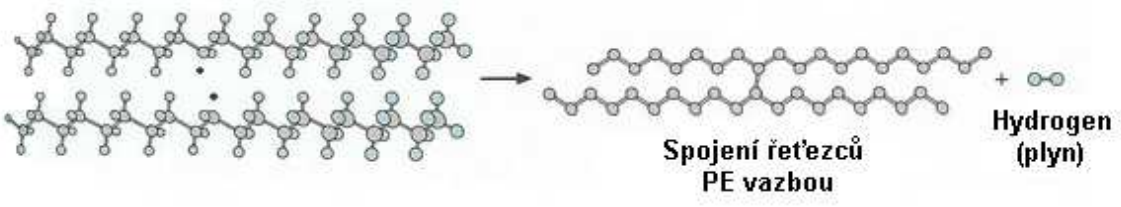
Obr. 17 A - Gama záření, B – Elektronový paprsek

1 – hloubka průniku urychlených elektronů, 2 – primární elektrony, 3 – sekundární elektrony, 4 – ozářený materiál, 5 – zdroj gama záření, 6 – γ kvanta [13]

Nevýhodou síťování elektronovým paprskem je větší či menší dávka nehomogenní distribuce. K tomu může dojít zejména v silnějších objektech. Dalším problémem může být nejednotnost otáčení válcových objektů, které procházejí elektronovým svazkem paprsků. Nicméně, mechanické vlastnosti jsou často závislé na střední síťovací hustotě. [2]

Při interakci polyetylénu s ionizačním zářením vznikají polymerní radikály (dochází k rozpadu vazeb C-H). Pomocí rekombinace dochází k spojení dvou volných radikálů

mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C-C. Vedlejším produktem je vznik hydrogenu v podobě plynu. Schéma síťování polyetylénu elektronovým zářením je vyobrazeno na *Obr. 18.*



Obr. 18 Síťování PE elektronovým zářením

5.2.2.1 Rozdíl mezi použitím gama záření a elektronovým beta záření

Pro síťování polymerních výrobků se používá jednak radionuklidu Co-60 a Cs-137 emitujících záření gama s energií 1,17/1,33 MeV u Co-60 a 0,662 u Cs-137 a rovněž urychlených elektronů fungujících na bázi beta záření s energetickým rozsahem od 150keV až po 10MeV.

Celá energie urychlených elektronů se vstřebá v relativně tenké vrstvě materiálu. Celková dávka energie pro síťování polymeru je dodávána v časech od zlomků sekund až po několik málo sekund. Ozařování navinutých výrobků, jako jsou třeba dráty a trubky, je tedy možné ozařovat v rychlosti až několik stovek metrů za minutu. [9]

V případě použití Co-60 se emitují gama paprsky, které na jednu stranu ztrácí 50% původní energie, při ozařování materiálu s povrchovou hustotou 25 g/cm^2. Dávkování je tedy 4 až 5x nižší než ve srovnání s použitím urychlených paprsků a doba vystavení materiálu záření je několik hodin. Na druhou stranu je však možné ozařovat velké objemy, obvykle mezi 10 až 50 m^3 ve stejnou dobu. Nevýhodou u gama záření je dlouhodobá difuze kyslíku do polymeru. Zhoršuje se tím síťování a i vlastnosti materiálu. Proto ozařování neprobíhá v atmosféře, ale v kontejneru, v němž je objem kyslíku snížen na odpovídající úroveň. [9]

5.2.2.2 Podpora síťování při ozařování

V zásadě jsou dva typy podpory ionizačního síťování. Jedna skupina, *nepřímé podpory síťování,* nevstupuje přímo do procesu síťování, ale pouze zvyšuje utváření reagujících částí, jako volných radikálů, které pak vedou síťování skrz druhotnou reakci. Druhá skupina, *přímá podpora síťování,* vchází přímo do procesu síťování a dochází ke skutečnému propojení molekulárních článků. [2]

Nepřímá podpora síťování:

Halogenové směsi - Tato skupina směsí byla rozsáhle zkoumána, hlavně u eleastomerů. Zjištění mohou být shrnuta asi takto: U chlorovaných alifatických směsí (směsi tvořené atomy uhlíku propojenými do necyklických větvených nebo nevětvených řetězců) stabilizující účinek stoupá s klesajícím číslem atomů uhlíku v molekule. Účinek podporujícího síťování stoupá s mizením iodo- , bromo- a chloro- substituovaných směsi a se stoupajícím stupněm halogenace (zavádění atomů halogenu). Halogen obsahující aromatické (vonné) směsi představují dobrý síťovací základ. [2]

Kysličník dusný - Zvýšené síťování ozařováním u polyetylénu, polypropylenu a polyisobutylenu, a u kopolymerů z etylenu a propylenu bylo zjištěno, když kysličník dusný byl vpravený do polymerové základní hmoty. [2]

Monochlorid síry - Několik badatelů zjistilo mírné až značné zvýšení stupně zesítění polyetylénu a polypropylenu. Uvažovalo se, že rozdíly výsledků těchto dvou studií by mohly být zapříčiněné rozdílnými způsoby, jak byl urychlovač rozložen v testované hmotě. [2]

Základní - Podpora síťování polypropylenovými a etylpropylenovými kopolymery byla potvrzena. Nicméně jiné základy, jako například aminy, nebyly shledány účelnými – v některých případech působily jako zpomalovače síťování zářením. [2]

Přímá podpora síťování:

Maleimidy - Maleimidy a dimaleimidy jsou známé urychlováním síťování eleastomerů organickými peroxidy při zvýšené teplotě, ale také bylo zjištěno, že zvyšují citlivost indukovaného záření při síťování polymerů. Pokusy zahrnující ozařování síťováním rafinované přírodní gumy a ostatních eleastomerů, ukázaly, že několik maleimidů, alkyl- a aryldimaleimidy významně zvýšily rychlost síťování. Mezi nejúčinnějšími byly N-fenylmalemid a *m*-propylen dimalemid. Rozdíl v citlivosti vlivu testovaných malemidů byl přisuzován jejich rozdílné rozpustnosti (tavitelnosti) v gumě. [2]

Thiol - Jedná se o sloučeninu, která obsahuje funkční skupinu složenou ze síry a vodíku. Studie několika badatelů ukázaly, že polyfunkční thiolové sloučeniny jsou vhodné jako přísady síťování v grafice, elektronickém průmyslu, průmyslu povrchových materiálů. Malé množství těchto směsí je už používáno ke zvýšení rychlosti síťování. Propagují také síťování polyisobutylenu a jeho kopolymerů, které se normálně znehodnotí při vystavení expozici záření. [2]

Akrylové a allylové sloučeniny - Bylo zjištěno, že polyakrylové a polyallylové sloučeniny zvyšují záření síťování polyvinylchloridu. Také se zjistilo zrychlení síťování eleastomeru, ale jejich účinek je poněkud malý. Nejlepší výsledky byly dosaženy u tetramethyldiakrylátu a u ethylendimethakrylátu. [2]

5.2.2.3 Zpomalovače ionizačního síťování

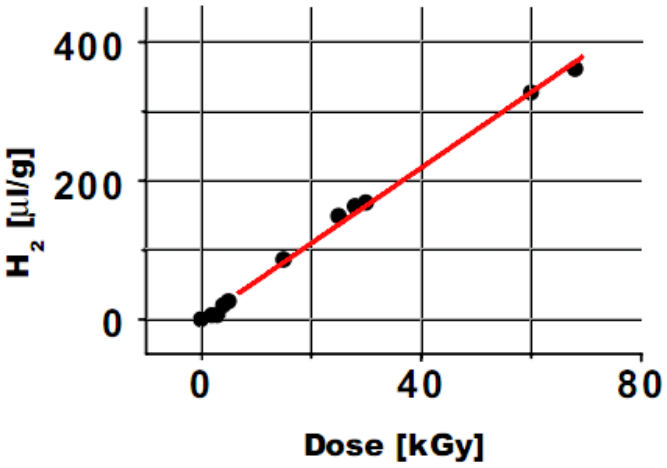
Ochraně polymerů proti poškození zářením bylo věnováno mnohem méně pozornosti oproti zájmu o propagaci tvarování síťováním. Byl objeven velký počet účinných ochranných faktorů, často zmiňovaných jako *antirads*. Značné snížení síťování bylo zjištěno u množství aromatických aminů, chinonů, aromatického hydroxylu sirného a aromatických dusičných, dusičnanových, dusíkatých směsí. Stupeň ochrany nabízený těmito směsi se zvyšuje s jejich koncentrací. [2]

5.2.2.4 Degradace polymeru

Zářením indukovaná degradace polymerů je v zásadě nežádoucí efekt, ale může mít užitečnou funkci. Jednou z možností využití degradace zapříčiněné ozařováním, je rozklad syntetických polymerů u polymerních odpadů. Konkrétním použitím degradace je příprava membrán z polymerního filmu u jaderných filtrů. [20]

5.2.2.5 Druhotný efekt při ozařování polymerů

Ozařování polymerů je obvykle doprovázeno vznikem plynů z polymerů. Jak se dalo očekávat, nejčastěji uvolňovaným plynem je vodík. Propan, dioxid uhlíku a dusíku se mohou také uvolňovat v závislosti na chemické struktuře polymeru. [31] Na *Obr. 19* je zobrazen graf zjištěných hodnot vzniku plynného hydrogenu u polyetylénu s nízkým obsahem přísad.



Obr. 19 Závislost vzniku hydrogenu při ozařování polyetylénu s nízkým obsahem přísad
[32]

5.2.3 Výhody vyplívající ze síťování polymerů pomocí ionizačního záření

Existují dva hlavní důvody, proč se ozařují polymery. Prvním důvodem je, aby došlo k jisté modifikaci materiálu a tím k zlepšení jeho vlastností, druhým důvodem je sterilizace materiálu od nežádoucích látek.

Zlepšení mechanických vlastností termoplastů ozařováním:

- 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 oděruvzdornosti
- Zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem

U tepelných vlastností dochází v důsledku síťování k:

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

Ke zlepšeným chemickým vlastnostem patří:

- Zvýšení rozpustnosti
- Zlepšení odolnosti proti bobtnání
- Zvýšení odolnosti proti trhlinám způsobených pnutím
- Zlepšení odolnosti proti hydrolýze
- Zvýšení olejuvzdornost

Tyto zlepšení jsou však závislé od typu ozařovaného polymeru a dávce ozáření. 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. Spousta polymerů se pro ozařování vůbec nehodí, dochází k degradaci a zhoršení jejich vlastností.

5.3 Specifické výhody ozařovacích procesů nad ostatními chemickými alternativy

Radiační síťování nabízí výhody nebo možnosti speciálních aplikací oproti chemickým alternativám, jako jsou síťování pomocí silanu či peroxidu. Jsou zde stručně vyjmenovány:

a) Ionizační síťování probíhá při pokojové teplotě nebo může dojít k nárůstu teploty až na 60 °C. Díky těmto nízkým teplotám neexistují žádná omezení týkající se tepelně citlivých látek v polymeru.

b) Radiační síťování je technicky a ekonomicky schůdné řešení pro čistý fyzikální proces, neexistují žádné zbytky cizích látek potřebný pro chemický proces. Ty mohou omezit použitelnost síťování produktů v oblastech, jako jsou potravinářské obaly a lékařské nástroje, nebo můžou změnit vlastnosti, které jsou nezbytné pro zvláštní použití. Variace stupně zesítění v rámci produktu může být dosažena v případě elektronového paprsku vhodnou volbou stupně ozáření anebo pomocí kovové masky, která pohltí elektrony anebo sníží jejich energii před dosáhnutím povrchu výrobku. Proto je možné vyrábět z jedné suroviny výrobky s lokálně různými materiálovými vlastnostmi. Řada průmyslových odvětví již využívá této unikátní možnosti, například výroba těžkých nákladních vozidel a pneumatik.

c) V procesu tvorby výrobku pomocí ionizačního síťování může být kontrola kvality provedena ještě před zesíťováním. Pokud jakákoliv část výrobku nesplňuje požadované specifikace, může být materiál recyklován ještě před zesíťováním, to vede k výraznému snížení ztráty materiálu.

d) Vzhledem k povaze pomalého pronikání tepla do hloubky při použití ozařování se rychlost navinovaných produktů, například drátů nízkého napětí (1kV), pohybuje od 500 do 600 m/min, kdežto při použití síťování pomocí silanu se rychlost pohybuje od 60 do 200 m/min.

e) Ozařovací technologie nemusí mít licenci od konkrétního dodavatele a tím je větší volnost při objednávání materiálů.

5.4 Základní veličiny a jednotky z oboru záření

Znalost fyzikálních veličin je v každé oblasti techniky a fyziky velmi důležitá. V problematice ionizujícího záření je to o to důležitější, že tyto veličiny a jednotky nejsou obecně moc známé. V následujících odstavcích jsou postupně probrány veličiny a jednotky týkající se zdrojů záření a působení záření na látky.

5.4.1 Veličiny charakterizující zdroje záření

a) Poločas přeměny – *T* (s, min, h, r)

Udává dobu, za kterou klesne počet atomů radionuklidu na polovinu původního počtu atomů.

b) Přeměnná konstanta – λ (s^{-1})

Udává relativní rychlost rozpadu radionuklidu.

c) Aktivita – *A* (Bq)

Je počet radioaktivních přeměn (rozpadlých atomů) v radionuklidu za jednotku času. Jednotkou aktivity je becquerel (Bq), jehož rozměr je s^{-1}. V praxi se vesměs používají její násobky (kBq, MBq, GBq, atd.), jelikož se jedná o velmi malou jednotku (znamená jednu přeměnu za sekundu). Dříve se používali jednotky curie (Ci), přičemž 1 Ci = $3{,}7.10^{10}$ Bq.

Aktivita radionuklidu není konstantní veličina, ale klesá s časem podle exponenciálního vztahu

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\frac{0{,}693}{T}},$$

kde A_0 – počáteční aktivita radionuklidu v čase t = 0 (Bq)

A_t – aktivita radionuklidu v čase t (Bq)

T – poločas přeměny radionuklidu (s).

Aktivita radionuklidu závisí na jeho hmotnosti, lze odvodit ze vztahu

$$A = \lambda \cdot n ,$$

kde počet atomů nahradíme hmotností

$$n = \frac{m}{M} N ,$$

kde m – hmotnost radionuklidu

M – molární hmotnost radionuklidu

N – Avogadrovo číslo ($6{,}023.10^{26}$ kilomol^{-1}).

Dosazením vychází

$$A = \lambda \cdot \frac{n}{M} N$$
$$A = \frac{0{,}693 \cdot N}{T \cdot M} m ,$$

kde T – poločas rozpadu radionuklidu.

K přesnější charakteristice radionuklidu je nutné vztáhnout aktivitu k vhodné hmotnosti, objemové nebo plošné jednotce (např. Kg, m^3, m^2). Pak obdržíme

- hmotnostní aktivitu a_m (Bq.kg^{-1})
- objemovou aktivitu a_v (Bq.m^{-3},Bq.l^{-1})
- plošnou aktivitu a_s (Bq.m^{-2})

d) Energie emitovaných částic

Jedná se o významnou veličinu jednak proto, že energie emitovaných částic je jednoznačnou charakteristikou radionuklidu, který tyto částice emitují a jednak proto, že vlastnosti záření (např. ionizace, dolet apod.) na energii výrazně závisí. Jednotkou energie je joul (J). Zde se však používá elektronvolt (eV), nebo jeho násobky (keV, MeV atd.), přičemž platí 1eV = $1{,}6.10^{-13}$J.

5.4.2 Veličiny charakterizující působení záření na látku

a) Dávka - *D*

Je energie záření absorbovaná v hmotnostní jednotce ozařované látky. Označuje se písmenem D. Jednotkou dávky je gray (Gy) s rozměrem $J.kg^{-1}$. Dávka 1 Gy tedy znamená, že v jednom kilogramu ozařované látky se absorbuje energie záření 1 J. Dříve používaná jednotka byl rad, přičemž 1 rad = 0,01 Gy.

b) Dávkový příkon - $\dot{D}$

Udává, jak rychle se dávka mění. Je definován jako změna dávky za jednotku času. Označuje se $\dot{D}$ a jeho jednotkou je $Gy.s^{-1}$.

c) Stupeň zesítění – *G* (x)

Nejdůležitější kvantitativní charakteristikou zářením vyvoleného síťování je stupeň zesítění obvykle vyjádřený jako G (x), počet zesítění vytvořena při absorbování 100 eV. Jednotkou G (x) je $\mu mol.J^{-1}$. Hodnoty G (x) pro vybrané druhy polymerů jsou uvedeny v *Tab. 4.*

Tab. 4 Hodnoty G (x) pro polymery ozářené za pokojových teplot

Polymer	*G* (x) (zesítění/100eV)
Nízko-hustotní polyetylén	0,8-1,25
Lineární nízko-hustotní polyetylén	0,7-1,1
Vysoko-hustotní polyetylén	0,3-1,25
Polypropylen (isotaktický)	0,3-0,5
Polypropylen (ataktický)	0,4-1,1
Etylen-propylen kopolymer	0,4-1,1
Polyvinyl acetylen	0,1
Poly(methyl akrylát)	0,5
Poly(vinyl chlorid)	0,3
Polystyren	0,02-0,05
Polydimethylsiloxan	2,6-3,0
Polydifenylsiloxan	0,13
Přírodní kaučuk	1,3-1,5
1,2-Polybutadien, (syndiotaktický)	14,3
cis-1,4-Polybutadien	cca30
Polyamid	0,5-1,15

5.5 Zařízení pro ozařování polymerů

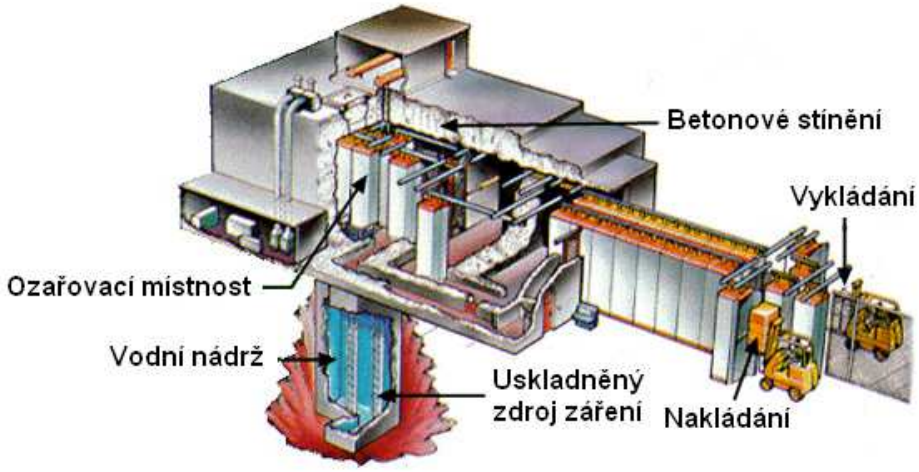
V současné době se v průmyslovém odvětví, zabývajícího se ozařováním polymerů, používají dva typy záření: gama záření a urychlených elektronů. Výhodou gama záření je skutečnost, že její technologie je jednoduchá, paprsky dobře prostupují materiálem a není tak náročná na elektřinu oproti urychleným elektronům. Gama zdroje se používají ve velké míře pro radiační sterilizaci lékařských jednorázových plastových produktů. Urychlené elektrony umožňují vysokou dávku ozáření a proto krátkou dobu zpracování. I když mají omezený průnik ve srovnání s gama zářením, mají dobré využití energie, protože se většina záření absorbuje do ozařovaného vzorku. Na rozdíl od gama zařízení, kde se pro odstínění záření musí zdroj ponořit do vodní nádrže, lze urychlovač elektronů vypnout, pokud se nepoužívá.

Podle druhu záření můžeme rozdělit jejich zdroje tak, jak je uvedeno na *Obr. 20*. [20]

Obr. 20 Zdroje ionizujícího záření používané pro ozařování polymerů

5.5.1 Zařízení pro gama ozařování

U průmyslových zařízení se dnes obvykle používá jako zdroj gama záření radionuklidu kobaltu Co60, který emituje záření gama se střední energií cca 1,3 MeV a s vysokou penetrací. Celkové dávky ozáření se dosahuje opakovaným objížděním palety kolem zdroje, přičemž se současně v poli záření nachází více palet najednou. Doba ozařování činí v závislosti na požadované dávce až několik hodin. Oproti elektronovým urychlovačům není možné u gama zařízení samotný zdroj záření vypnout. Aby bylo přesto možné bez rizika vstoupit do ozařovacího prostoru, musí být záření odcloněno. Z toho důvodu jsou zdroje Co60 ponořeny do vodní nádrže. Sloupec vody nad zdrojem plní funkci clony. [13] Na *Obr. 21* je schematicky znázorněné zařízení pro gama ozařování.



Obr. 21 Gama zařízení

5.5.2 Urychlovače elektronů

Zařízení pro tvorbu elektronových paprsků hraje výraznou roli při zpracování polymerních materiálů. Průmyslové urychlovače elektronů s energií v rozmezích od 150 do 300 keV se používají v aplikacích, kde se vyžaduje nízká penetrace, například vytvrzování povrchových nátěrů. Urychlovače pracující v rozsahu okolo 1,5 MeV se používají v případech, kdy se vyžaduje větší penetrace, například pro síťování kabelů. Vysoce-energetické urychlovače působící v rozsahu 10 MeV jsou využívány pro sterilizaci, například pro sterilizaci krabice naplněná jednorázovými zdravotnickým vybavením. [12]

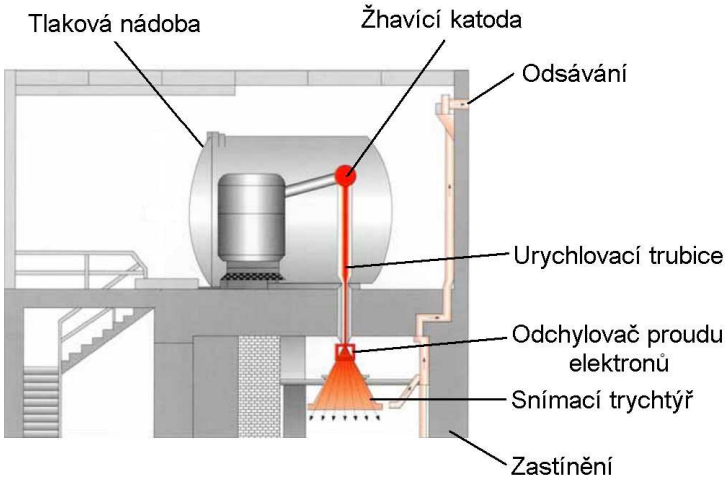
Výhodou elektronových urychlovačů je jejich nižší radiační nebezpečí (pokud je vypnutý, je naprosto bezpečný). Výkon, tvar a energie paprsku a intenzita proudu elektronů lze u urychlovačů elektronů dobře ovládat na rozdíl od radionuklidových zdrojů gama záření. Urychlovače jsou široce používaný v zařízeních pro polymerní modifikaci (síťování, vytvrzování, roubování) a méně často pro polymerizace. Hlavním omezením v používání urychlovače elektronů je jejich malá penetrace do polymerního materiálu (zhruba 0,5cm/MeV).[20]

Elektronové paprsky jsou citlivé na hustotu plynu v okolí objektu, který je ozařován. Při ozařování v normální atmosféře dochází k ionizaci kyslíku ve vzduchu a následně ionty kyslíku vytváří ozón. Po průchodu fólie okna snímacího talíře se elektrony zpomalí a rozptýlí o molekuly plynů v ovzduší. V důsledku toho musí být vyústění snímacího trychtýře umístěné velmi blízko ozařovaného materiálu.

Urychlovače jsou rozděleny:

- podle způsobu přenosu energií: (a) přímé urychlovače, (b) nepřímé urychlovače
- podle geometrie elektronové trajektorie (pro nepřímé urychlovače): (a) lineární urychlovače, (b) cyklické urychlovače
- v závislosti paprsku na čase: (a) stejnosměrně proudé akcelerátory, (b) impulsní akcelerátory (všechny lineární a cyklické urychlovače)
- podle velikosti energie urychlovače: (a) nízko-energetické urychlovače (méně než 300 keV), (b) středně-energetické urychlovače (od 300 keV do 4MeV), (c) vysoko-energetické urychlovače
- podle oblasti použití: (a) výzkumné urychlovače, (b) průmyslové urychlovače

Schéma urychlovače elektronů:



Obr. 22 Schéma urychlovače elektronů

Tlaková nádoba – části urychlovače elektronů jsou za účelem zabránění elektrickému výboji uloženy v tlakové nádobě, která je naplněna ionizujícím plynem. [13] *Obr. 23*

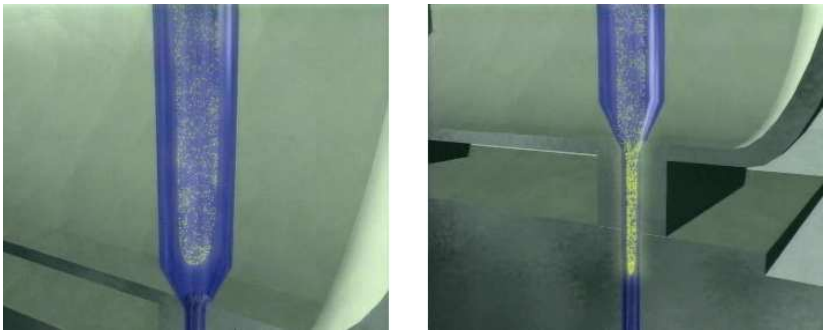
Obr. 23 Tlaková nádoba

Žhavící katoda – slouží k emitaci elektronů, které jsou následně urychlovány v elektromagnetickém poli. Rychlost, respektive energie elektronů, je závislá na střídavém napětí mezi žhavící katodou a anodou. [13] *Obr. 24*

Obr. 24 Žhavící katoda

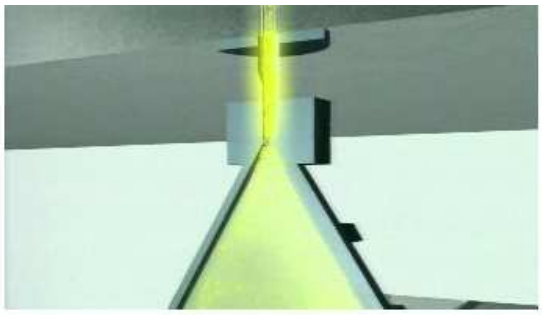
Odsávání – ozařováním polymerů vznikají nežádoucí plyny, které je nutno odsávat

Urychlovací trubice – žhavící katoda je napojena na svislou urychlovací trubici, která je naplněna vysokým vakuem. Z katody vystupující elektrony jsou „vázány“ elektromagnetickým polem do svazků a urychlovány. [13] *Obr. 25*



Obr. 25 Urychlovací trubice

Odchylovač proudu elektronů – Pomocí magnetického střídavého pole je proud elektronů odchýlen tak, že na ústí snímacího trychtýře vystupuje jako vějířovitý proud elektronů na výrobek. [13] *Obr. 26*



Obr. 26 Odchylovač proudu elektronů

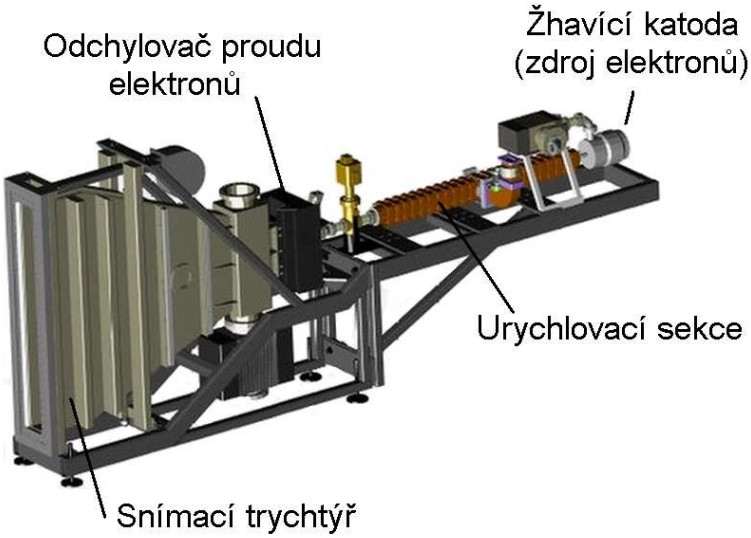
Snímací trychtýř – slouží k usměrnění odchýlených elektronů do požadovaného vějířovitého proudu elektronů. *Obr. 27*

Obr. 27 Snímací trychtýř

Zastínění – snímací trychtýř s výstupním oknem elektronů a potřebné logistické systémy pro manipulaci s výrobky jsou obklopeny betonovými zdmi. Tak je zajištěno, že bude absorbován přebytečný proud elektronů. [13]

5.5.2.1 Lineární urychlovače

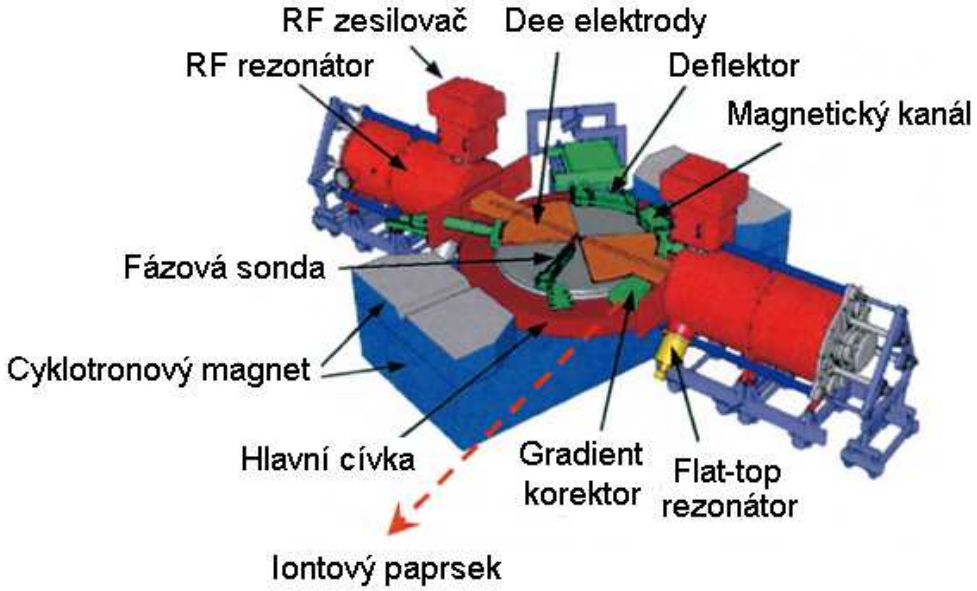
V lineárním urychlovači jsou elektrony akcelerované pomocí elektromagnetického pole vytvořeného vysokofrekvenčním generátorem v rezonátoru s toroidním tvarem s výstupem na jedné straně. Lineární urychlovače jsou velmi rozšířené, jsou používané i pro počáteční nízko-energetické vstřelení částic do kruhových urychlovačů. Nejdelší lineární urychlovač na světě se nachází ve Stanfordu s označením SLAC s délkou 3km. [17] Schéma lineárního urychlovač lze vidět na *Obr. 28*.



Obr. 28 Lineární urychlovač

5.5.2.2 Kruhové urychlovače

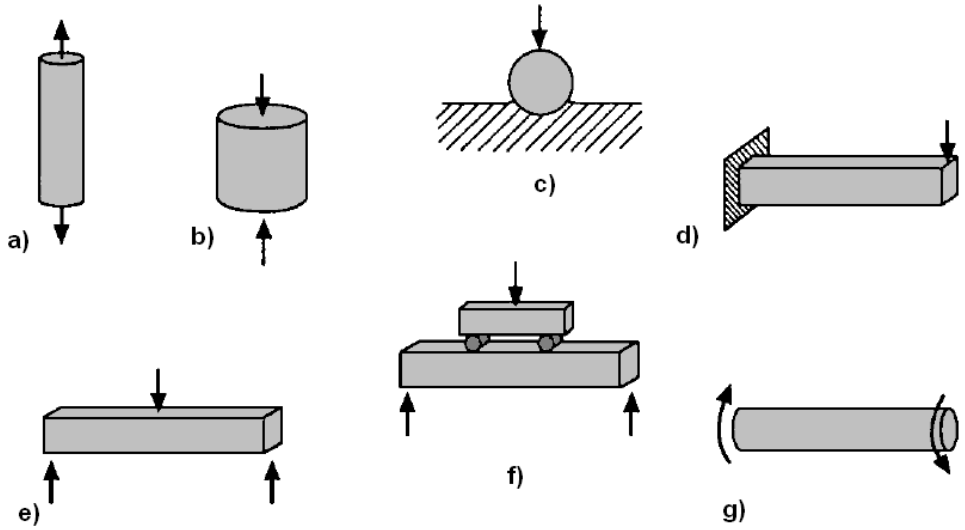
V kruhovém urychlovači se částice pohybují v kruhu, dokud nedosáhnou dostatečného množství energie. Dráha částic se obvykle usměrňuje do kruhu pomocí elektromagnetů. Výhodou kruhových urychlovačů oproti lineárním urychlovačům spočívá v tom, že kruhová topologie umožňuje nepřetržité zrychlení a v setrvání částic v pohybu po dobu neurčitou. Další výhodou je, že kruhový urychlovač je menší než lineární srovnatelného výkonu. Kruhové urychlovače mají ovšem nevýhodu v tom, že v závislosti na energii urychlené částice, uvolňují synchrotronové záření, které je velmi závislé na hmotnosti urychlené částice. Z tohoto důvodu je mnoho vysoko energetických urychlovačů lineárních. [17] Schéma kruhového urychlovače je vyobrazeno na *Obr. 29*.



Obr. 29 Kruhový urychlovač

6 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Výběr materiálu pro nejrůznější aplikace je často založen na mechanických vlastnostech, jako je pevnost v tahu, modul, tažnost, vrubová houževnatost atd. Protože je potřeba porovnávat naměřené vlastnosti, jsou tyto zkoušky 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 zlomení zkušebního tělíska. Některé běžné způsoby zatížení zkušebních tělísek jsou zobrazeny na *Obr. 30*.



Obr. 30 Běžné způsoby zatížení zkušebních tělísek

a) tah, b) tlak, c) tvrdost, d) 1-bodý ohyb

e) 3-bodý ohyb, f) 4-bodý ohyb, g) krut

Zkoušky mechanických vlastností můžeme rozdělit buď podle charakteru zatěžování na statické, dynamické a únavové (cyklické), nebo podle úrovně zkušební teploty na zkoušky za normální teploty, zkoušky za vysokých nebo nízkých teplot. Z hlediska stavu napjatosti ve zkušebním tělese v průběhu zkoušky můžeme dále rozdělit mechanické zkoušky na zkoušku jednoosým tahem, zkoušku tlakem, zkoušku ohybem, střihem a krutem. Volba druhu mechanických zkoušek v praxi závisí hlavně na budoucím charakteru namáhání součásti.

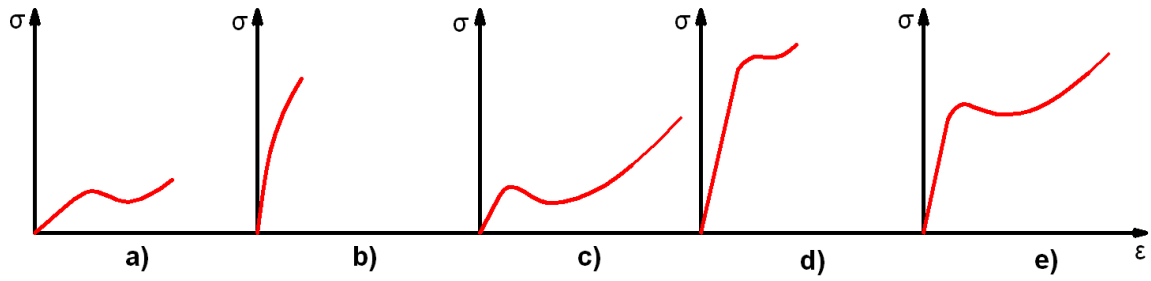
Statické zkoušky - Při těchto zkouškách je materiál namáhán pomalu se měnícími silami. Síla se zvyšuje rovnoměrně pomalu, obvykle do okamžiku poškození či úplné destrukce zkušebního vzorku. [19]

Dynamické zkoušky - Působení síly se mění buď rázem, nebo za velmi krátký časový úsek. Někdy se pracuje také tak, že působení síly je dlouhodobé, ale její velikost se mění periodicky v extrémně krátké době. [19]

Únavové zkoušky - Mechanické vlastnosti se zkoušejí dlouhodobě za předepsaných podmínek časově proměnného namáhání, obvykle až do porušení materiálu. Pro jednotlivé druhy plastických hmot bývají tyto zkoušky rozličné. [19]

6.1 Tahová zkouška polymeru

Zkouška tahem je nejstarší a nejrozšířenější mechanickou zkouškou. Zkouška se provádí na univerzálních zkušebních strojích, které mohou též provádět zatěžování tlakem, nebo ohybem, staticky či cyklicky. Způsob provádění zkoušky je daný normou ČSN EN ISO 527-1, 527-2. Tahovou zkouškou se zjišťují základní krátkodobé mechanické vlastnosti materiálů. Zkušební těleso je při ní natahován silou ve směru své podélné osy při konstantní rychlosti posuvu čelistí až do porušení. Vzhledem k faktu, že polymerní materiály v praxi nejsou isotropní, tudíž vlastnosti plastů se v různých místech liší a tahové napětí není rozloženo rovnoměrně, tak dochází i k smykovému napětí. Podstata tahové zkoušky plastů je stejná jak u kovů, ale viskoelasticita plastů vyžaduje některé metodické odchylky, které jsou předepsány normou. Z tahového diagramu můžeme rozlišit, o jaký materiál se jedná. *Obr. 31* zobrazuje typické průběhy tahových křivek pro několik druhů polymerního materiálu.



Obr. 31 Typy tahových křivek

Na *Obr. 31 a)* je zobrazena charakteristická křivka měkkého a málo pevného materiálu s nízkým modulem, nízkým napětím na mezi kluzu a s mírným protažením při přetržení. Dobrým příkladem takového typu materiálu je polytetrafluoroetylen (PTFE).

Na *Obr. 31 b)* je znázorněn průběhu tvrdého a křehkého materiálu vyznačujícího se velkým modulem a nízkou tažností. Může nebo nemusí mít mez kluzu před přetržením.

Na *Obr. 31 c)* je zobrazen měkký, ale houževnatý materiál s nízkým modulem a nízkou mezí kluzu, ale s velmi vysokou tažností. Příkladem tohoto materiálu můžeme uvést nízkohustotní polyetylén (LDPE).

Na *Obr. 31 d)* je uveden průběh tvrdého a pevného materiálu mající vysoký modul, vysokou mez kluzu, obvykle vysokou mez pevnosti a nízkou tažnost.

Na *Obr. 31 e)* je charakteristická křivka tvrdého a houževnatého materiálu s vysokým modulem, vysokou mezí kluzu, velkým prodloužením při prodloužení a s vysokou mezí pevnosti. Tyto vlastnosti má například polykarbonát.

6.1.1 Měřené veličiny a jejich symboly

Při vyhodnocování křivky se používají některé pojmy, v jejichž názvech a symbolech není ve všech normách jednotnost.

Smluvní napětí na mezi kluzu σ_y

První napětí, při kterém deformace narůstá bez přírůstku napětí. Mez kluzu je charakteristická pro tvárné semikrystalické a tvárné lineární amorfní termoplasty a pro některé amorfní modifikované elastomery. Při překročení σ_y se ze smykového pásu vytvoří stabilní krček a průřez tělesa se v tomto místě výrazně zmenší. Během vtahování dosud nepřetvořeného polymeru do krčku dochází k orientaci makromolekul, u semikrystalických polymerů se rozrušuje původní krystalická struktura a vzniká nová, mikrofibriální struktura. Protože průřez tělesa se při zkoušce stále mění, je zjišťování skutečného napětí obtížné. V praxi se tedy obvykle pracuje se smluvním napětím, což je síla vztažená na počáteční průřez zkušebního tělesa a je daná vztahem:

$$\sigma_y = \frac{F_y}{S_0} \quad [MPa],$$

kde F_y [N] je síla na mezi kluzu a S_0 [mm^2] je počáteční průřez

Smluvní napětí při přetržení σ_B

Tahové napětí, při kterém dojde k přetržení zkušebního tělesa, pro které platí vztah:

$$\sigma_B = \frac{F_B}{S_0} \quad [MPa],$$

kde F_B je síla při přetržení [N]

Smluvní napětí na mezi pevnosti v tahu σ_M

Maximální tahové napětí dosažené během tahové zkoušky vyjádřené vztahem:

$$\sigma_M = \frac{F_M}{S_0} \quad [MPa],$$

kde F_M je maximální síla [N]

Poměrné prodloužení při přetržení ε_B

Poměrná tahová deformace při porušení tělesa, u kterého nedošlo ke skluzové deformaci. Poměrné prodloužení při přetržení ε_B je stanoveno na základě údajů průtahoměru měřícího na původní vzdálenosti (L_0=50 mm). Zde platí vztah:

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad [\%],$$

kde ΔL je přírustek vzdálenosti mezi upínacími čelistmi při přetržení [mm]

L_0 je původní vzdálenost daná normou [mm]

Nominální poměrné prodloužení při přetržení ε_{tB}

Je tahová deformace při porušení tělesa odečtená z velikosti posuvu horní či dolní čelisti, která je vztažena na vzdálenost mezi upínacími čelistmi daná normou (L=115 mm). Zjišťuje se, pokud při měření deformací nebylo použito průtahoměru anebo u tělesa došlo ke skluzové deformaci. Tento vztah je daný:

$$\varepsilon_{tB} = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100 \quad [\%],$$

kde L je vzdálenost mezi upínacími čelistmi daná normou [mm]

Modul pružnosti v tahu *E* (Youngův modul)

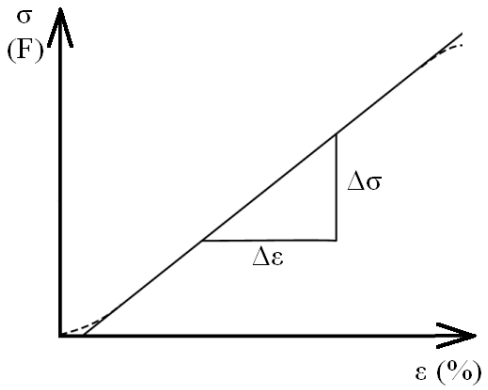
Udává podíl napětí v tahu a poměrného prodloužení v oblasti, ve které existuje lineární závislost mezi napětím a prodloužením, tedy $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} > 0$ při zatěžování. V této oblasti platí Hookův zákon. Modul pružnosti v tahu je vyjádřen vztahem:

$$E = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad [MPa],$$

kde σ_t je napětí v tahu v lineární oblasti [MPa]

ε_t poměrné prodloužení v lineární oblasti [-]

Jako počátek pro stanovení poměrného prodloužení k vyjádření modulu pružnosti je možno brát průsečík prodloužení počáteční přímkové části závislosti „síla - prodloužení“ s osou prodloužení *Obr. 32*. Experimentální chyby a nevyhnutelné nedokonalosti zkušebního zařízení jsou příčinou toho, že přímka proložená počáteční oblastí hodnot neprochází počátkem. [33]



Obr. 32 Závislost „napětí – poměrné prodloužení“ v počáteční oblasti

Poissonovo číslo μ

Je relativní změna průřezu v závislosti na relativní změně délky, platí vztah:

$$\mu = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_l} \quad [-],$$

kde ε_s je relativní změna průřezu [-]

ε_l je relativní změna délky [-]

Pro změnu objemu při prodloužení byl odvozen tento vztah:

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta V}{V_0} \approx (1-2\mu)\cdot\frac{\Delta L}{L_0} \quad [-],$$

kde ΔV je rozdíl změny objemu [mm^3]

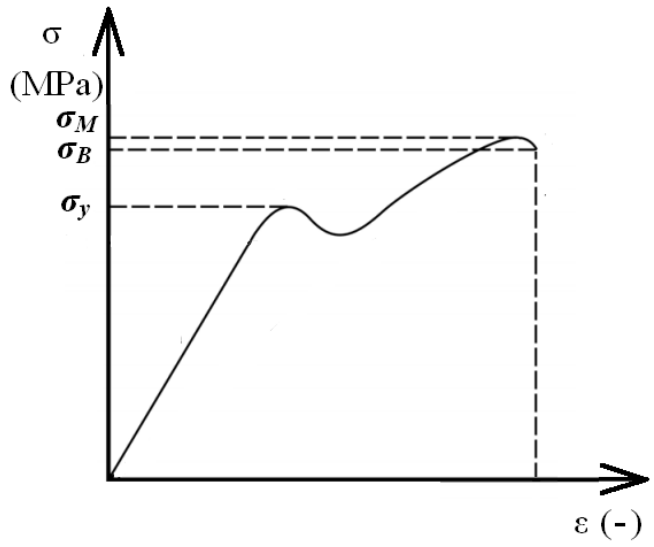
V_0 je původní velikost objemu [mm^3]

ΔL je rozdíl délky [mm]

Podle tohoto vzorce může hodnota Poissonova čísla dosáhnout maximálně hodnoty 0,5.

Výše zmíněné vztahy neplatí zcela přesně, jelikož přísně lineární závislost prodloužení na napětí není dodržena u žádného materiálu. Proto se můžeme v praxi setkávat menšími odchylkami od Hookova zákona.

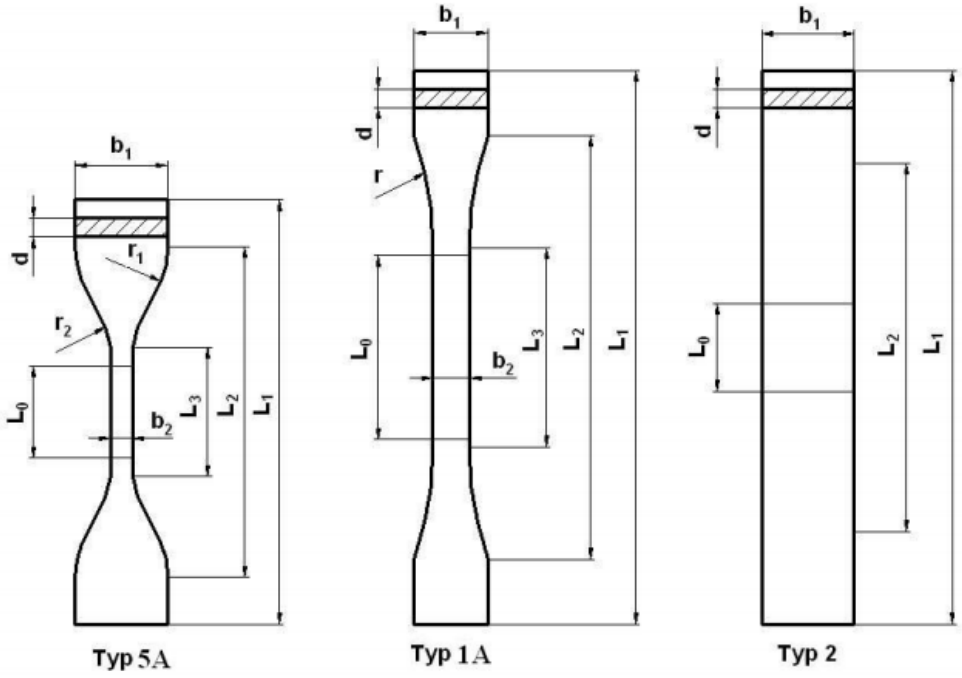
Obecná tahová křivka polymerů je velmi podobná tahovým křivkám kovů. Idealizovaně je nakreslena na *Obr. 33*. V průběhu zkoušky se trvale měří síla a prodloužení zkušebního tělesa. Z křivky „síla – prodloužení“ se vyhodnocují charakteristické veličiny ze zkoušky tahem. [34]



Obr. 33 Obecná křivka „síla – prodloužení“

6.1.2 Zkušební tělíska

Zkušební tělíska, ať jsou již připravena jakýmkoliv způsobem, mívají různé tvary, buď podle předepsané zkoušky, nebo podle druhu materiálu. Bývají to tvary: různé kroužky, tyčinky, destičky, tvary lopatiček, válečků apod. V EN ISO 5272 jsou normalizována tělíska pro zkoušky tahem. Na *Obr. 34* jsou pro názornost uvedeny tvary lopatiček a v *Tab. 5* pak příslušné rozměry. [34]



Obr. 34 Tvary zkušebních tělísek pro zkoušku tahem

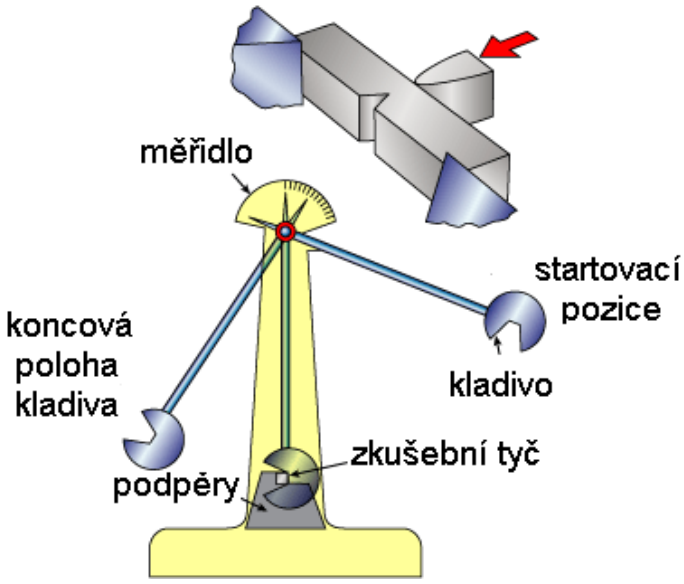
Tab. 5 Rozměry zkušebních tělísek

Rozměr v mm	**Typ 5A**	**Typ 1A**	**Typ 2**
Celková délka L_1	75	150	250
Vzdálenost označující hrany čelistí L_2	50±2	110±5	1705
Délka pracovní části L_3	25±1	80±0,5	x
Počáteční měřená délka L_0	20±0,5	50±0,5	501
Šířka upínací hlavy b_1	12,5±1	20±0,5	250,5
šířka pracovní části b_2	4±1	10±0,5	x
Velký poloměr zakřivení r_1	12,5±1	x	x
Malý poloměr zakřivení r_2	8±0,5	x	x
Poloměr zakřivení r	x	20-25	x
Doporučená tloušťka	4±0,2	4±0,2	4±0,2

6.2 Zkouška rázové houževnatosti v ohybu

Zkouška rázem zjišťuje citlivost materiálu vůči místní koncentraci napětí při rázovém namáhání. Zkouška spočívá v přeražení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva za podmínek stanovených v normě ČSN EN ISO 179, přičemž zkušební tyč má uprostřed vrub a je podepřena na obou koncích (tříbodový ohyb). Kladivo naráží ze strany protilehlé k vytvořenému vrubu a při zkoušce dochází k otevírání vrubu. Výsledkem zkoušky je tzv. nárazová práce v joulech, což je práce spotřebovaná k přeražení zkušební tyče. [35]

Nejrozšířenější metodou je používání Charpyho kladiva, kde autor zkoušky zavedl pojem rázové houževnatosti, již definoval jako práci potřebnou k přeražení zkušební tyče průřezu 1cm^2, opatřené vrubem předepsaných rozměrů. Takto definovaná hodnota vrubové houževnatosti tudíž neměla fyzikální charakter a výsledky zkoušek byli navzájem srovnatelné jen tehdy, byly-li získány při totožných rozměrech zkušební tyče a při stejných podmínkách. Neexistuje všeobecná metoda pro přepočet výsledků zjištěných při jedné metodě zkoušení s hodnotami zjištěnými jinou zkušební metodou. Princip kladiva je znázorněn na *Obr. 35*.



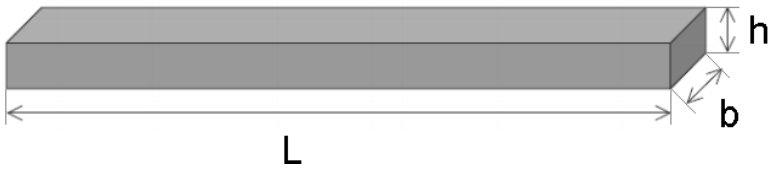
Obr. 35 Schéma Charpyho kladiva

6.2.1 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa se připravují lisováním či vstřikováním z daného materiálu podle příslušné normy ISO 293, ISO 294, ISO 295, ISO 2557-1 nebo ISO 2557-2, nebo jsou zhotoveny mechanickým obráběním podle ISO 2818 z desek, které byly připraveny lisováním nebo vstřikováním výchozích materiálů. Rozměry zkušebních těles jsou normalizovány a dovolují použít několik typů, rozměry jsou uvedeny v *Tab. 6* a tvar zkušebního tělesa bez vrubu je uveden na *Obr. 36*.

Tab. 6 Rozměry zkušebních těles pro zkoušku rázové houževnatosti

	Zkušební tělesa		
Rozměry v mm	**velké**	**střední**	**malé**
délka l	80±2	25h	(11 nebo 13)h
šířka b	10±0,2	10 nebo 15	10 nebo 15
tloušťka h	4±0,2	3	3
vzdálenost podpěr L	62+0,5	20h	(6 nebo 8)h



Obr. 36 Tvar zkušebního tělesa

6.2.2 Typy vrubů

Vruby se připravují mechanicky obráběním podle ISO 2818. Je možné použít zkušební tělesa s vrubem připraveným tvářením, pokud je to předepsáno v normě pro zkoušený materiál. Zkoušky na zkušebních tělesech s vruby připravenými tvářením neposkytují porovnatelné výsledky se zkouškami provedenými na zkušebních tělesech s vruby připravenými obráběním. [36]

Jsou předepsány dva typy vrubů:

a) V-vrub s úhlem 4 5± 2 [°] a hloubkou 2 mm, tj. výška zkušební tyče v místě vrubu bude 8 ± 0,06 [mm] a poloměrem zaoblení dna vrubu 0,25 ± 0,025 [mm].

b) U-vrub má oblouk 5 mm, tj. výška zkušební tyče v místě vrubu má být 5 ± 0,09 [mm] a poloměr zaoblení dna vrubu 1 ± 0,07 [mm].

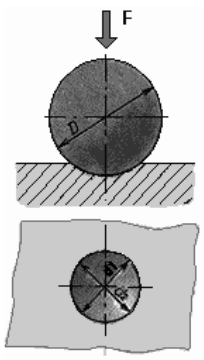
6.3 Zkouška tvrdosti

Tvrdost je definovaná jako odolnost materiálu proti deformaci, zejména trvalé deformace nebo poškrábání. Tvrdost je čistě relativní pojem a neměla by být zaměňovaná s opotřebením a odolností proti oděru plastů. Zkouška je dále komplikovaná fenoménem tečení (creep). Vzhledem k tomu se plasty značně liší s ohledem na tvrdost, a proto jeden typ zkoušky tvrdosti nepokryje celý rozsah tvrdosti polymerních materiálů.

Používanými normovanými metodami pro plasty jsou měření tvrdosti podle Brinella, Vickerse, Rockwela, Shore, atd. Každá z těchto metod se dále dělí v závislosti na použitém tlaku a tvaru zkušebního tělíska i na rozměrech zkušebního vzorku. Účel a použití jednotlivých měřících metod je obsaženo v jednotlivých přepisech norem. [33]

6.3.1 Měření tvrdosti podle Brinella

Zkouška spočívá ve vtlačování vnikacího tělesa, vyleštěnou kuličkou o průměru *D (Obr. 37)*, do povrchu zkušebního tělesa silou *F* po stanovenou dobu. Následně se odlehčí a změří se průměr *d* a vypočítá povrch vtisku *A*. Průměr *D* bývá 1; 2,5; 5 a 10 mm. Průměr kuličky závisí na tloušťce měřeného materiálu. U této zkoušky platí, že minimální tloušťka materiálu je osminásobek hloubky vtisku, aby se neprojevil vliv tvrdosti podložky. Vzdálenost středu vtisku od okraje je nejméně 2,5 *d* a vzájemná vzdálenost středů sousedních vtisků je nejméně trojnásobek středního průměru vtisku. Označení tvrdosti je HB a k ní připojených údajů podmínek zkoušky, tj. průměru kuličky *D*, síly *F* a doby zatížení *t*. Tyto údaje jsou od sebe odděleny lomítkem (např. HB 5/7500/30 = 320). Tvrdost podle Brinella se pak vypočítá ze vztahu: $HB = \left(\frac{0{,}102 \cdot F}{A} \right)$ [–],



Obr. 37 Zkouška tvrdosti dle Brinella

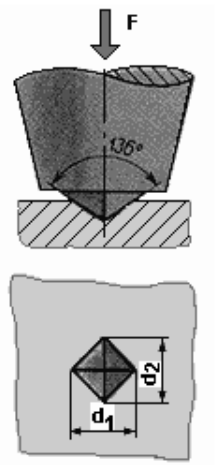
6.3.2 Měření tvrdosti podle Vickerse

Zkouška spočívá ve vtlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu (*Obr. 38*) o daném vrcholovém úhlu 136° silou F po danou dobu t. Následně se změří délka obou úhlopříček vtisku. Zatížení je v rozsahu obvykle od 49 do 981 N dle ISO 6507-1. Tloušťka zkušebního tělesa musí být nejméně 1,5 *d*. Tvrdost dle Vickerse označujeme HV a stanovíme ji podle vztahu:

$$HV = 0{,}189 \cdot \left(\frac{F}{d^2} \right) \quad [-],$$

kde F je síla vtlačování [N]

d je aritmetický průměr délek úhlopříček [mm]



Obr. 38 Zkouška dle Vickerse

6.3.3 Měření tvrdosti podle Rockwela

Měřítkem pro posouzení tvrdosti není u této metody plocha vtisku, ale jeho hloubka. Pro měkké materiály se používá ocelová kulička o průměru 1,59 mm, pro tvrdé materiály se používá diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°.

Diamantový kužel či ocelová kulička, dotýkající se povrchu zkoušeného předmětu, se nejprve předběžně zatíží silou 100 N. Potom se pozvolna zvyšuje zatěžovací síla tak, aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsané normou (např. předběžné zatížení silou 100 N + zkušební zatížení silou 1400 N = celkové zatížení silou 1500 N). Následně se

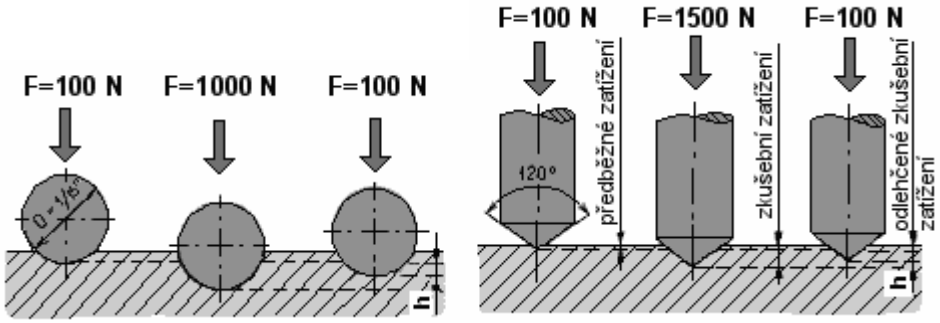
zatěžující síla zmenší až na 100 N a v tomto stavu se zjistí přírůstek hloubky vtisku *h*, který nastal proti výchozí poloze při 100 N. (*Obr. 39*)

V ČR jsou normalizovány tři zkoušky tvrdosti podle Rockwella. Tvrdost zjištěnou při těchto zkouškách označujeme HRA, HRB, HRC. Volba Rockwellovy stupnice (tj. druhu vnikajícího tělíska) závisí hlavně na předpokládané tvrdosti zkoušeného materiálu.

HRA - Tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 600 N.

HRB - Tvrdost určená ocelovou kuličkou (B = ball) při celkovém zatížení 1000 N.

HRC - Tvrdost určená diamantovým kuželem (C = cone) při celkovém zatížení 1500 N.



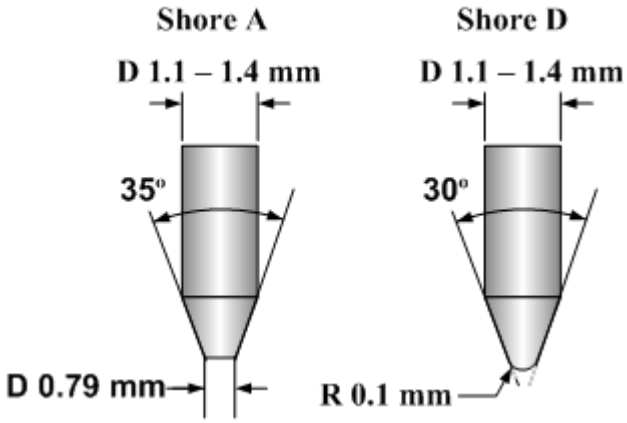
Obr. 39 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (HRB, HRC)

6.3.4 Měření tvrdosti podle Shore

Existuje celá řada přístrojů tohoto typu lišících se rozsahy. V ČR se nejvíce rozšířilo používání přístrojů typu Shore A a D (*Obr. 40*). Tvrdost je nepřímo úměrná vniku hrotu do zkoušeného materiálu a vyjadřuje se v jednotkách Shore A nebo Shore D. Při překročení 85 jednotek stupnice Shore A se přechází na měření tvrdosti Shore D. Podstatou zkoušky Shore je měření odporu proti vtlačení hrotu předepsaného tvaru do materiálu. Tvrdost je dána hloubkou vtisku.

Charakteristickou vlastností této metody je jednoduchá obsluha přístroje, přímé zobrazení tvrdosti a možnost provádět měření na výrobcích mimo laboratoř tak, že se přístroje jednoduše přiloží k měřenému výrobku. Podmínky měření tvrdosti plastických hmot metodou Shore popisuje norma ČSN ISO 7619. [40]

Zkušební těleso musí být rovné, hladké a bez viditelných defektů. Jednotlivá měření se musí provádět v místech vzdálených nejméně 12 mm od okraje a od sebe vzdálených nejméně 6 mm. Tloušťka musí být minimálně 6 mm, ale lze ji dosáhnout složením z několika tenčích vrstev.



Obr. 40 Zkušební hroty tvrdoměru typu Shore A a Shore D

6.3.5 Faktory ovlivňující výsledky měření

U všech zkoušek tvrdosti je třeba mít na zřeteli následující ovlivňující faktory: teplotu vzorku, dobu zatížení, rychlost zatížení, tloušťku vzorku, plochu vzorku, podložení vzorku, vzdálenost hrotu od okraje vzorku a přesnost zatěžování. Odchyluje-li se skutečná teplota od požadovaných 23 °C, což v netemperovaných místnostech nelze zajistit, lze zjistit změnu tvrdosti do cca 4 %. Zkušební síla musí působit po předepsanou dobu a bez nárazu. Je-li hloubka vniknutí ve fázi zatěžování a odlehčování zaznamenávána kontinuálně, např. induktivním snímačem, získá se přehled o časové závislosti chování materiálu a jeho vlastnostech (tečení). [41]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je studium vlivu záření na vlastnosti LDPE a HDPE.

Práce zahrnuje:

- Přípravu zkušebních tělísek vstřikováním
- Ozáření zkušebních tělísek různými dávkami záření v rozsahu 0 až 198 kGy
- Zkoušky mechanických vlastností (tahové, rázové) při různých teplotách
- Termomechanickou analýzu

Výsledky zkoušek budou statisticky zpracovány a vyhodnoceny

8 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

8.1 Vstřikovací stroj

Pro vstřikování vzorku polyetylenu byl využit vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C (*Obr. 41*) vybavený řídicím systémem SELOGICA umožňující rychlé a snadné programování a rovněž i rychlé ovládání stroje.

Obr. 41 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C

Systém řízení stroje se programuje graficky pomocí symbolů. Výsledkem je srozumitelné a přehledné zobrazení automatického cyklu v podobě postupového diagramu na obrazovce výklopného terminálu. Jednotlivé funkce ALLROUNDERu, zejména při souběžných cyklech, je tak možno na první pohled snadno rozeznat a změnit. Obrazovky parametrů lze vyvolat přímo z naprogramovaného průběhu cyklu a zde zadat příslušná data.

Technické parametry

Tab. 7 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG

Typ stroje	Allrounder 420C	
Uzavírací jednotka		
Uzavírací síla	1000	max. kN
Otevírací síla / zvýšená otevírací síla	35 / 250	max. kN
Otevření	500	max. mm
Vzdálenost mezi vodícími sloupy	420x420	mm
Velikost upínací desky (šířka x výška)	570x570	mm
Vyhazovací síla	40	max. kN
Zdvih vyhazovače	175	max. mm
Hydraulika, pohon		
Výkon čerpadla	22	kW
Celkový příkon stroje	33,9	kW
Vstřikovací jednotka		
Průměr šneku	40	mm
Poměr šneku	20	L / D
Zdvih šneku	145	max. mm
Objem dávky	182	max. cm^3
Vstřikovací tlak	2120	max. bar
Vstřikovací rychlost (objemová)	168	max. $cm^3.s^{-1}$
Zpětný tlak pozitivní / negativní	350 / 160	max. bar
Krouticí moment šneku	700	max. Nm
Přítlačná síla trysky	70	max. kN
Objem násypky	50	l
Olejová náplň a hmotnost		
Množství oleje	235	l
Hmotnost stroje, bez oleje	3700	kg

8.2 Zkušební zařízení pro zkoušku tahem

Zkouška v tahu je prováděna na univerzálním trhacím stroji ZWICK ROELL 1456 (*Obr. 42*). Přístroj umožňuje provádět zkoušky v tahu, tlaku a ohybu. Trhací stroj je napojený na počítač a naměřená data zpracovává v programu Test Xpert Standart. Program zobrazuje naměřená data jak pomocí grafického znázornění zatěžujícího napětí, tak i v tabulce se základními statistickými hodnotami.

Obr. 42 Univerzální trhací stroj Zwick Roell 1456

Technické parametry

Rozsah zkušební síly: 0,02 N – 20 kN

Rychlost posuvu příčníku: 0,001 – 1500 mm/min

Odchylka v závislosti na zkušební rychlosti: 1% - 0,3%

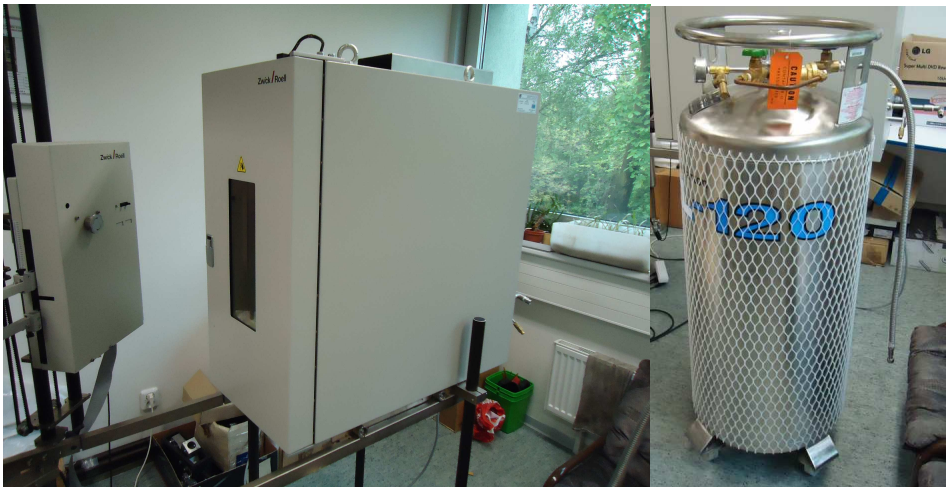
Testovací prostor (výška x šířka): 1160 mm x 420 mm

Tab. 8 Přehled technických parametrů trhacího stroje Zwick Roell 1456

Typ stroje	ZWICK ROELL 1456	
Rozměry stroje a hmotnost		
Strojová výška	1284	mm
Celková výška	2012	mm
Celková šířka	630	mm
šířka pracovniho prostoru	420	mm
Hmotnost	150	kg
Dynamika stroje		
Maximální zkušební síla stroje	20	kN
Maximální rychlost posuvu příčníku	750	mm/min
Ostatní parametry		
Extenzometry pro měření protažení	macro	
	přídavný	
Vyhodnocovací software	mastr - tah	
	standart - ohyb a tlak	
	standartní hysterzní Cyklické zkoušky	

8.2.1 Teplotní komora

Pro měření tahové zkoušky za zvýšené teploty 100°C a pro ochlazení zkušebních tělísek na teplotu -20°C byla použita teplotní komora Zwick W91255 (*Obr. 43*). Konstrukce teplotní komory umožňuje provádět tahové zkoušky uvnitř komory a to i ve spojení s extenzometry, to umožňuje přesné měření zkušebních tělísek pod vlivem teploty. Ke snížení teploty byla teplotní komora napojena na nádobu s kapalným dusíkem.



Obr. 43 Teplotní komora a nádoba s tekutým dusíkem

8.3 Zkušební zařízení pro zkoušku vrubové houževnatosti

Rázová zkouška byla prováděna na zkušebním stroji CAEST Resil Impactor Junior (*Obr. 44*). Zkušební stroj je kyvadlové kladivo s tuhou konstrukcí. Musí být schopné měřit rázovou energii spotřebovanou k přeražení zkušebního tělesa. K vyhodnocení dat o provedené zkoušce je použit program DAS8WIN.

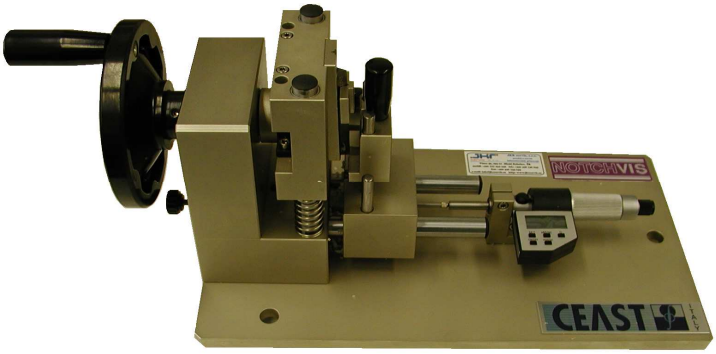
Obr. 44 Zkušební stroj CAEST Resil Impactor Junior

Tab. 9 Parametry zkušebního stroje CAEST Resil Impactor JR

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

8.3.1 Vrubovací stroj

Pro tvorbu vrubu hloubky 2 mm na tělískách tvaru tyčinek pro zkoušku vrubové houževnatosti byl použit manuální vrubovací stroj CEAST Notchvis (*Obr. 45*), který umožňuje pomocí digitálnímu přídavnému mikrometru tvorbu vrubu s přesností ± 0,001 mm. Vrub je umístěn uprostřed zkušebního tělesa a má tvar písmene V s úhlem 45°a rádiusem v kořenu 0,25 mm



Obr. 45 Vrubovací stroj CEAST Notchvis

8.4 Zkušební zařízení pro zkoušku tvrdosti Shore D

Měření tvrdosti bylo provedeno na ručním digitálním tvrdoměru Shore typu HPE s přesností ±0,5 Shore (*Obr. 46*). Pro měření tvrdosti zkušebních tělísek byla zvolena měřící hlava typu Shore D. Tento tvrdoměr splňuje podmínky měření tvrdosti podle normy ČSN EN ISO 868.

Obr. 46 Měřící zařízení Shore typu HPE

8.5 Zkušební zařízení TMA

Pro měření tepelně-mechanické analýzy bylo použito zkušební zařízení Perkin Elmer TMA-7 (*Obr. 47*). Zařízení je schopné měřit rozpínavost a smrštění, ohyb a průnik sondy do materiálu.

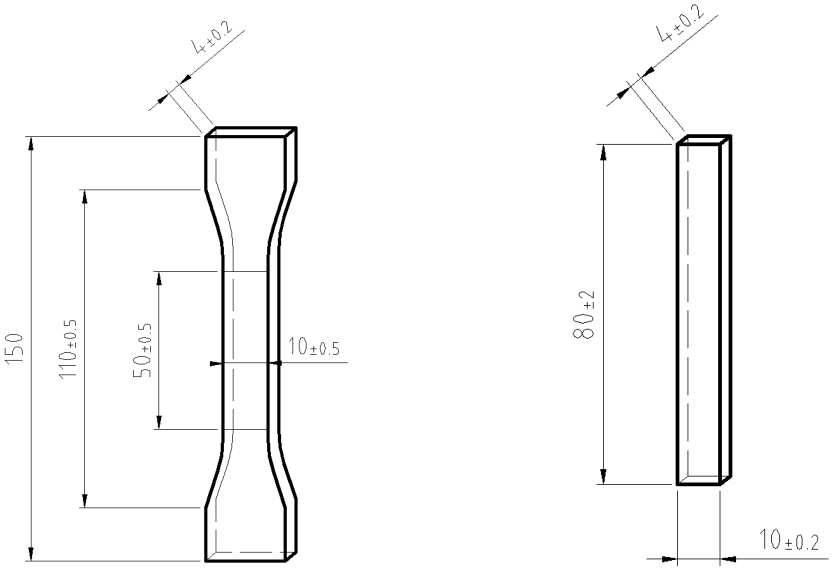
Obr. 47 Zkušební zařízeni Perkin Elmer TMA-7

Tab. 10 Parametry zkušebního stroje Perkin Elmer TMA7

Typ stroje	PERKIN ELMER TMA7	
Rozměry stroje		
Posun sondy	24	mm
Zatěžující síla	-6500 - 8000	mN
Teplotní rozptyl	-170 ÷ +1000	°C
Rychlost ohřevu sondy	0,1 - 100	°C/min

8.6 Výroba zkušebních tělísek

Zkušební tělíska byla vyrobena na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 420C. V jednonásobné formě byly vstřikovány tělíska tvaru lopatek (Typ 1A *Tab. 5*) a tyčinek (velké *Tab. 6*) o rozměrech znázorněných na obrázku *(Obr. 48).* Parametry nastavení vstřikovacího stroje jsou uvedeny v tabulce *Tab. 11*.



Tahová zkouška Vrubová houževnatost

Obr. 48 Zkušební tělíska

Tab. 11 Parametry nastavení vstřikovacího stroje

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

8.6.1 Vlastnosti zkušebního materiálu HDPE a LDPE

Tab. 12 Vlastnosti polyetylenu DOW HDPE 25055 E [18]

Vlastnosti	HDPE	Zkušební metoda (norma)
Fyzikální vlastnosti		
hustota [kg.m]	953	ASTM D792
index toku taveniny [g.min] (190°C.2,16kg)	25	ISO 1133
Mechanické vlastnosti		
pevnost v tahu [MPa]	25	ASTM D638
pevnost v tahu [MPa] (při porušení)	27	ASTM D638
ohybový modul [MPa]	870	ASTM D790
tažnost [%]	200	ASTM D638
rázová-tahová houževnatost [kJ.m]	55	ASTM D1822
tvrdost Shore [Shore D]	65	ISO 868
Tepelné vlastnosti		
teplota měknutí dle Vicata [°C]	124	ISO 306

Tab. 13 Vlastnosti polyetylenu DOW LDPE 780 E [18]

Vlastnosti	LDPE	Zkušební metoda (norma)
Fyzikální vlastnosti		
hustota [kg.m]	914 - 928	ASTM D792
index toku taveniny [g.min] (190°C.2,16kg)	0,1 - 70	ISO 1133
smrštění při vstřikování [%] (ve směru toku)	2	ASTM D955
smrštění při vstřikování [%] (kolmo na tok)	2	ASTM D955
Mechanické vlastnosti		
modul pružnosti v tahu [MPa]	164	ISO 527-1, -2
pevnost v tahu [MPa]	8	ISO 527-1, -2
pevnost v tahu [MPa] (při porušení)	11	ISO 527-1, -2
tahová deformace [%] (při porušení)	50	ISO 527-1, -2
tažnost [%] (orientace ve směru toku)	700	ASTM D882
tažnost [%] (orientace kolmo na směr toku)	750	ASTM D882
rázová-tahová houževnatost [kJ.m]	286	ISO 8256
tvrdost Shore [Shore D]	49	ISO 868
Tepelné vlastnosti		
teplota měknutí dle Vicata [°C]	93	ASTM D1525

8.7 Ozáření zkušebních tělísek

Ionizační beta záření zkušebních tělísek bylo provedeno firmou BGS Beta-Gamma-Servise GmBH & Co, KG v Německu. Tělíska byla ozářena dávkami 15, 30, 45, 66, 99, 132, 165 a 198 kGy. Pro rovnoměrné ozáření byly tělíska vyskládaný do krabic a takto procházeli přes ozařovací zařízení.

Obr. 49 Tělíska pro ozařování

Pro ozáření tělísek dávkami 15, 30 a 45 kGy bylo provedeno ozařování minimální dávkou 15 kGy. Pro dávky 66, 99, 132, 165 a 198 kGy bylo provedeno ozařování minimální dávkou 33 kGy. Aby bylo dosaženo žádaných dávek ozáření, procházely tělíska ozařovacím zařízením tolikrát, až dosáhly požadované hodnoty ozáření. Skutečné hodnoty ozáření pak ukazuje *Tab. 14* a *15*. Pro stanovení skutečné hodnoty ozáření byly pro jednotlivé průchody do krabic vloženy dva dosimetry. Z nich se odečetla skutečná dávka ozáření.

Tab. 14 Skutečné hodnoty ozáření pro minimální dávku ozáření 15 kGy

Požadovaná dávka [kGy]	Počet průchodů zařízením [-]	Dávka ozáření změřena dosimetrem [kGy]	Průměrná dávka [kGy]	Celková dávka [kGy]
15	1	15,53	15,04	15,04
		14,55		
30	2	14,97	14,87	30,01
		14,97		
45	3	16,09	15,95	45,96
		15,81		

Tab. 15 Skutečné hodnoty ozáření pro minimální dávku ozáření 33 kGy

Požadovaná dávka [kGy]	Počet průchodů zařízením [-]	Dávka ozáření změřena dosimetrem [kGy]	Průměrná dávka [kGy]	Celková dávka [kGy]
	1	37,08	37	37
		36,92		
66	2	35,93	36,18	73,18
		36,42		
99	3	38,75	38,16	111,33
		37,56		
132	4	34,95	34,79	146,12
		34,62		
165	5	37,41	37,66	183,78
		37,91		
198	6	36,26	35,67	219,43
		35,11		

8.8 Vyhodnocení výsledků měření

Vyhodnocení naměřených výsledků jednotlivých měření bylo provedeno dle následujících statistických vztahů:

Aritmetický průměr (výběrový) „ $\bar{x}$ “:

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

Z jednotlivých výdsledků (i=1,2,….n)

Rozptyl „s^2“

Používá se pro zjišťování řady hodnot náhodného výběru, kde se suma čtverců odchylek jednotlivých hodnot od aritmetického průměru dělí tzv. počtem stupňů volnosti *f = n-1*.

$$s^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2$$

Směrodatná odchylka „s“

Absolutní hodnota druhé mocniny

$$s = \left|\sqrt{s^2}\right|$$

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru „$\overline{\sigma}$ “

Využití pro hodnocení přesnosti měření se vychází ze střední kvadratické chyby „σ“ podělenou mocninou s „*n*“ měření.

$$\overline{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \overline{x}\right)^2}{n(n-1)}}$$

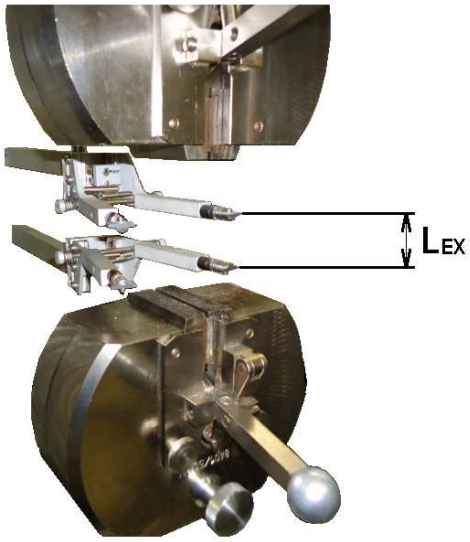
9 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

9.1 Zkouška tahem

Před každým měřením je nutno změřit rozměry vzorku ve tvaru lopatek digitálním posuvným měřidlem (přesnost 0,01 mm). Měří se tloušťka *h* a šířka *b* minimálně na třech místech, z nichž se vypočítají průměrné hodnoty. Tyto hodnoty se pro každé měření zadají do programu. Upneme zkušební tělísko do čelistí a spustíme tahovou zkoušku. Počítačový program trhacího stroje vytvoří graf závislosti zatěžujícího napětí σ [MPa] na poměrném prodloužení ε [%] a naměřená data přenese do tabulky naměřených hodnot.

Zkouška je prováděna dle normy ČSN EN ISO 527-2, rozměry zkušebního tělíska typu 1A jsou uvedeny v *Tab. 5*. Pro každý materiál, teplotu a dávku ozáření bylo provedeno 10 měření, z nichž byla stanovena průměrná hodnota $\bar{x}$, směrodatná odchylka *s* a střední kvadratická chyba $\bar{\sigma}$. Měření bylo prováděno při pokojové teplotě 23°C a při zvýšené teplotě 100°C.

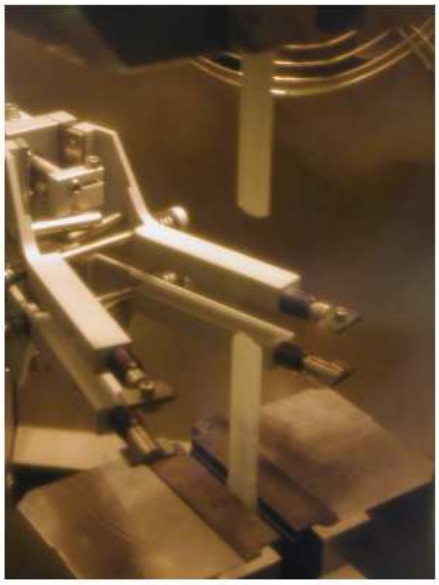
Nastavení výchozí pozice extenzometru pro měření poměrného prodloužení bylo 20 mm. (*Obr. 50*)



Obr. 50 Nastavení extenzometru

Pro vyhodnocení tahové zkoušky budou použity hodnoty meze pevnosti σ_M [MPa], modul pružnosti v tahu E [MPa], poměrného prodloužení v místě největšího napětí ε_M [%] a ε_{FM} [mm].

Pro měření tahové zkoušky za zvýšené teploty byla použita temperanční komora umožňující provádět zkoušky vně komory (*Obr. 51*). Každé zkušební tělísko měřené při teplotě 100°C bylo vystaveno působení této teploty po dobu 5 minut před měřením, aby bylo docíleno rovnoměrné teploty ve zkušebním tělísku.



Obr. 51 Měření zkoušky tahu vně temperanční komory

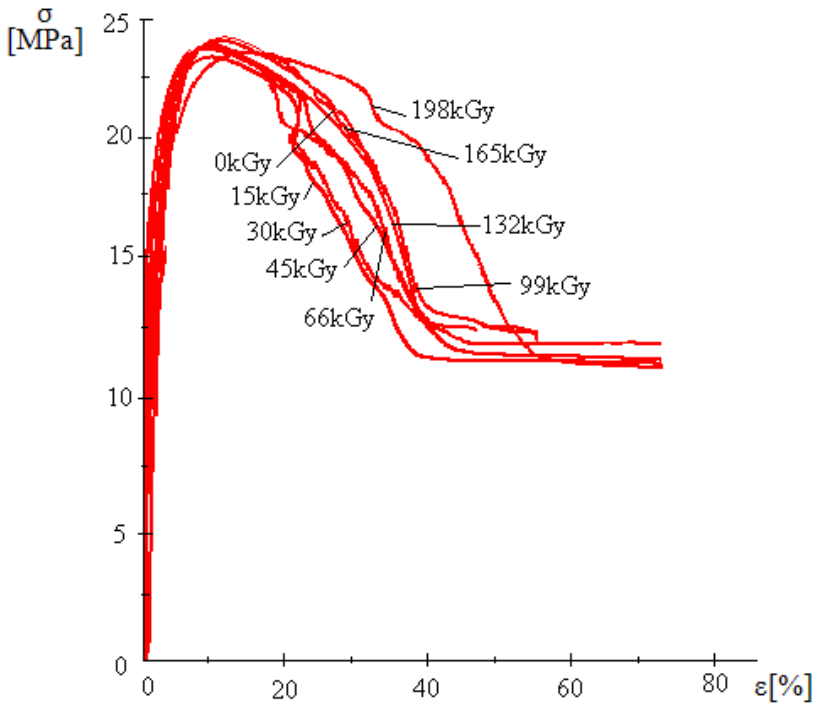
9.1.1 Tahová zkouška HDPE při pokojové teplotě 23°C

Zvolená rychlost posuvu čelistí 50 mm / min.

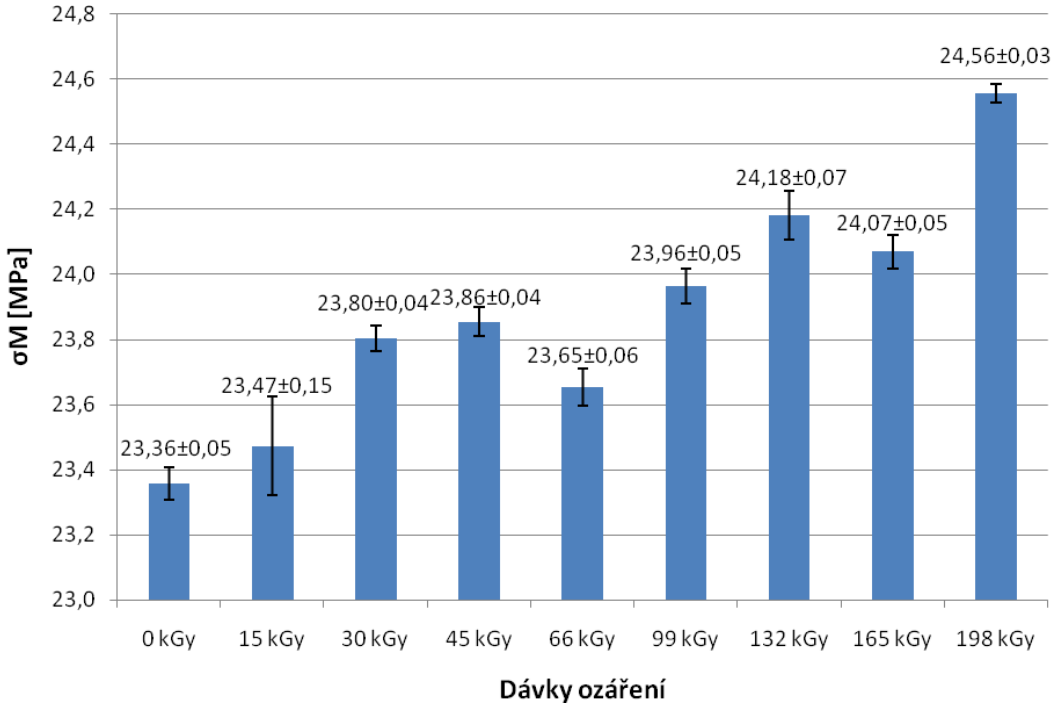
Výsledky naměřených hodnot tahové zkoušky pro teplotu okolí 23°C v příloze *P1*.

Tab. 16 Naměřené hodnoty tahové zkoušky HDPE při teplotě 23°C

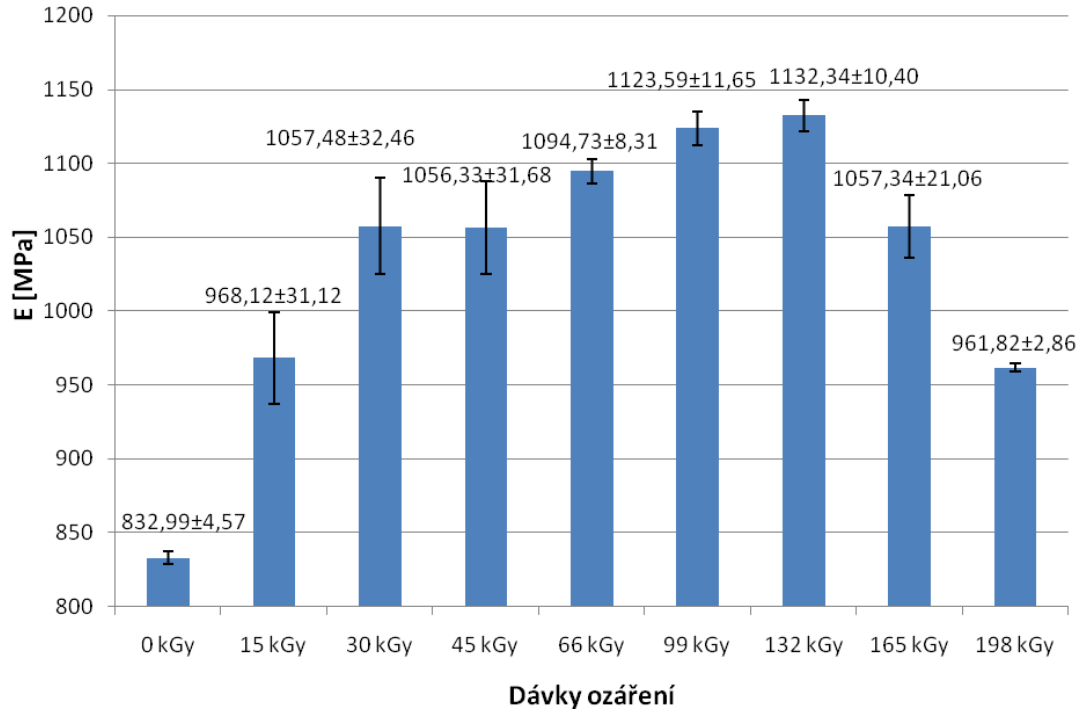
		0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
σ_M	$\bar{x}$	**23,36**	**23,47**	**23,80**	**23,86**	**23,65**	**23,96**	**24,18**	**24,07**	**24,56**
	s	0,14	0,43	0,11	0,12	0,16	0,15	0,21	0,14	0,08
[MPa]	$\bar{\sigma}$	0,05	0,15	0,04	0,04	0,06	0,05	0,07	0,05	0,03
E	$\bar{x}$	**832,99**	**968,12**	**1057,48**	**1056,33**	**1094,73**	**1123,59**	**1132,34**	**1057,34**	**961,82**
	s	12,93	88,03	91,81	89,61	23,51	32,94	29,42	59,57	8,08
[MPa]	$\bar{\sigma}$	4,57	31,12	32,46	31,68	8,31	11,65	10,40	21,06	2,86
$\varepsilon_{\sigma m}$	$\bar{x}$	**10,56**	**9,74**	**9,93**	**9,92**	**9,67**	**9,62**	**9,67**	**9,75**	**10,18**
	s	0,15	0,39	0,14	0,27	0,20	0,20	0,14	0,38	0,11
[%]	$\bar{\sigma}$	0,05	0,14	0,05	0,09	0,07	0,07	0,05	0,13	0,04
$\varepsilon_{F\,max}$	$\bar{x}$	**2,11**	**1,95**	**1,98**	**1,98**	**1,93**	**1,92**	**1,93**	**1,95**	**2,03**
	s	0,03	0,08	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03	0,08	0,02
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01



Obr. 52 Srovnání grafů závislosti zatížení na poměrném prodloužení pro jednotlivé dávky ozáření HDPE při teplotě 23°C



Obr. 53 Srovnání meze pevnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C



Obr. 54 Srovnání modulu pružnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

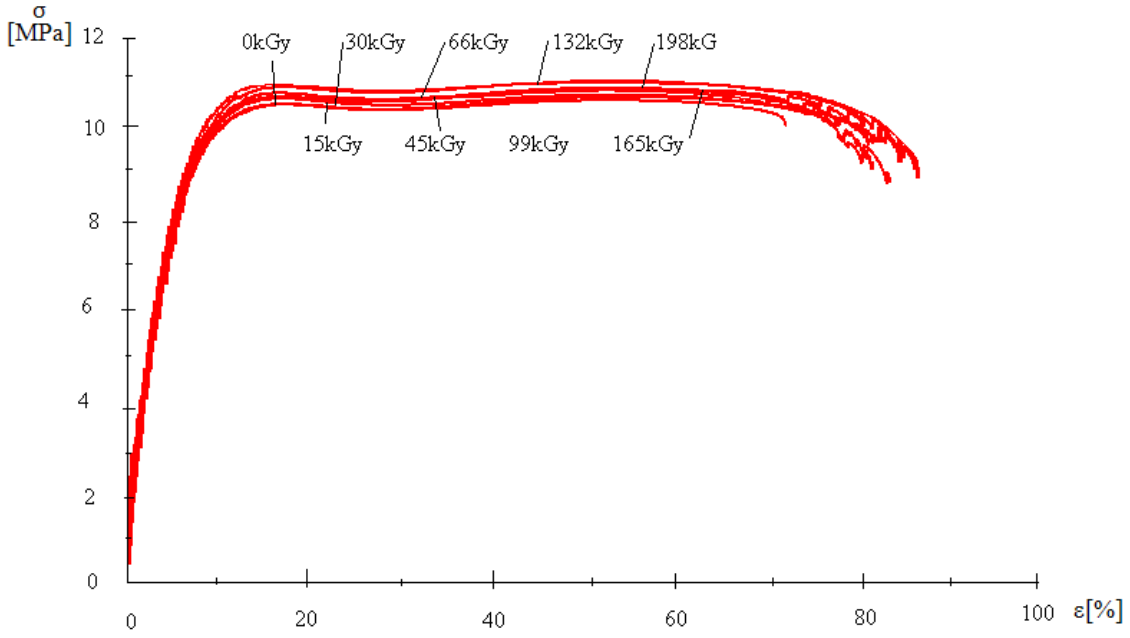
9.1.2 Tahová zkouška LDPE při pokojové teplotě 23°C

Zvolená rychlost posuvu čelistí 50 mm / min.

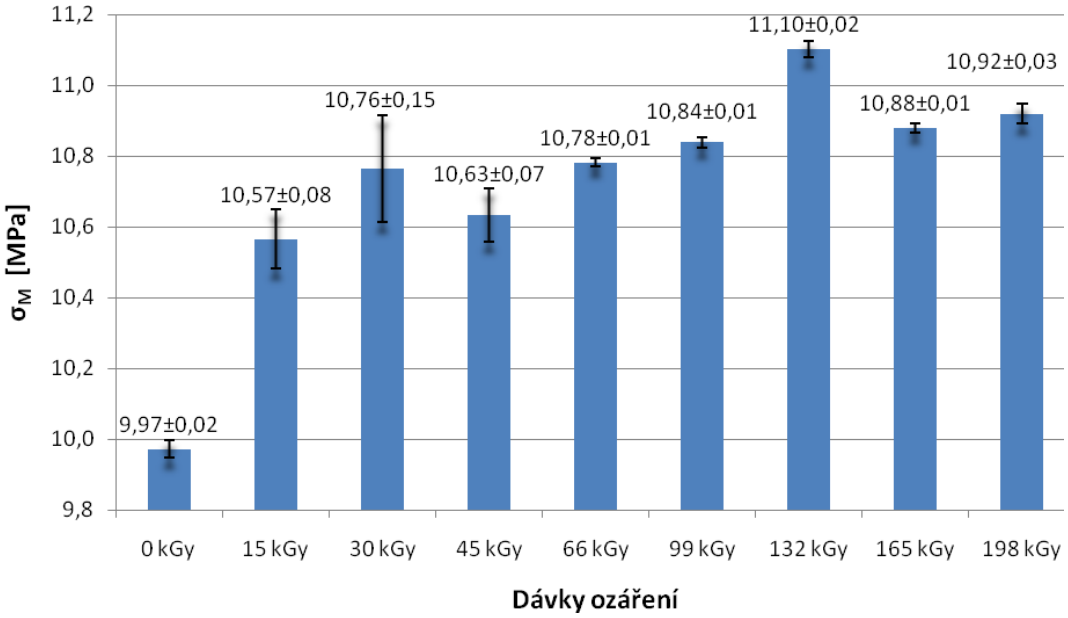
Výsledky naměřených hodnot tahové zkoušky pro teplotu okolí 23°C v příloze *P2*.

Tab. 17 Naměřené hodnoty tahové zkoušky LDPE při teplotě 23°C

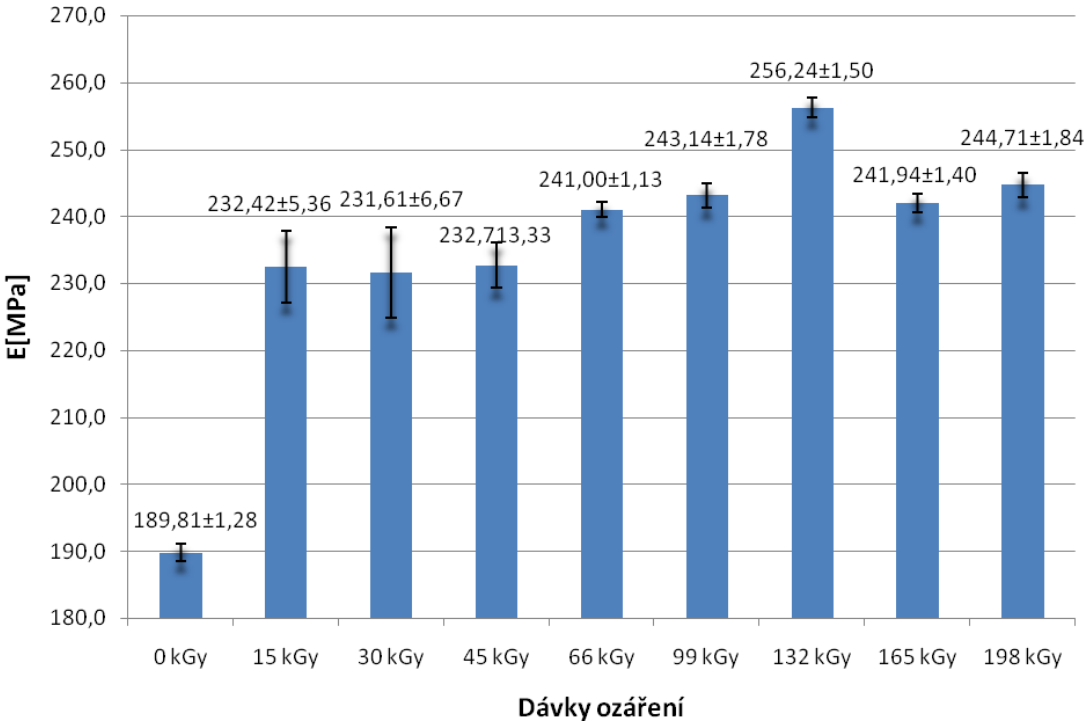
		0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
σ_M	$\bar{x}$	**9,97**	**10,57**	**10,76**	**10,63**	**10,78**	**10,84**	**11,10**	**10,88**	**10,92**
	s	0,07	0,24	0,43	0,21	0,03	0,04	0,06	0,04	0,08
[MPa]	$\bar{\sigma}$	0,02	0,08	0,15	0,07	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
E	$\bar{x}$	**189,81**	**232,42**	**231,61**	**232,71**	**241,00**	**243,14**	**256,24**	**241,94**	**244,71**
	s	3,62	15,16	18,88	9,43	3,18	5,04	4,24	3,95	5,21
[MPa]	$\bar{\sigma}$	1,28	5,36	6,67	3,33	1,13	1,78	1,50	1,40	1,84
$\varepsilon_{\sigma m}$	$\bar{x}$	**61,47**	**53,39**	**55,04**	**52,80**	**52,61**	**52,56**	**52,38**	**52,64**	**54,55**
	s	1,61	2,18	3,94	0,75	0,36	0,30	0,47	0,60	1,45
[%]	$\bar{\sigma}$	0,57	0,77	1,39	0,27	0,13	0,10	0,17	0,21	0,51
$\varepsilon_{F\,max}$	$\bar{x}$	**12,29**	**10,67**	**11,01**	**10,56**	**10,52**	**10,51**	**10,47**	**10,52**	**10,90**
	s	0,33	0,44	0,79	0,15	0,07	0,06	0,09	0,12	0,29
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,11	0,16	0,28	0,05	0,02	0,02	0,03	0,04	0,10



Obr. 55 Srovnání grafů závislosti zatížení na poměrném prodloužení pro jednotlivé dávky ozáření LDPE při teplotě 23°C



Obr. 56 Srovnání meze pevnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C



Obr. 57 Srovnání modulu pružnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

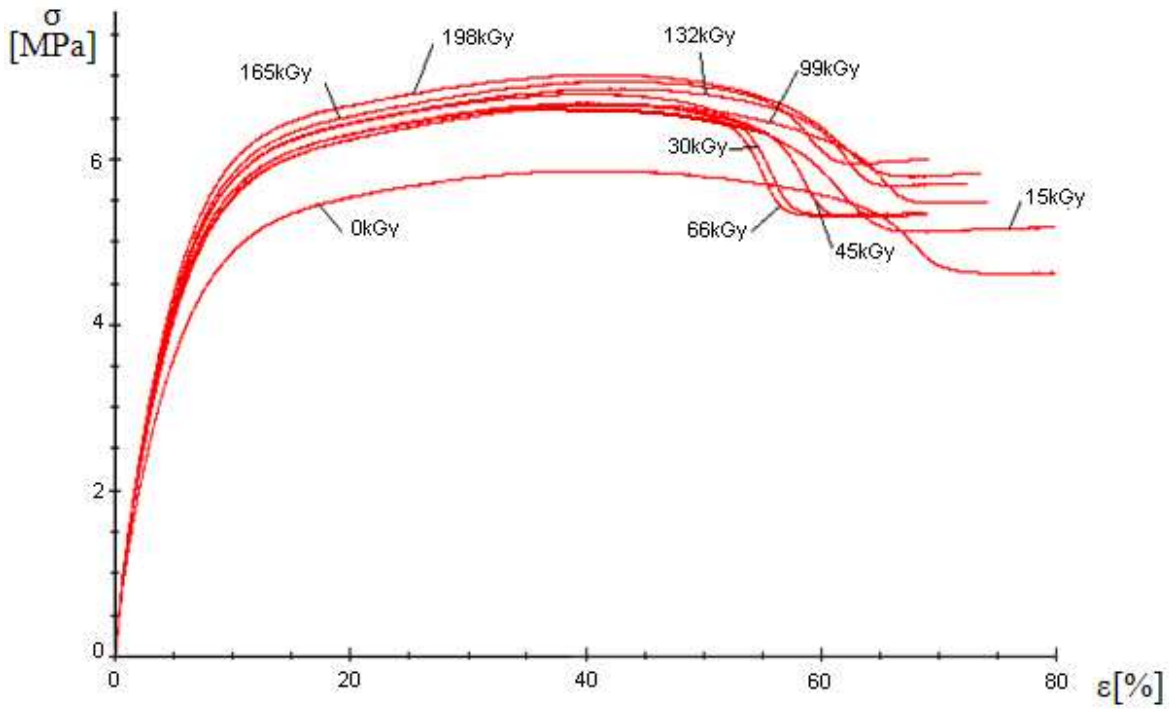
9.1.3 Tahová zkouška HDPE při teplotě 100°C

Zvolená rychlost posuvu čelistí 50 mm / min

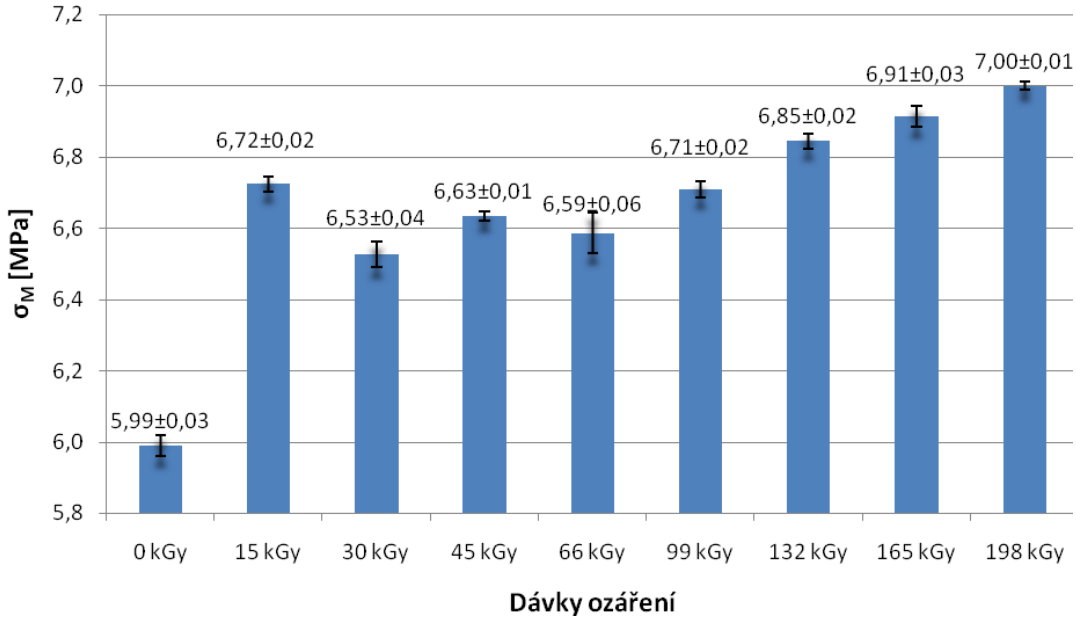
Výsledky naměřených hodnot tahové zkoušky pro teplotu okolí 100°C v příloze *P3*.

Tab. 18 Naměřené hodnoty tahové zkoušky HDPE při zvýšené teplotě 100°C

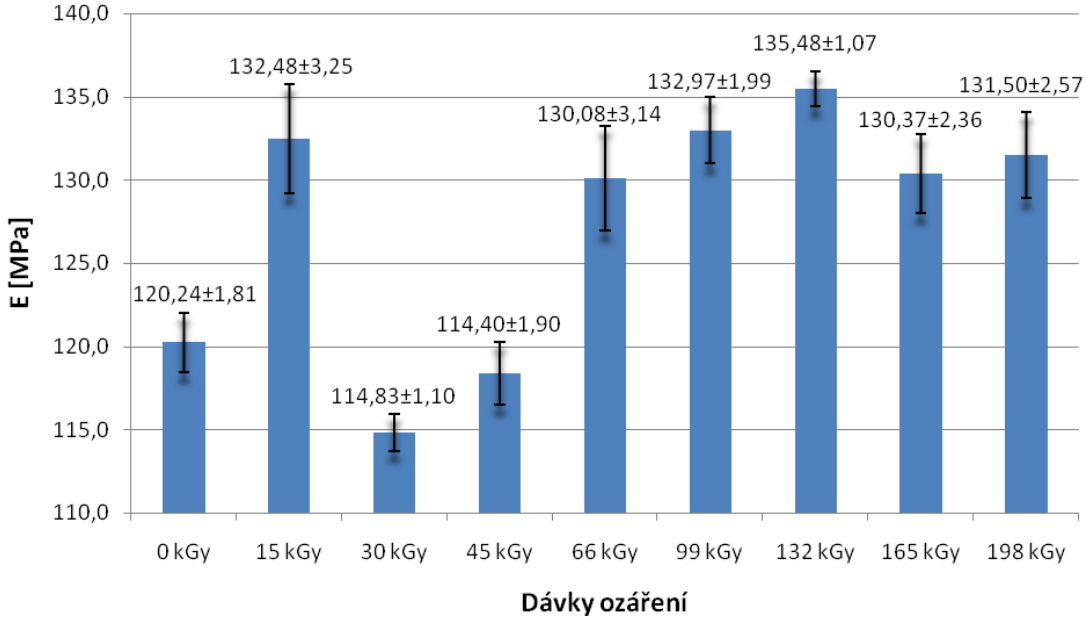
		0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
σ_M	$\bar{x}$	**5,99**	**6,72**	**6,53**	**6,63**	**6,59**	**6,71**	**6,85**	**6,91**	**7,00**
	s	0,08	0,06	0,10	0,04	0,16	0,06	0,06	0,08	0,03
[MPa]	$\bar{\sigma}$	0,03	0,02	0,04	0,01	0,06	0,02	0,02	0,03	0,01
E	$\bar{x}$	**120,24**	**132,48**	**114,83**	**118,40**	**130,08**	**132,97**	**135,48**	**130,37**	**131,50**
	s	5,12	9,18	3,11	5,37	8,87	5,62	3,01	6,68	7,27
[MPa]	$\bar{\sigma}$	1,81	3,25	1,10	1,90	3,14	1,99	1,07	2,36	2,57
$\varepsilon_{\sigma m}$	$\bar{x}$	**40,43**	**38,59**	**41,63**	**42,66**	**42,40**	**42,83**	**41,63**	**42,22**	**43,13**
	s	0,75	0,75	0,77	0,48	0,41	0,31	0,55	0,28	0,44
[%]	$\bar{\sigma}$	0,26	0,27	0,27	0,17	0,15	0,11	0,19	0,10	0,16
$\varepsilon_{F\max}$	$\bar{x}$	**8,09**	**7,70**	**8,33**	**8,53**	**8,48**	**8,57**	**8,33**	**8,45**	**8,63**
	s	0,15	0,15	0,15	0,09	0,08	0,06	0,11	0,05	0,09
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03



Obr. 58 Srovnání grafů závislosti zatížení na poměrném prodloužení pro jednotlivé dávky ozáření HDPE při zvýšené teplotě 100°C



Obr. 59 Srovnání meze pevnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C



Obr. 60 Srovnání modulu pružnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C

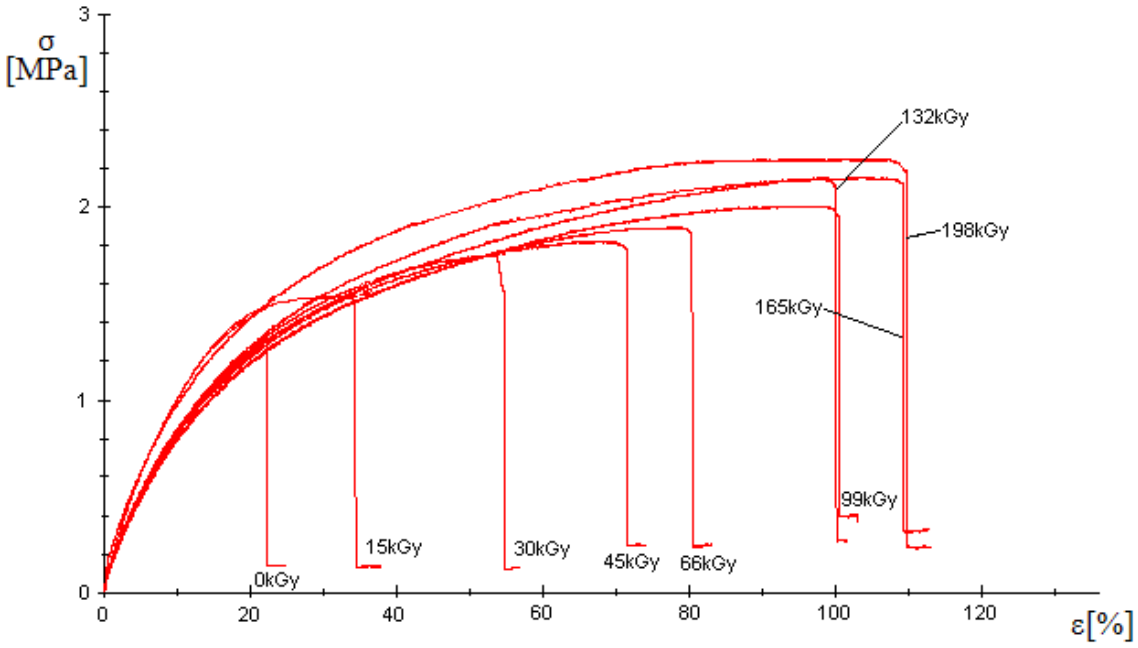
9.1.4 Tahová zkouška LDPE při teplotě 100°C

Zvolená rychlost posuvu čelistí 50 mm / min

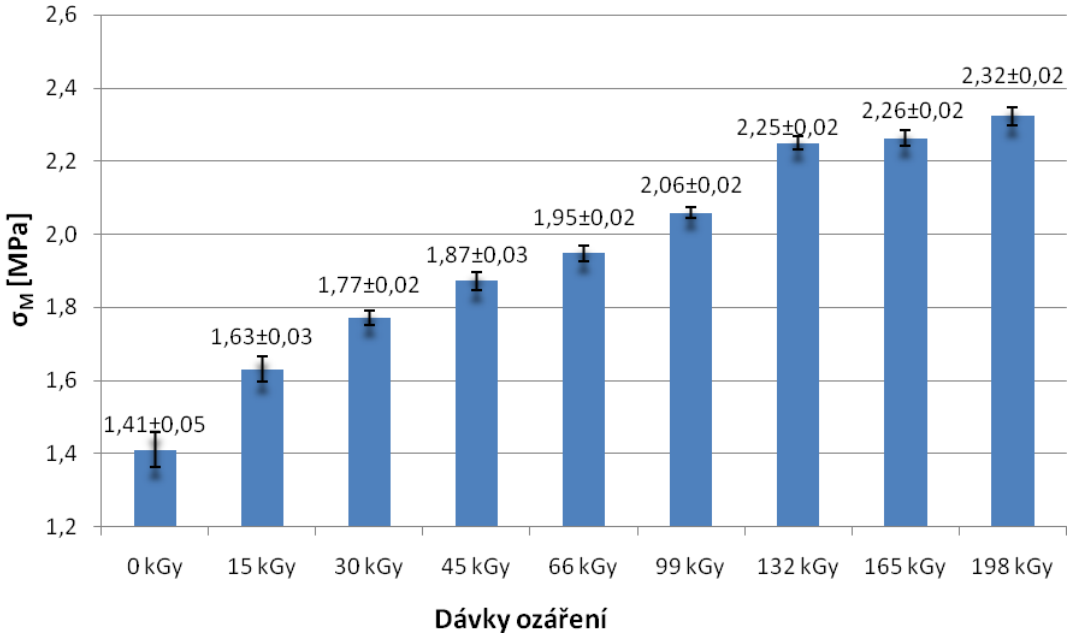
Výsledky naměřených hodnot tahové zkoušky pro teplotu okolí 100°C v příloze *P4.*

Tab. 19 Naměřené hodnoty tahové zkoušky LDPE při zvýšené teplotě 100°C

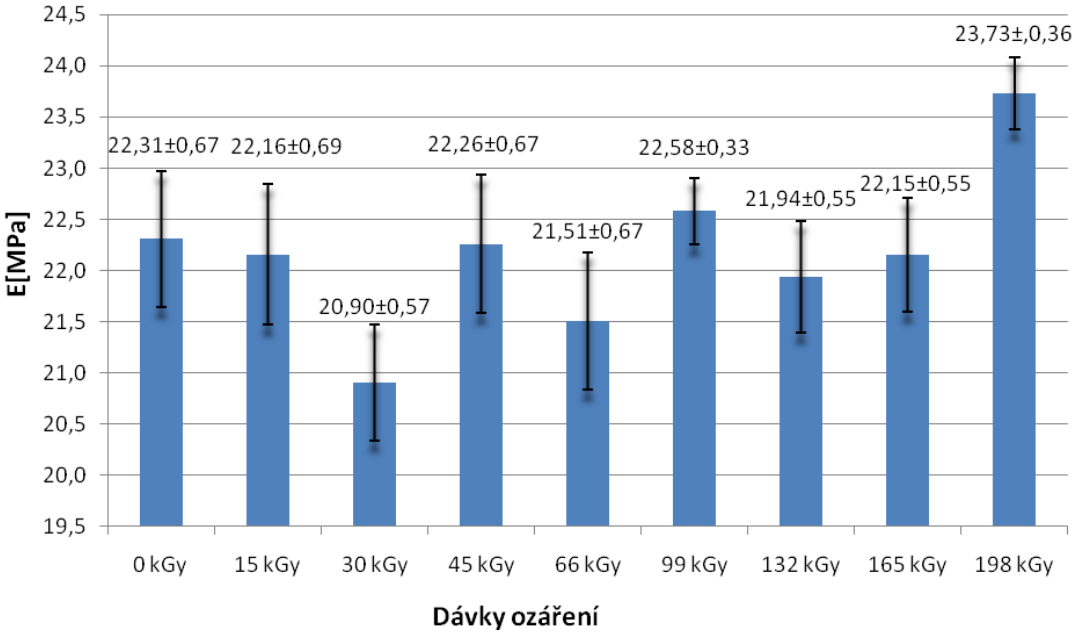
		0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
σ_M	$\bar{x}$	**1,41**	**1,63**	**1,77**	**1,87**	**1,95**	**2,06**	**2,25**	**2,26**	**2,32**
	s	0,13	0,09	0,06	0,07	0,06	0,04	0,05	0,06	0,07
[MPa]	$\bar{\sigma}$	0,05	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
E	$\bar{x}$	**22,31**	**22,16**	**20,90**	**22,26**	**21,51**	**22,58**	**21,94**	**22,15**	**23,73**
	s	1,88	1,95	1,61	1,90	1,90	0,92	1,55	1,57	1,01
[MPa]	$\bar{\sigma}$	0,67	0,69	0,57	0,67	0,67	0,33	0,55	0,55	0,36
$\varepsilon_{\sigma m}$	$\bar{x}$	**23,86**	**35,70**	**55,64**	**72,17**	**81,15**	**99,13**	**97,20**	**115,48**	**116,88**
	s	2,55	1,61	2,90	2,52	2,74	6,76	8,83	8,62	11,33
[%]	$\bar{\sigma}$	0,90	0,57	1,02	0,89	0,97	2,39	3,12	3,05	4,00
$\varepsilon_{F\max}$	$\bar{x}$	**4,80**	**7,16**	**11,15**	**14,46**	**16,26**	**19,85**	**19,46**	**23,11**	**23,08**
	s	0,51	0,32	0,58	0,51	0,54	1,35	1,77	1,72	2,31
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,18	0,11	0,20	0,18	0,19	0,48	0,62	0,61	0,82



Obr. 61 Srovnání grafů závislosti zatížení na poměrném prodloužení pro jednotlivé dávky ozáření LDPE při zvýšené teplotě 100°C



Obr. 62 Srovnání meze pevnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C

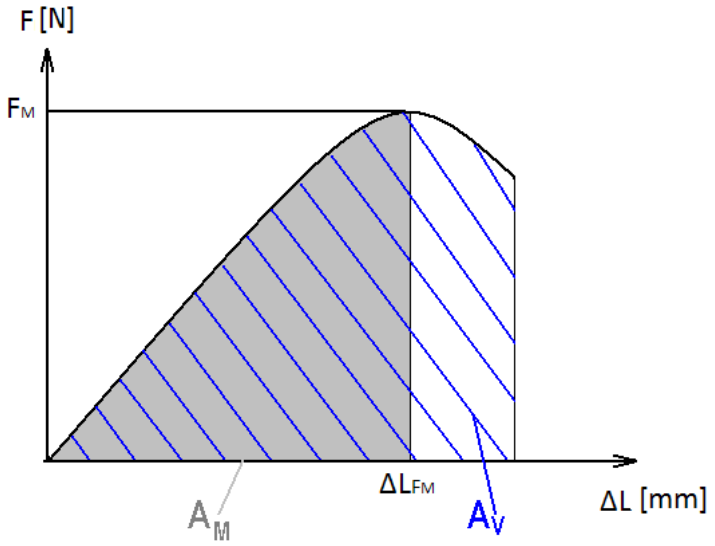


Obr. 63 Srovnání modulů pružnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C

9.2 Měření vrubové houževnatosti

Zkouška vrubové houževnatosti byla provedena na stroji CEAST Resil Impactor Junior (viz *Obr. 44)*. Pro zkoušku bylo použito zkušební tělísko v podobě tyčinky - velké o rozměrech uvedených v *Tab. 6,* dle ČSN EN ISO 179-2. Na zkušebních tělískách byl vyroben vrub o hloubce 2 mm na přístroji CEAST Notchvis a to na užší straně. Tělísko bylo následně položeno na podpěry a vrub vystředěn do osy úderu kladiva a to tak, že vrub se nacházel na opačné straně, než byl veden úder kladiva. Zkušebním tělesem bylo kladivo o energii 5J. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze P5, P6, P7, P8. Zkoušky byly provedeny při teplotě 23°C a za snížené teplotě -20°C. Pro jednotlivé materiály a dávky ozáření bylo provedeno 10 měření, z nichž byla stanovena průměrná hodnota $\bar{x}$, směrodatná odchylka *s* a střední kvadratická chyba $\bar{\sigma}$. Pro dosáhnutí teploty tělíska -20°C byla použita temperanční komora napojená na kapalný dusík. Zkušební tělíska byla vystavena teplotě -20°C po dobu 20 minut před měřením, aby bylo dosaženo rovnoměrné teploty tělíska.

Pro vyhodnocení vrubové houževnatosti budou použity hodnoty maximální síly F_M [N], deformace S_M [mm] při maximální síle rázu, práce A_M [kJ/m^2] při maximální síle a vrubová práce A_V [kJ/m^2].



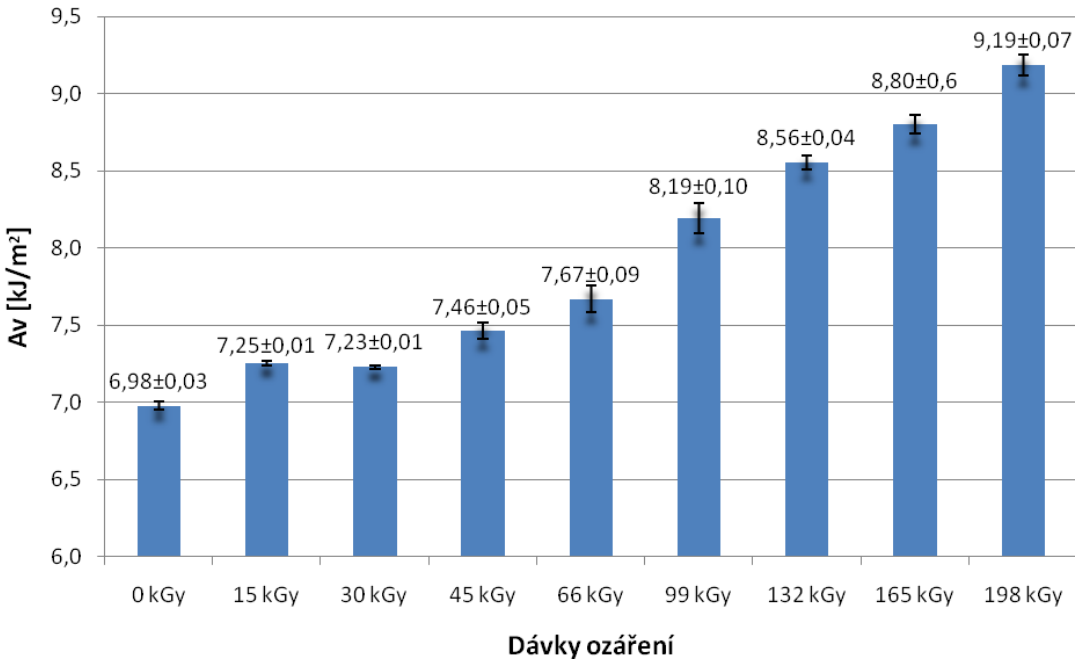
Obr. 64 Znázornění použitých hodnot zkoušky vrubové houževnatosti

9.2.1 Vrubová houževnatost HDPE při teplotě 23°C

Výsledky naměřených hodnot vrubové houževnatosti pro teplotu okolí 23°C v příloze *P5*.

Tab. 20 Naměřené hodnoty rázové zkoušky HDPE při 23°C

		0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
Fm	$\bar{x}$	**324,07**	**327,66**	**342,98**	**343,54**	**333,73**	**345,74**	**349,97**	**356,40**	**359,95**
	s	3,94	3,32	2,10	5,32	3,10	6,70	5,97	6,16	6,09
[N]	$\bar{\sigma}$	1,39	1,18	0,74	1,88	1,10	2,37	2,11	2,18	2,15
Sm	$\bar{x}$	**1,29**	**1,31**	**1,28**	**1,36**	**1,33**	**1,40**	**1,38**	**1,44**	**1,45**
	s	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,07	0,07	0,07
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02
Sv	$\bar{x}$	**1,31**	**1,34**	**1,37**	**1,43**	**1,40**	**1,45**	**1,47**	**1,50**	**1,51**
	s	0,03	0,02	0,03	0,03	0,06	0,05	0,03	0,04	0,03
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Am	$\bar{x}$	**6,94**	**6,99**	**7,06**	**7,18**	**7,18**	**7,81**	**7,66**	**8,31**	**8,70**
	s	0,07	0,06	0,03	0,08	0,07	0,47	0,49	0,46	0,56
[kJ/m^2]	$\bar{\sigma}$	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,17	0,17	0,16	0,20
Av	$\bar{x}$	**6,98**	**7,25**	**7,23**	**7,46**	**7,67**	**8,19**	**8,56**	**8,80**	**9,19**
	s	0,08	0,04	0,03	0,15	0,24	0,28	0,12	0,17	0,19
[kJ/m^2]	$\bar{\sigma}$	0,03	0,01	0,01	0,05	0,09	0,10	0,04	0,06	0,07



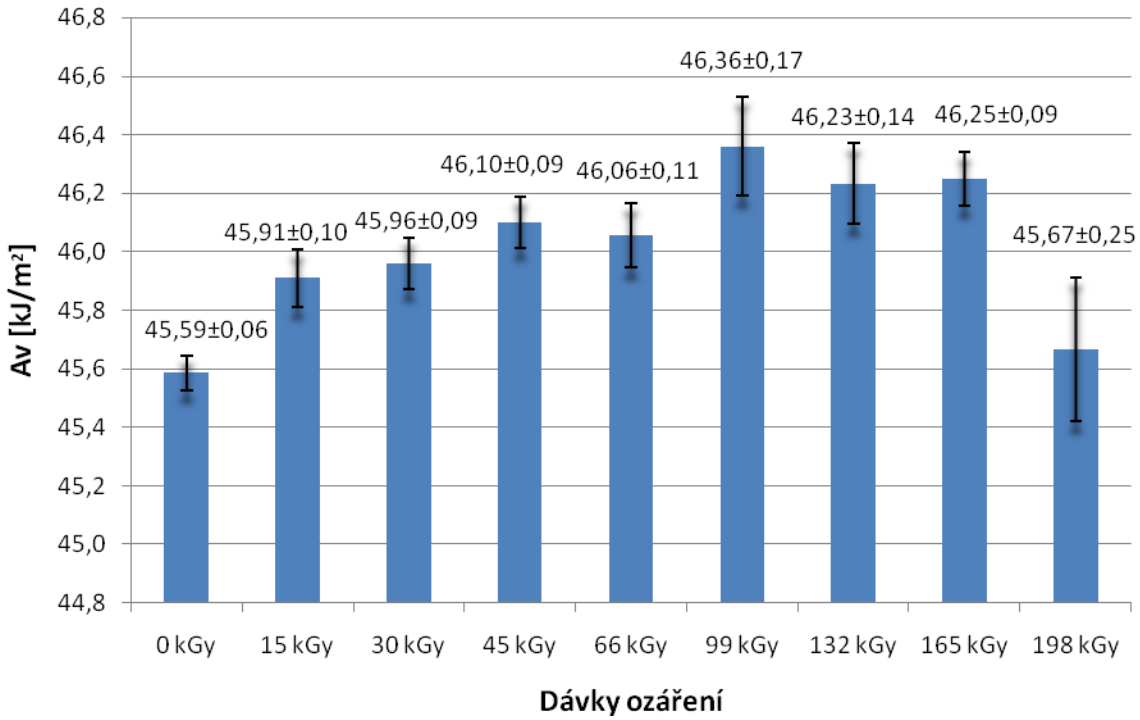
Obr. 65 Srovnání vrubové houževnatosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

9.2.2 Vrubová houževnatost LDPE při teplotě 23°C

Výsledky naměřených hodnot vrubové houževnatosti pro teplotu okolí 23°C v příloze *P6*.

Tab. 21 Naměřené hodnoty rázové zkoušky LDPE při 23°C

		0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
Fm	$\bar{x}$	**236,26**	**241,63**	**244,35**	**244,40**	**240,36**	**240,36**	**241,72**	**241,21**	**243,41**
	s	2,94	1,36	1,00	1,44	1,50	2,53	2,34	1,62	2,39
[N]	$\bar{\sigma}$	1,04	0,48	0,35	0,51	0,53	0,89	0,83	0,57	0,84
Sm	$\bar{x}$	**7,14**	**7,24**	**7,26**	**7,52**	**7,27**	**6,99**	**6,89**	**6,63**	**6,99**
	s	0,04	0,09	0,12	0,11	0,09	0,19	0,18	0,10	0,22
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,07	0,06	0,03	0,08
Sv	$\bar{x}$	**7,40**	**7,60**	**7,70**	**7,75**	**7,75**	**7,72**	**7,76**	**7,72**	**7,81**
	s	0,07	0,02	0,06	0,09	0,03	0,04	0,04	0,03	0,08
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Am	$\bar{x}$	**42,01**	**44,38**	**42,63**	**43,78**	**42,59**	**41,04**	**39,91**	**38,41**	**39,74**
	s	0,17	0,25	0,46	0,42	0,51	1,08	0,72	0,93	1,56
[kJ/m2]	$\bar{\sigma}$	0,06	0,09	0,16	0,15	0,18	0,38	0,25	0,33	0,55
Av	$\bar{x}$	**45,59**	**45,91**	**45,96**	**46,10**	**46,06**	**46,36**	**46,23**	**46,25**	**45,67**
	s	0,17	0,28	0,25	0,24	0,31	0,47	0,39	0,26	0,69
[kJ/m2]	$\bar{\sigma}$	0,06	0,10	0,09	0,09	0,11	0,17	0,14	0,09	0,25



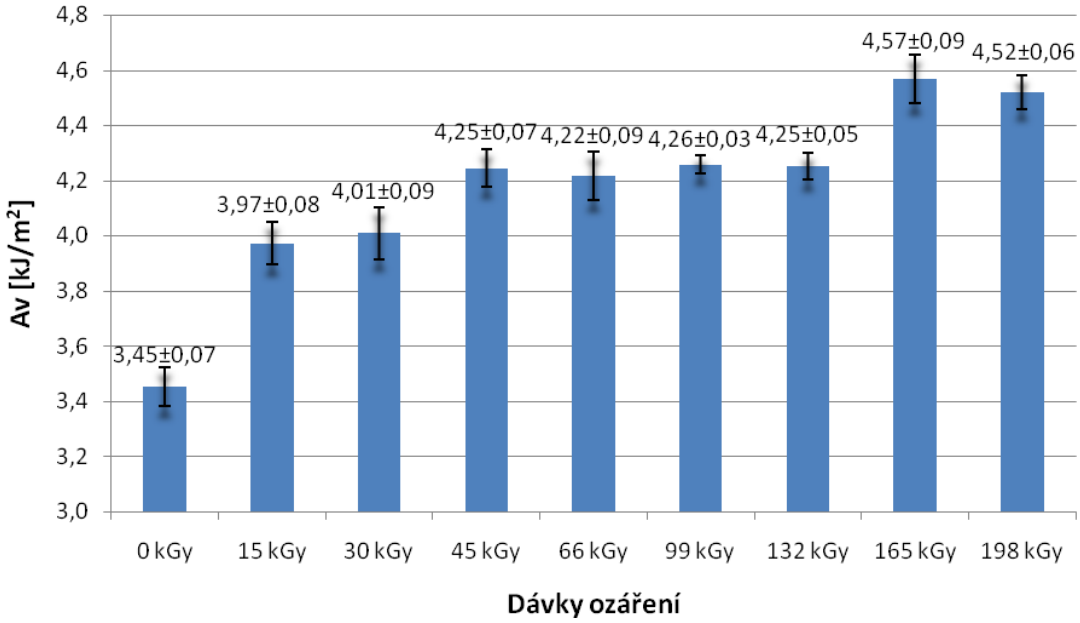
Obr. 66 Srovnání vrubové houževnatosti LDPE v závislost na dávce ozáření při 23°C

9.2.3 Vrubová houževnatost HDPE při teplotě -20°C

Výsledky naměřených hodnot vrubové houževnatosti pro teplotu okolí -20°C v příloze *P7*.

Tab. 22 Naměřené hodnoty rázové zkoušky HDPE při -20°C

		0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
Fm	$\bar{x}$	**148,93**	**164,01**	**148,69**	**150,14**	**154,22**	**156,12**	**153,89**	**169,93**	**157,24**
	s	10,79	32,21	13,15	9,45	9,84	10,81	11,13	19,37	4,75
[N]	$\bar{\sigma}$	3,81	11,39	4,65	3,34	3,48	3,82	3,93	6,85	1,68
Sm	$\bar{x}$	**1,59**	**1,81**	**1,68**	**1,78**	**1,90**	**1,85**	**1,78**	**1,82**	**1,80**
	s	0,25	0,18	0,09	0,13	0,23	0,11	0,17	0,19	0,14
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,09	0,06	0,03	0,05	0,08	0,04	0,06	0,07	0,05
Sv	$\bar{x}$	**1,79**	**2,01**	**1,84**	**1,94**	**2,03**	**1,94**	**1,88**	**2,16**	**1,89**
	s	0,21	0,23	0,14	0,10	0,18	0,15	0,13	0,26	0,11
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,07	0,08	0,05	0,04	0,06	0,05	0,05	0,09	0,04
Am	$\bar{x}$	**2,83**	**3,19**	**3,41**	**3,74**	**3,79**	**3,91**	**3,69**	**3,24**	**4,19**
	s	0,49	0,21	0,06	0,44	0,38	0,20	0,40	0,51	0,30
[kJ/m^2]	$\bar{\sigma}$	0,17	0,08	0,02	0,15	0,13	0,07	0,14	0,18	0,10
Av	$\bar{x}$	**3,45**	**3,97**	**4,01**	**4,25**	**4,22**	**4,26**	**4,25**	**4,57**	**4,52**
	s	0,20	0,22	0,27	0,19	0,25	0,09	0,14	0,25	0,17
[kJ/m^2]	$\bar{\sigma}$	0,07	0,08	0,09	0,07	0,09	0,03	0,05	0,09	0,06



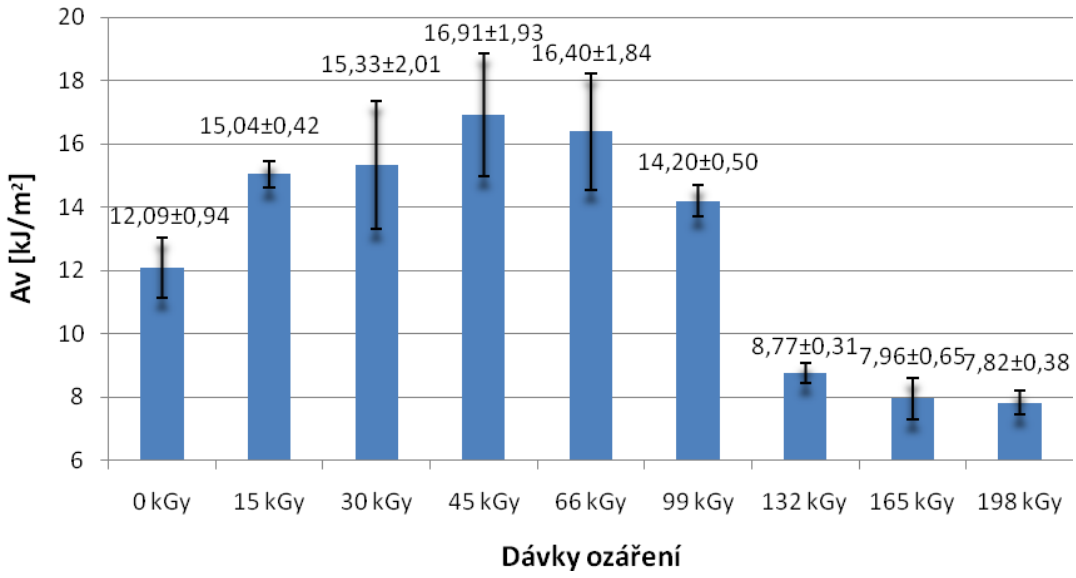
Obr. 67 Srovnání vrubové houževnatosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při -20°C

9.2.4 Vrubová houževnatost LDPE při teplotě -20°C

Výsledky naměřených hodnot vrubové houževnatosti pro teplotu okolí -20°C v příloze *P8.*

Tab. 23 Naměřené hodnoty rázové zkoušky LDPE při -20°C

		0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
Fm	$\bar{x}$	**140,86**	**148,30**	**148,69**	**152,62**	**152,22**	**159,78**	**159,78**	**162,14**	**169,79**
	s	6,73	3,02	5,41	4,39	3,16	3,65	4,14	4,52	5,84
[N]	$\bar{\sigma}$	2,38	1,07	1,91	1,55	1,12	1,29	1,46	1,60	2,06
Sm	$\bar{x}$	**4,61**	**5,28**	**5,11**	**5,21**	**5,06**	**4,79**	**3,23**	**2,96**	**2,78**
	s	0,72	0,28	0,83	0,67	0,43	0,35	0,28	0,51	0,27
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,25	0,10	0,30	0,24	0,15	0,12	0,10	0,18	0,10
Sv	$\bar{x}$	**4,64**	**5,31**	**5,43**	**5,52**	**5,48**	**4,82**	**3,27**	**3,01**	**2,85**
	s	0,72	0,28	1,45	1,32	1,32	0,35	0,28	0,50	0,25
[mm]	$\bar{\sigma}$	0,25	0,10	0,51	0,47	0,47	0,12	0,10	0,18	0,09
Am	$\bar{x}$	**12,01**	**14,96**	**13,94**	**15,60**	**14,63**	**14,11**	**8,65**	**7,74**	**7,57**
	s	2,67	1,18	2,81	2,62	1,20	1,42	0,91	1,96	1,19
[kJ/m^2]	$\bar{\sigma}$	0,94	0,42	0,99	0,92	0,43	0,50	0,32	0,69	0,42
Av	$\bar{x}$	**12,09**	**15,04**	**15,33**	**16,91**	**16,40**	**14,20**	**8,77**	**7,96**	**7,82**
	s	2,67	1,18	5,68	5,46	5,21	1,43	0,88	1,85	1,09
[kJ/m^2]	$\bar{\sigma}$	0,94	0,42	2,01	1,93	1,84	0,50	0,31	0,65	0,38



Obr. 68 Srovnání vrubové houževnatosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při -20°C

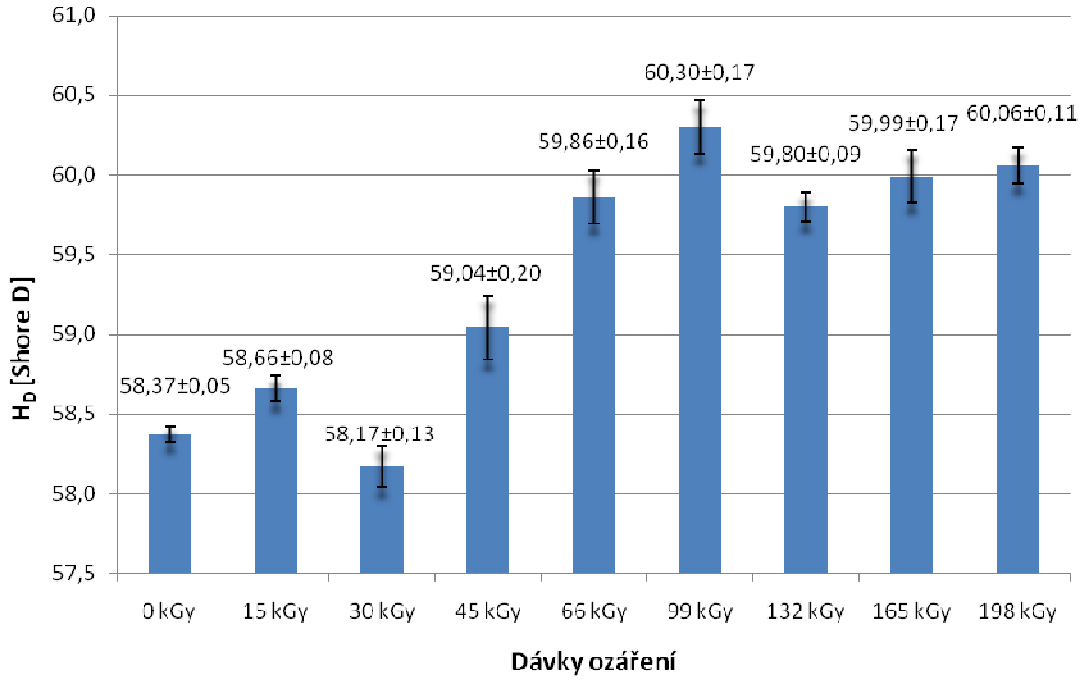
9.3 Měření tvrdosti Shore D

Měření tvrdosti bylo provedeno ručním digitálním tvrdoměrem Shore typu HPE od firmy Bareiss s přesností ±0,5 Shore. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 868. Pro měření tvrdosti zkušebních tělísek byla použita měřící hlava Shore D. Pro každý materiál a dávku ozáření bylo provedeno 10 měření, z nichž byla stanovena průměrná hodnota $\bar{x}$, směrodatná odchylka s a střední kvadratická chyba $\bar{\sigma}$. Měření probíhalo za normální teploty 23°C. Průběh měření spočíval v přiložení měřící hlavy a vtlačením ocelového hrotu do zkušebního tělíska po dobu 15s. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze *P9*.

9.3.1 Tvrdost Shore D u HDPE při 23°C

Tab. 24 Tvrdost Shore D materiálu HDPE

	0 kGy [Shore D]	**15 kGy** [Shore D]	**30 kGy** [Shore D]	**45 kGy** [Shore D]	**66 kGy** [Shore D]	**99 kGy** [Shore D]	**132 kGy** [Shore D]	**165 kGy** [Shore D]	**198 kGy** [Shore D]
$\bar{x}$	**58,37**	**58,66**	**58,17**	**59,04**	**59,86**	**60,30**	**59,80**	**59,99**	**60,06**
s	0,16	0,25	0,42	0,62	0,52	0,53	0,29	0,53	0,35
$\bar{\sigma}$	0,05	0,08	0,13	0,20	0,16	0,17	0,09	0,17	0,11

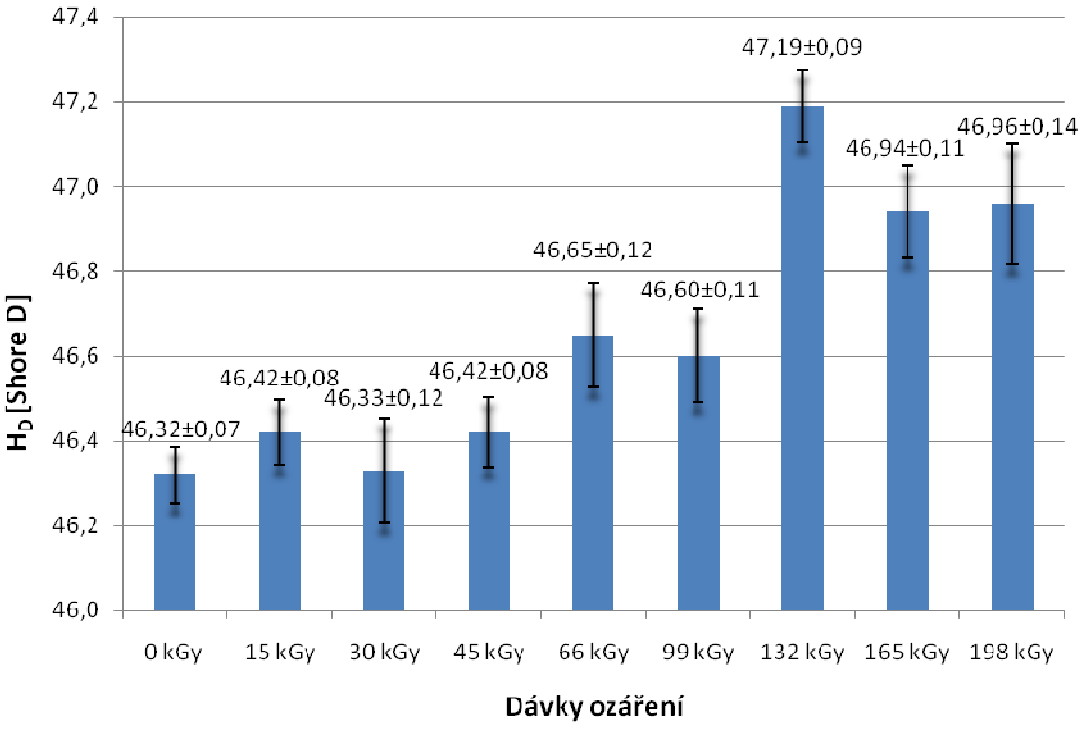


Obr. 69 Srovnání tvrdosti Shore D u HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

9.3.2 Tvrdost Shore D u LDPE při 23°C

Tab. 25 Tvrdost Shore D materiálu LDPE

	0 kGy [Shore D]	**15 kGy** [Shore D]	**30 kGy** [Shore D]	**45 kGy** [Shore D]	**66 kGy** [Shore D]	**99 kGy** [Shore D]	**132 kGy** [Shore D]	**165 kGy** [Shore D]	**198 kGy** [Shore D]
$\bar{x}$	**46,32**	**46,42**	**46,3**	**46,4**	**46,7**	**46,6**	**47,2**	**46,9**	**47,0**
s	0,19	0,24	0,39	0,26	0,39	0,35	0,27	0,34	0,45
$\bar{\sigma}$	0,06	0,08	0,12	0,08	0,12	0,11	0,09	0,11	0,14

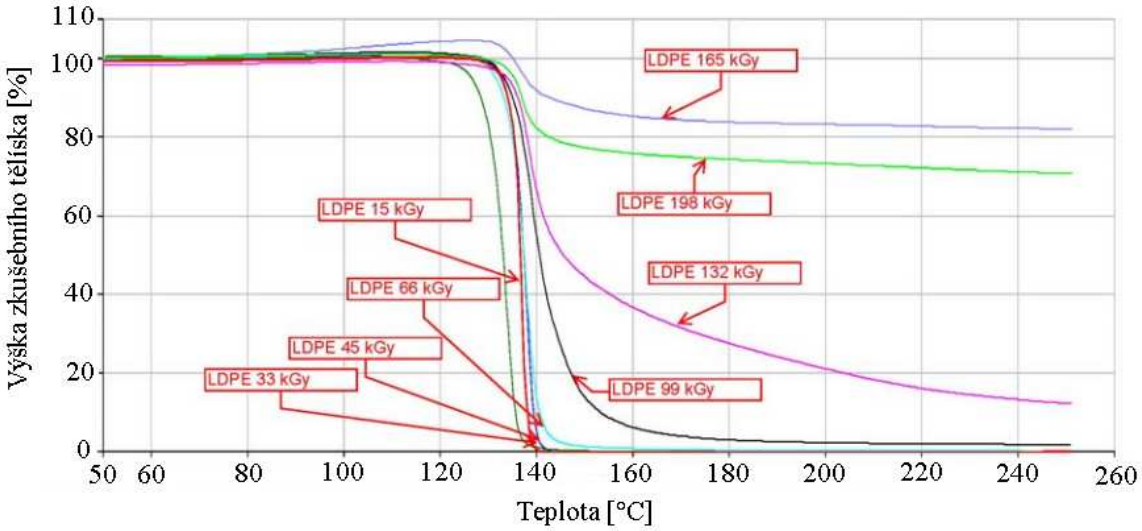


Obr. 70 Srovnání tvrdosti Shore D u LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

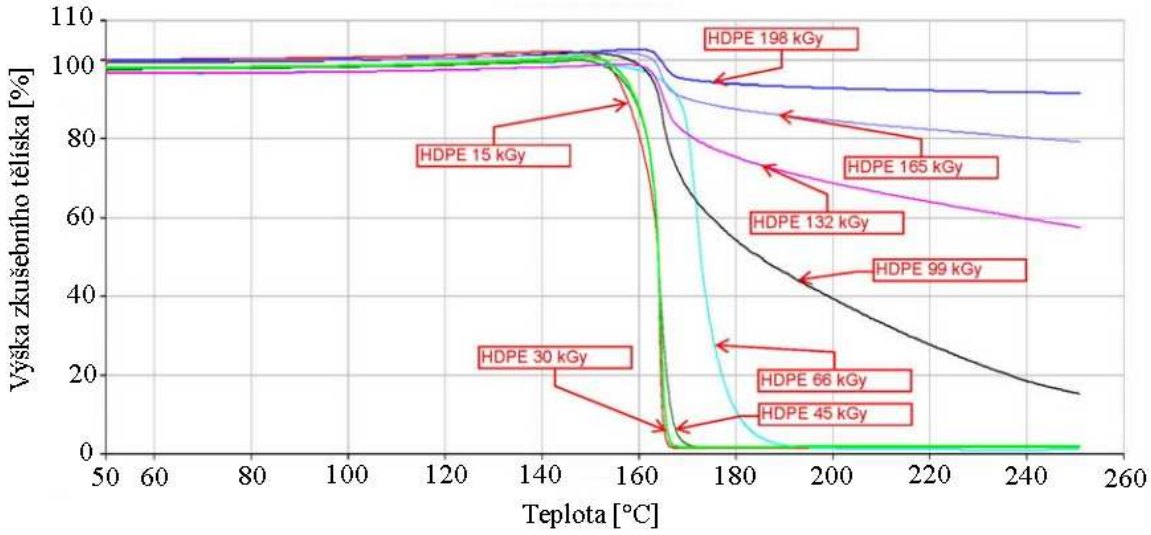
9.4 Měření TMA

TMA zkouška se používá pro měření teplotní odolnosti materiálů. Zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Perkin Elmer TMA-7 a byla provedena firmou Beta-Gamma-Servise GmBH & Co, KG v Německu. Zkouška spočívá v měření hloubky průniku sondy do zkušebního tělíska v závislosti na teplotě zkušebního tělíska. Na povrch zkušebního tělíska působí sonda konstantní silou. Během zkoušky se nejdříve zkušební tělísko zahřálo na teplotu 50°C po dobu 1 minuty a následně se teplota zvyšovala z 50°C na teplotu 250°C rychlostí 20°C/min.

9.4.1 Změřená data z TMA zkoušky



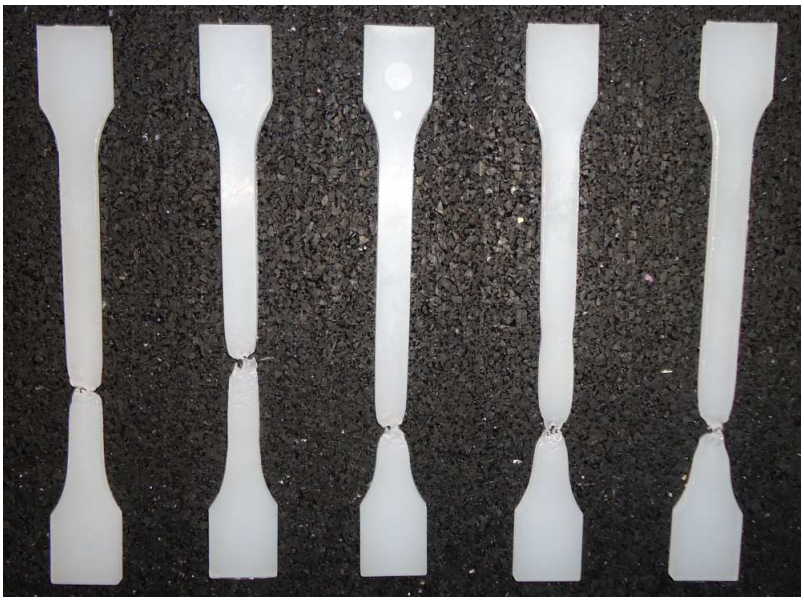
Obr. 71 TMA zkouška, LDPE



Obr. 72 TMA zkouška, HDPE

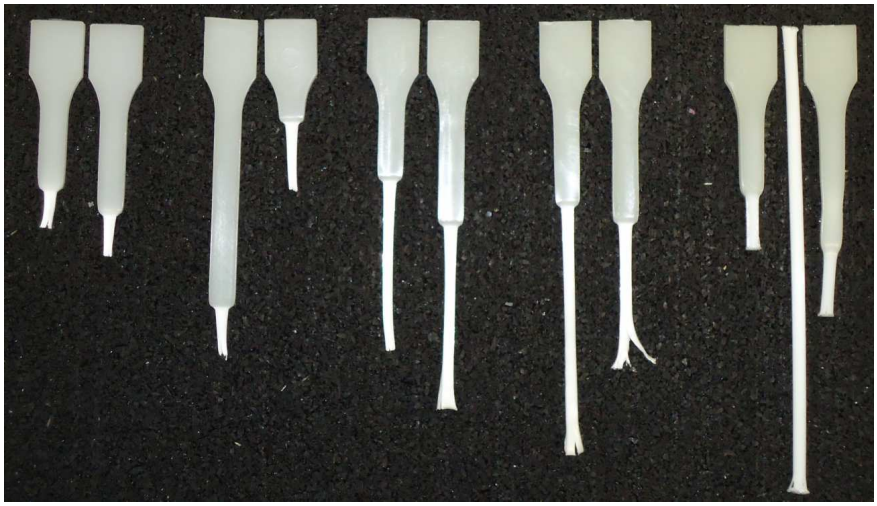
9.5 Změna optických vlastnosti

Při ozařování došlo u materiálu HDPE ke změně optických vlastností. S rostoucí dávkou ozáření se u materiálu projevovalo zhnědnutí, jak je patrné z *Obr 74*. U materiálu LDPE nedošlo ke změně vzhledu, *Obr 73*.



Neozářený *30 kGy* *66 kGy* *132 kGy* *198 kGy*

Obr. 73 Změna optických vlastností LDPE



Neozářený *30 kGy* *66 kGy* *132 kGy* *198 kGy*

Obr. 74 Změna optických vlastnosti HDPE

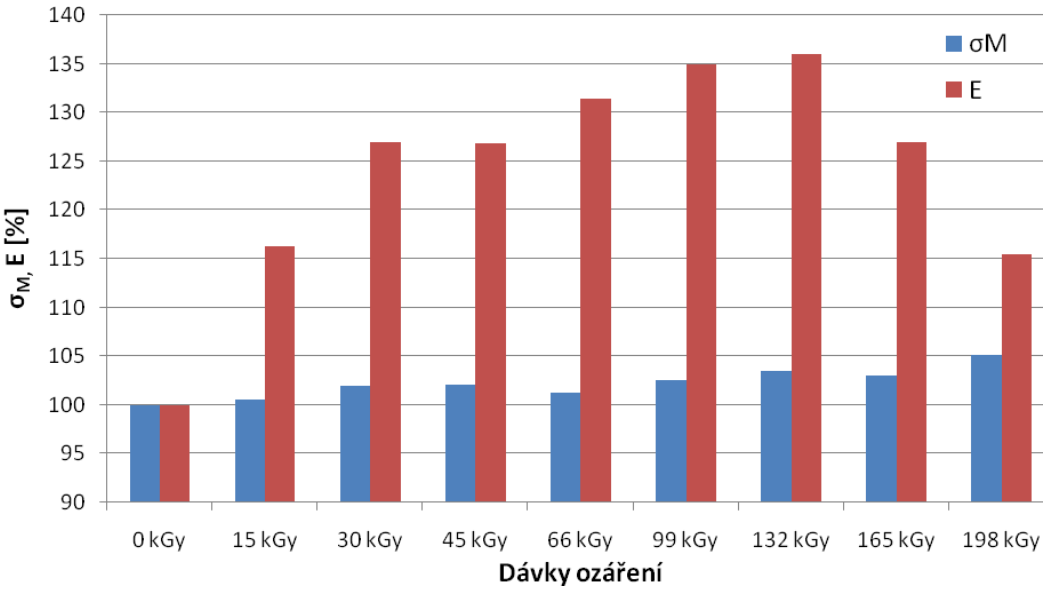
10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem této práce bylo zjistit vliv ionizačního beta záření na mechanické a termomechanické vlastnosti HDPE a LDPE. Jde o zkušební tělíska ozářené dávkami 15, 30, 45, 66, 99, 132, 165, 198 kGy. Ozáření tělísek provedla firma BGS GmBH & Co, KG. Skutečné hodnoty dávky ozáření jsou uvedeny v *Tab. 14* a *15*. Byly provedeny zkoušky tahem při teplotě 23°C a 100°C, zkoušky vrubové houževnatosti při teplotě 23°C a -20°C, zkoušky tvrdosti při teplotě 23°C a firmou BGS byla provedena zkouška TMA.

10.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

HDPE při pokojové teplotě 23°C:

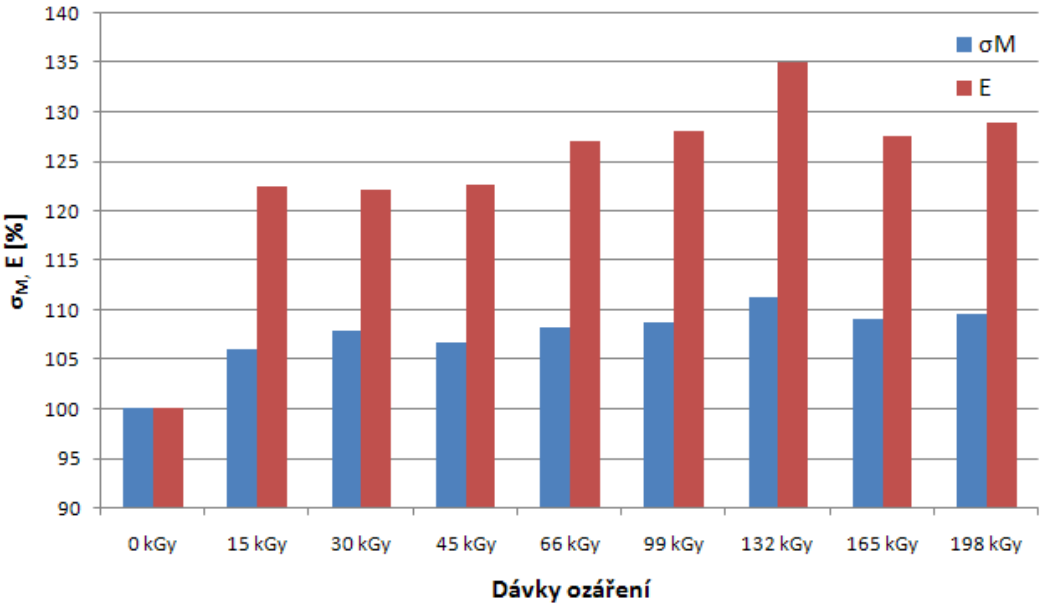
Jak je patrné z *Obr. 75* nedochází u materiálu HDPE k výraznému vzrůstu meze pevnosti při pokojové teplotě. Největší nárůst meze pevnosti je dosaženo u dávky ozáření 198 kGy, jde o 5-ti % nárůst oproti neozářenému materiálu a to z hodnoty 23,36 MPa na 24,56 MPa, (*Tab. 16).* Na rozdíl od meze pevnosti dochází u HDPE k výraznému nárůstu modulu pružnosti a to již po nízkých dávkách ozáření. Nejvyšší hodnoty je dosaženo při ozáření materiálu dávkou 132 kGy, zde je nárůst modulu pružnosti vůči neozářenému materiálu o 36% a to z 832,99 MPa na 1132,34 MPa, ale již při ozáření dávkou 30 kGy narůstá modulu pružnosti o 27%, z 832,99 MPa na 1057,48 MPa.



Obr. 75 Procentuální srovnání meze pevnosti a modulu pružnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

LDPE při pokojové teplotě 23°C:

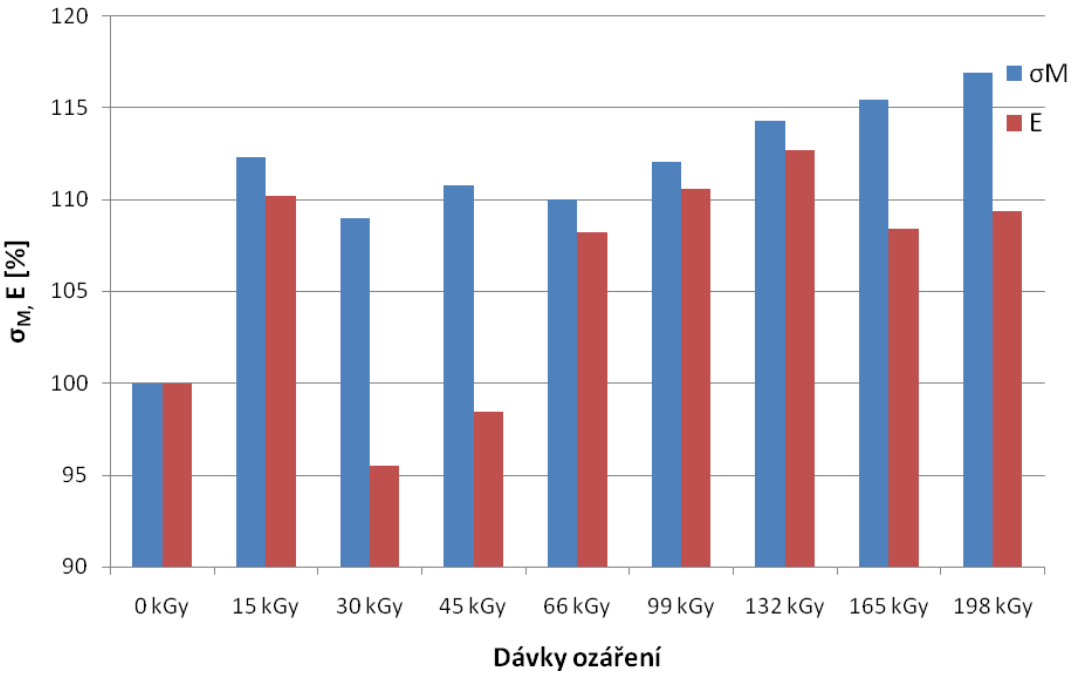
Podobně, jako u materiálu HDPE, zde dochází k výraznému zvýšení modulu pružnosti a to již od nízkých dávek ozáření. Nejvyšší hodnota modulu pružnosti je při dávce ozáření 132 kGy, dojde k navýšení modulu pružnosti o 35% vzhledem k neozářenému materiálu a to z 189,81 MPa na 256,24 MPa, (viz *Tab. 17*). Jak je znázorněno na *Obr. 76*, dojde k velkému nárůstu modulu pružnosti již po ozáření dávkou 15 kGy, dojde ke zvětšení o 22,5 % a modul pružnosti se zvýší z 189,81 MPa na 232,42 MPa. U materiálu LDPE dojde i k výraznějšímu zvětšení meze pevnosti, na rozdíl od HDPE. Nejlepší hodnoty meze pevnosti dosahuje LDPE při ozáření dávkou 132 kGy, kdy dojde k nárůstu oproti neozářenému materiálu o 11%, z 9,97 MPa se mez pevnosti zvýší na 11,10 MPa. Při dávce 15 kGy dojde k navýšení meze pevnosti o 6 %, z 9,97 MPa na 10,57 MPa.



Obr. 76 Srovnání meze pevnosti a modulu pružnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

HDPE při zvýšené teplotě 100°C:

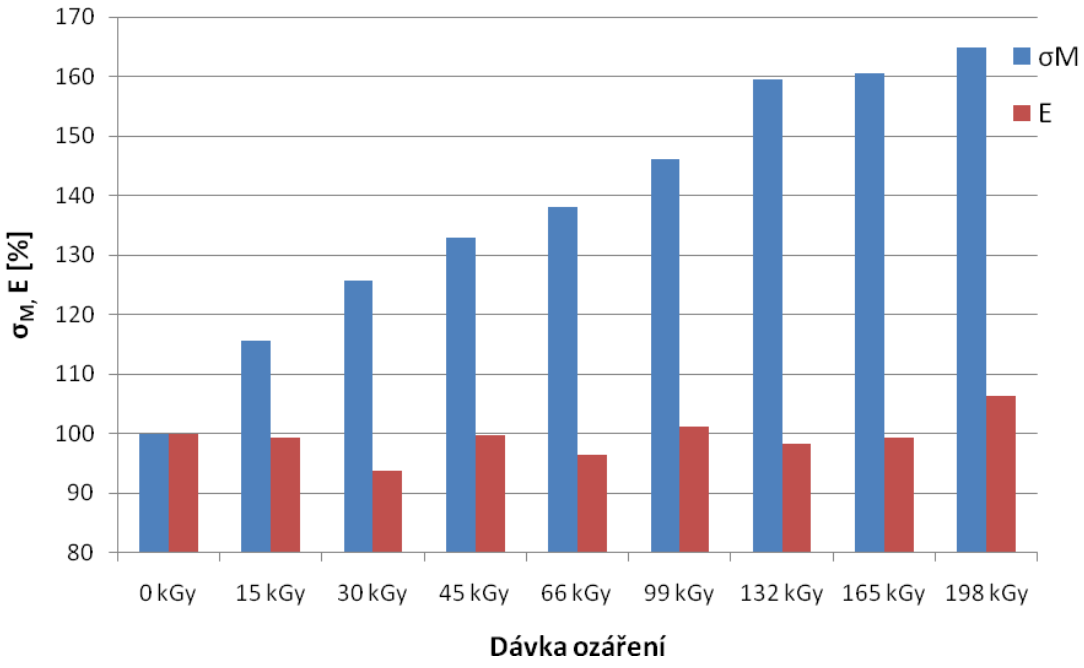
Ozařování má dobrý vliv na materiál i při zvýšené teplotě. Jak je patrné z *Obr. 77*, dochází k navýšení jednak meze kluzu, ale i ke zvýšení modulu pružnosti. Výjimkou jsou hodnoty ozáření 30 kGy a 45 kGy, kde dochází ke snížení modulu pružnosti oproti neozářenému materiálu. Maximální hodnotu meze pevnosti dosahuje HDPE při ozáření dávkou 198 kGy, dochází k nárůstu o 17%, z 5,99 MPa na 7,00 MPa, (viz *Tab. 18*). Nejvyšší hodnotu modulu pružnosti je dosažena při ozáření dávkou 132 kGy. Modul vzroste oproti neozářenému materiálu o 12,5% z hodnoty 120,24 MPa na 135,48 MPa.



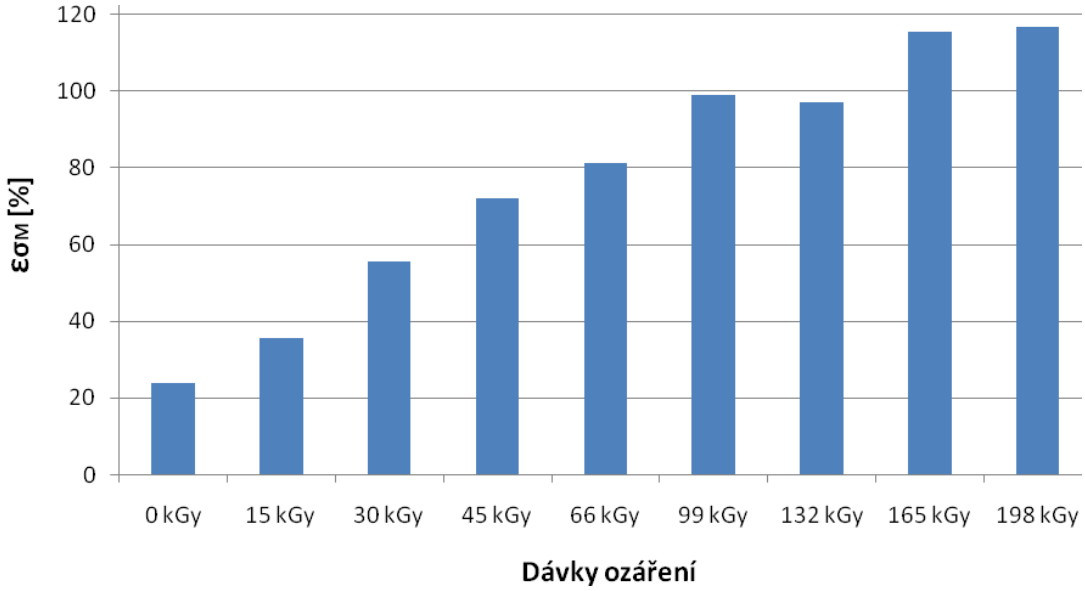
Obr. 77 Srovnání meze pevnosti a modulu pružnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C

LDPE při zvýšené teplotě 100°C:

Vzhledem k nízkým naměřeným hodnotám docházelo ke vzniku větších chyb, na *Obr. 64* srovnávající moduly pružnosti LDPE při zvýšené teplotě 100°C je pomocí chybových úseček znázorněn rozptyl středních kvadratických chyb, za pozornost stojí jen zvýšený modul pružnosti při ozáření materiálu dávkou 198 kGy, jedná se o navýšení oproti neozářenému materiálu o 6 % z hodnoty 22,31 MPa na 23,73 MPa, (viz. *Tab. 19*). Na rozdíl od modulu pružnosti, došlo k výraznému zvýšení meze pevnosti a to až o 65 % z 1,41 MPa na 2,32 MPa. Za pozornost u tohoto typu materiálu stojí i poměrné prodloužení, které se s rostoucí dávkou ozáření výrazně zvyšuje, jak je patrné z *Obr. 79*.



Obr. 78 Srovnání meze pevnosti a modulu pružnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C

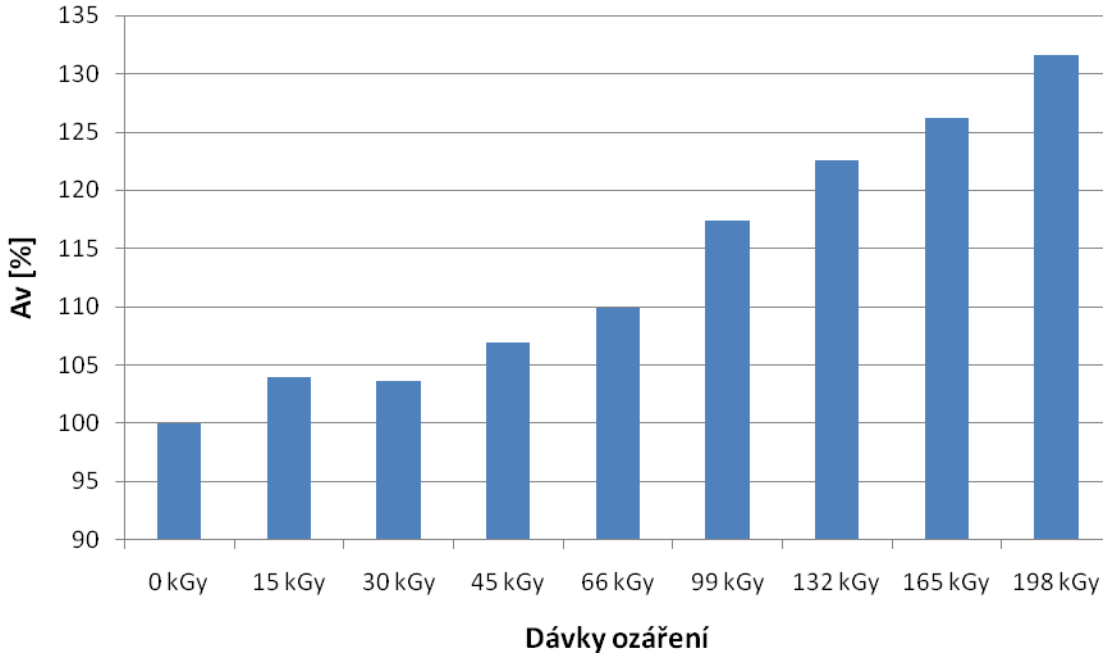


Obr. 79 Závislost poměrného prodloužení na dávce ozáření LDPE při 100°C

10.2 Vyhodnocení zkoušky vrubové houževnatosti

HDPE při pokojové teplotě 23°C:

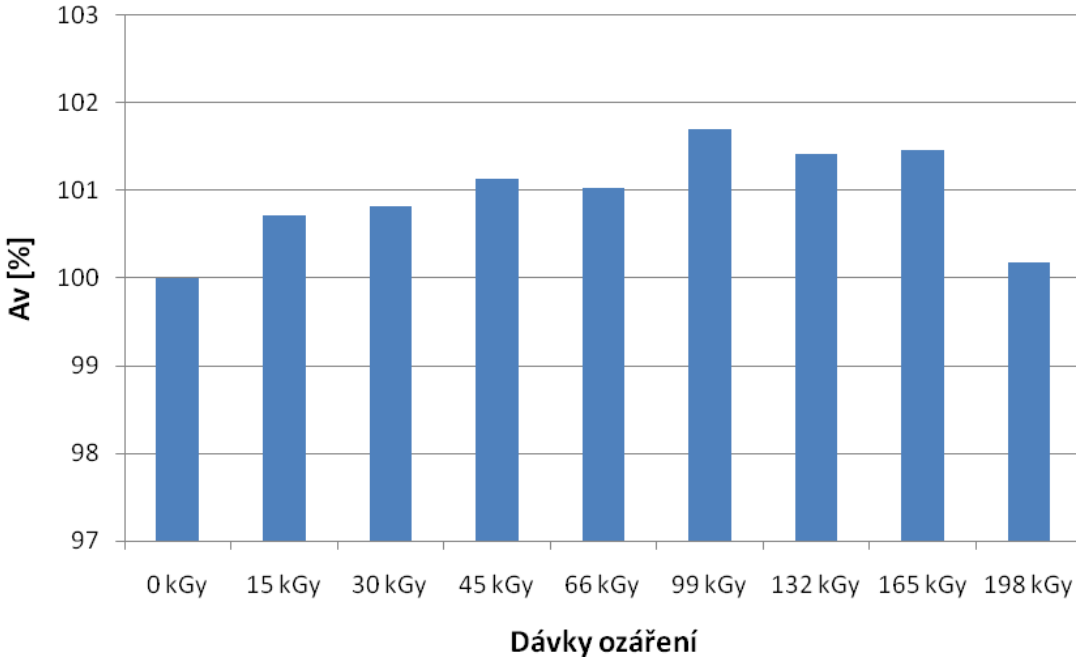
Při porovnání ozářených vzorků HDPE s neozářenými došlo k nárůstu vrubové houževnatosti nejvíce u vzorků ozářených dávkou 198 kGy o 31,5 % a to z hodnoty 6,98 kJ/m^2 na 9,19 kJ/m^2. K nárůstu docházelo v závislosti na zvyšující se dávce ozáření. (viz *Obr. 80*)



Obr. 80 Procentuální srovnání vrubové houževnatosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

LDPE při pokojové teplotě 23°C:

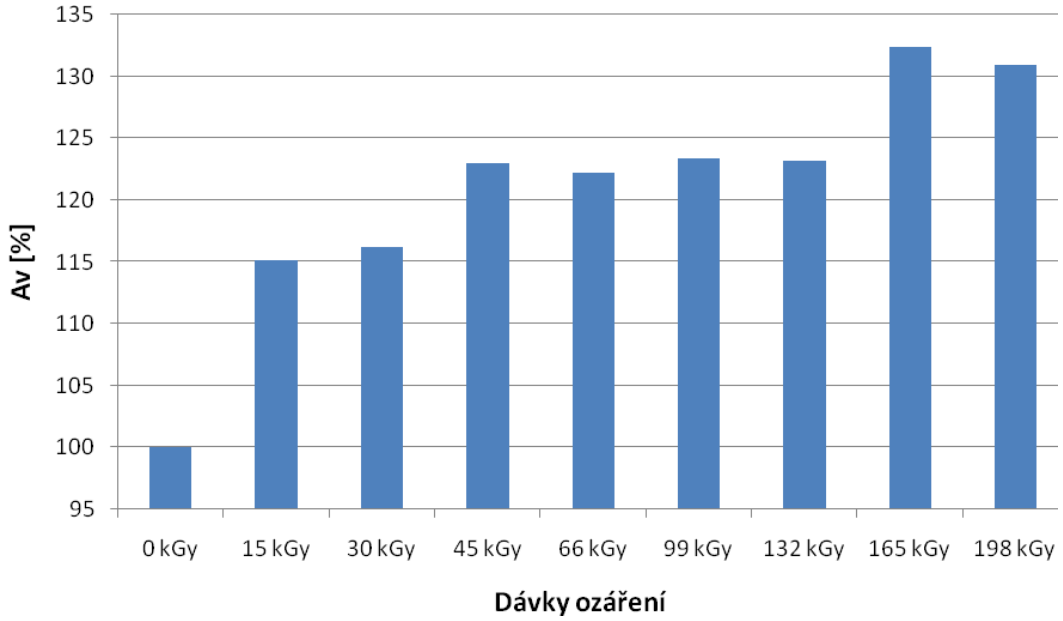
U materiál LDPE se při pokojové teplotě výrazně neprojevil vliv zesítění. K nejvyššímu nárůstu vrubové houževnatosti došlo u materiálu ozářeného dávkou 99 kGy, došlo zde však o nárůst necelých 2 % z hodnoty 45,59 kJ/m^2 na 46,36 kJ/m^2. Vliv ozáření se u materiálu LDPE v případě vrubové zkoušky při teplotě 23°C projeví jen minimálním nárůstem houževnatosti. Na *Obr. 81* můžeme vidět, že u dávky ozáření 198 kGy dochází ke snížení hodnoty vrubové houževnatosti oproti ostatním dávkám ozáření, z toho lze usuzovat, že při vyšší dávce ozáření by mohlo dojít ke zhoršení vrubové houževnatosti.



Obr. 81 Procentuální srovnání vrubové houževnatosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C

HDPE při snížené teplotě -20°C:

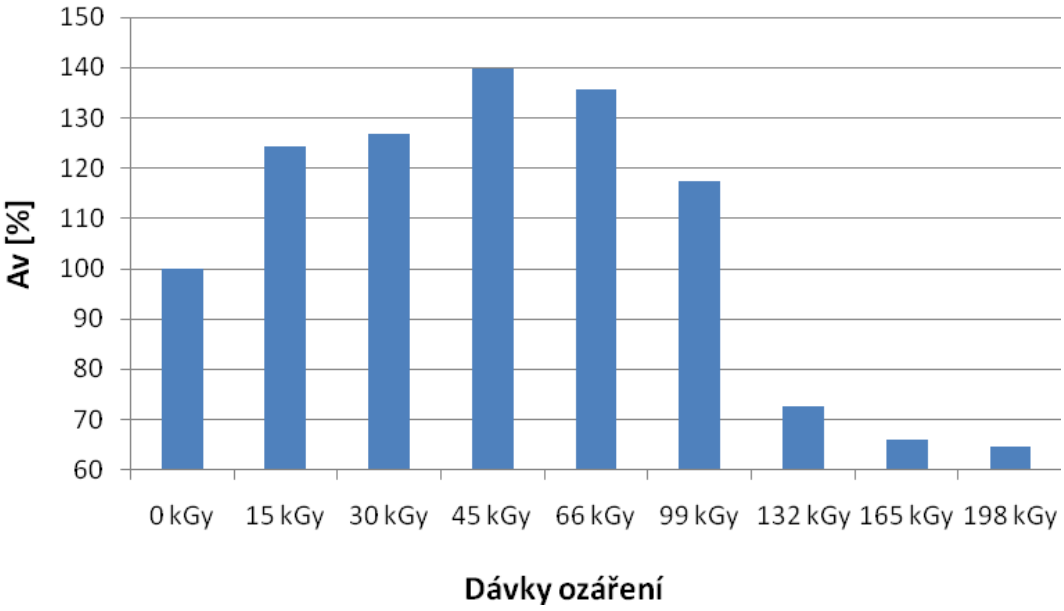
Při porovnání s neozářeným materiálem můžeme pozorovat značný nárůst vrubové houževnatosti a to v nejlepším případě o 32 %, Jedná se o materiál ozářený 165 kGy, u kterého došlo ke zvýšení z 3,45 kJ/m^2 na 4,57 kJ/m^2. Při tak nízké teplotě je vliv ozáření dobře patrný, již při ozáření materiálu dávkou 15 kGy stoupne vrubová houževnatost o 15 %, z 3,45 kJ/m^2 na 3,97 kJ/m^2. Z vývoje hodnot na *Obr. 82* je patrno, že u materiálu HDPE při teplotě -20°C dochází ke zvyšování vrubové houževnatosti se zvyšujícím se dávkou ozáření.



Obr. 82 Procentuální srovnání vrubové houževnatosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při -20°C

LDPE při snížené teplotě -20°C:

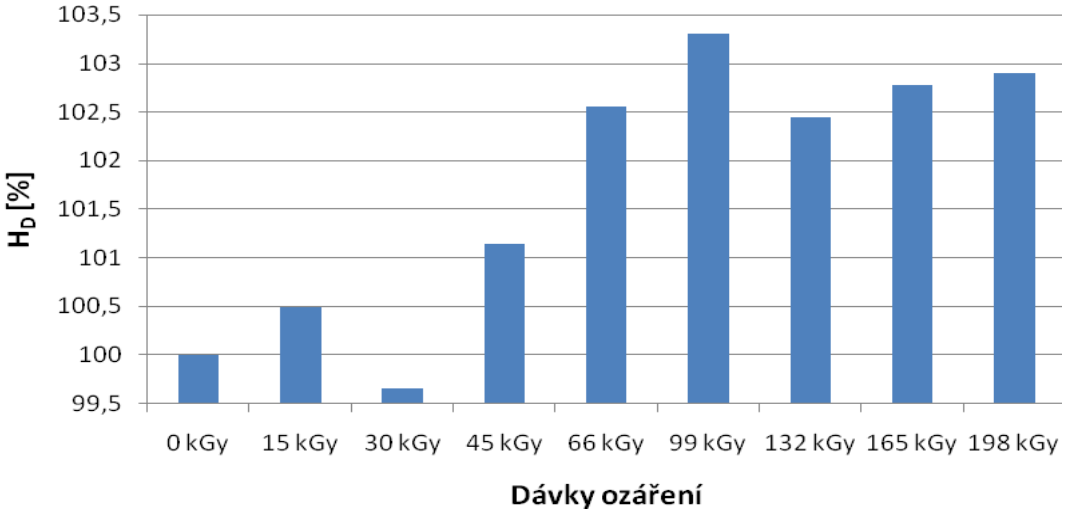
U materiálu LDPE se při tak nízké teplotě projeví vliv ozáření nejdříve jako výrazné zvýšení vrubové houževnatosti do hodnoty ozáření 99 kGy, Nejvyšší hodnoty je dosaženo pro dávku ozáření 45 kGy. V této hodnotě je nárůst houževnatosti 40% oproti neozářenému materiálu a to z hodnoty 12,09 kJ/m^2 na 16,91 kJ/m^2. Jak je patrno z *Obr. 83*, dojde při zvýšení dávky ozáření nad 99 kGy k výraznému snížení vrubové houževnatosti oproti neozářenému materiálu, v dávkách 165 kGy a 198 kGy se houževnatost zhorší o 35 %, respektive z hodnoty 12,09 kJ/m^2 na 7,82 kJ/m^2 v případě dávky 198 kGy.



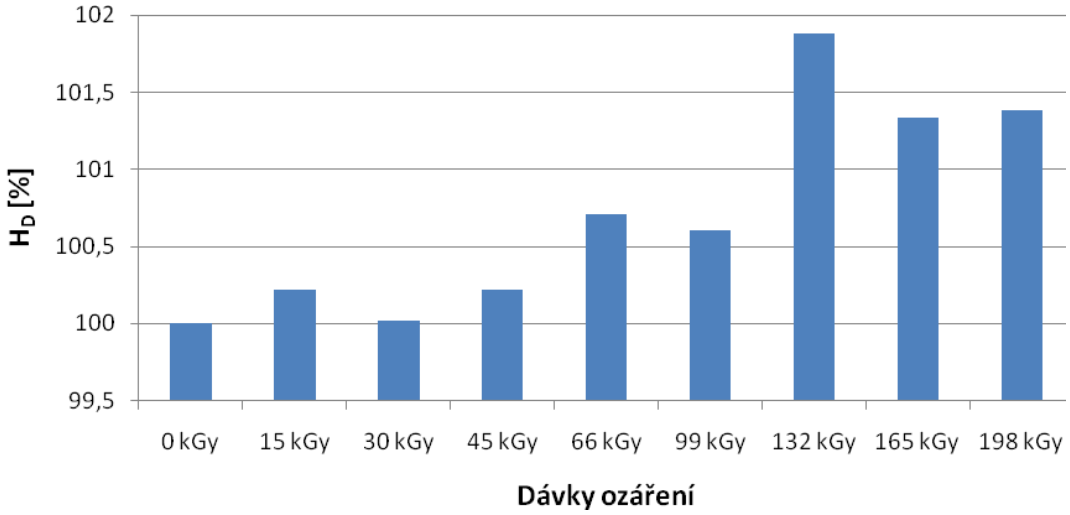
Obr. 83 Procentuální srovnání vrubové houževnatosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při -20°C

10.3 Vyhodnocení tvrdosti Shore D

Jak je patrno z *Obr. 84* a *Obr. 85.* nemá ozáření výrazný vliv na tvrdost materiálu jak u HDPE tak u LDPE. Nejvyšší nárust tvrdnosti u HDPE je při ozáření dávkou 99 kGy, dojde o nárůst tvrdosti o 3,3 %, z 58,37 Shore D na 60,3 Shore D. V případě LDPE dojde o nejvyšší nárůst při dávce ozáření 132 kGy, zde se tvrdost zvýší o pouhých 1,8 %, z 46,32 Shore D na 47,19 Shore D. Můžeme tedy usuzovat, že vliv ozařování se výrazně neprojeví na změně tvrdosti a to jak ve smyslu zlepšení tak i ve smyslu zhoršení. V případě materiálu HDPE a dávky ozáření 30 kGy je sice nepatrná ztráta tvrdosti, ale vzhledem k toleranci měřícího zařízení ±0,5 Shore D a k minimálnímu rozptylu naměřených hodnot, můžeme tento fakt zanedbat.



Obr. 84 Procentuální srovnání tvrdosti Shore D u HDPE



Obr. 85 Procentuální srovnání tvrdosti Shore D u LDPE

10.4 Vyhodnocení zkoušky TMA

Se zvyšující se dávkou ozáření roste odolnost polymerů. Nezesíťovaný LDPE a HDPE ztrácí svoji teplenou kapacitu při překročení tání. Ozářením však teplotní odolnost prudce vzrůstá a při dávce 198 kGy jsou oba typy polyetylenu stabilní do teploty až 250C°, což je vysoce nad bodem tání základního materiálu, (viz *Obr. 73 a 74*). Z toho vyplívá, že použitelnost ozářených polyetylenu se posouvá až na teploty vysoce překračující jejich teplotu tání.

ZÁVĚR

Vliv radiačního síťování materiálu HDPE se u tahové zkoušky při pokojové teplotě projevil již po ozáření dávkou 15 kGy, kdy došlo k narůstání modulu pružnosti do dávky ozáření 132 kGy (nárůst o 36%). Mez pevnosti se však výrazně nezvýšila. Při zvýšené teplotě 100°C došlo u HDPE k nárůstu, jednak modulu pružnosti, tak i meze pevnosti. U materiál LDPE došlo při pokojové teplotě také k nárůstu modulu pružnosti a oproti HDPE i k výraznějšímu nárůstu meze pevnosti. U tahové zkoušky LDPE při zvýšené teplotě se modul pevnosti výrazně nezměnil, ale došlo zde k nárůstu meze pevnosti a to v závislosti s rostoucí dávkou ozáření. U dávky ozáření 198 kGy se mez pevnosti zvýšila o 65% oproti neozářenému materiálu.

Materiál HDPE rovněž prokázal dobrý vliv ionizačního záření na zvýšení vrubové houževnatosti. Dochází k navyšování houževnatosti s rostoucí dávkou ozáření a to jak u pokojové teploty, tak i při teplotě -20°C. Oproti tomu materiál LDPE nevykazuje výrazné změny vrubové houževnatosti vlivem záření, dokonce při snížené teplotě -20°C dochází ke zhoršení houževnatosti u dávky ozáření 132 kGy a víš.

Měření tvrdosti neprokázalo ani zhoršení ani zlepšení tvrdosti u obou materiálů při teplotě 23°C, naměřené hodnoty se lišili jen minimálně na rozdíl od neozářeného materiálu.

Zkouška TMA provedená firmou firmou Beta-Gamma-Servise GmBH & Co, KG v Německu prokázala výrazné zvýšení teplotní stability obou ozářených polyetylénů již od dávky 132 kGy.

Z provedených zkoušek vyplývá, že vlivem radiačního síťování dochází ke zlepšování mechanických vlastností u obou materiálů a to především za zvýšené teploty 100°C. Nutno také podotknout vliv ozařování na vzhledu materiálu HDPE, kde dochází s rostoucí dávkou ozáření k hnědnutí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] MLEZIVA, J.: *Polymery – struktura, vlastnosti a použití*, Praha, Sobotáles, 1993

[2] DROBNY, J.: *Radiation Technology for Polymers*, Florida, CRC Press LLC, 2003

[3] BEREJKA, A.J.: *Proceedings 3rd Annual Green Chemistry and Engineering Konference: Noviny Towards Industrial Ekology*, Washington D.C., 1999

[4] DATTA, S.K., CHAKI T.K., BHOWMICK A.K.: *Advanced Polymer Processing Operations*, Westwood, Noyes Publications, 1998

[5] DAVIDSON, R.S.: *Technology and Applications U.V. and E.B. Cudiny*, London, SITA Technology Ltd., 1999

[6] MEHNERT R., PINCUS A., JANORSKY I., STOWE R., BEREJKA A.: *UV & EB Curing Technology and Equipment*, London, John Wiley & Sons Ltd., 1998

[7] *Navajo: Otevřená encyklopedie,* [online], [cit. 2009-04-15], Dostupný z *WWW: http://navajo.cz/*

[8] SOVA, M., KREBS, J. a kolektiv: *Termoplasty v praxi*, Praha, ONTL, 2001

[9] CHMIELEWSKI, A. G..: *Progress in Radiation processing of polymers*, Elsevier Science B.V. Warsaw, 2005

[10] VÁLEK, M.: *Vliv ozařování na mechanické a termomechanické vlastnosti polypropylénu*, Zlín, 2006, UTB ve Zlíně

[11] GHERING, J.: *With Radiation crosslinking of engineering plastics into the next millenium*, Wiehl, BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co.KG, 2000

[12] CLOUGH, R.L.: *High-energy radiation and polymers: A review of commercial process and emerging applications*, Elsevier Science B.V., Albuquerque, 2001

[13] DANĚK M.: *Radiační síťování plastů*, Wiehl, BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co.KG, [cit 2009-04-07], Dostupný z *WWW: http://bgs.de/*

[14] ULMAN V.: *„Astronukl fyzika" – jaderná fyzika, astrofyzika, kosmologie, filozofie*, [online], [cit 2009-04-24], Dostupný z *WWW: http://astronuklfyzika.cz*

[15] SILVERMAN, J.: *Radiation Processing of Polymers*, Munich, Hanser, 1992

[16] *Materiály ve strojírenství*, [online], [cit. 2009-05-08], Dostupný z *WWW: http://www.fme.vutbr.cz/opory*

[17] *Wikipedia: Otevřená encyklopedie*, [online], [cit. 2009-04-15], Dostupný z *WWW: http://cs.wikipedia.org*

[18] *Petroleum*, [online], [cit. 2009-04-15], Dostupný z *WWW: http://petroleum.cz*

[19] JARUŠEK, J.: *Metody zkoumání polymerů*, *Pardubice*, VŠCHT, 1989

[20] IVANOV, S.V.: *Radiation chemistry of polymers*, *Tokyo*, VSP, 1992

[21] CLEGG, D.W., COLLYER A.A.: *Irradiation Effects on polymers*, Essex, Elsevier, 1991

[22] HOLMES-SIEDLE, A. G., ADAMS L.: *Handbook of Radiation effects – second edition*, Oxford, Oxford University Press, 2002

[23] KAUSCH, H.H., ANJUM, J.: *Radiation effects on polymers for biological use*, *Springer*, 2003

[24] CHEREMISINOFFM N.P.: *Handbook of polymer science and technology Volume 2*, CRC Press, 1989

[25] MANAS CH., SALIL K. R.: *Plastics technology handbook*, New York, Marcel Dekker, 1998

[26] *Encyklopedie fyziky*, [online], [cit. 2009-05-24], Dostupný z *WWW*: *http://fyzika.jreichl.com*

[27] PEACOCK A. J.: *Handbook of Polyethylene*, New York, Marcel Dekker, 2000

[28] *Fyzika v moderním lékařství*, [online], [cit. 2009-11-04], Dostupný z *WWW*: *http://cz7asm.wz.cz*

[29] KHAN, F.M.: *The Physics of Radiation Therapy – Fourth Edition*, Baltimore, 2009, Lippincott Williams & Wilkins

[30] ROSS, A.: *Ultraviolet and electron beam (UV/EB) cured coatings, inks and adhesives*, Durnhem, 2001, The Clean Air Technologie Center

[31] BRADLEY R.: Radiation technology handbook, New York, 1984, Marcel Dekker

[32] *Advances in radiation chemismy of polymers*, [online], [cit. 2009-10-11], Dostupný z *WWW: http://www.iaea.org/*

[33] HOLÍK, Z.: *Vliv elektromagnetického pole na mechanické vlastnosti plastů*, Zlín, 2007, UTB ve Zlíně

[34] *Mechanické vlastnosti polymerů*, [online], [cit. 2009-11-11], Dostupný z *WWW: http://www.beltaplast.cz/*

[35] MACEK, K.: *Nauka o materiálu*, Praha, 2004, České vysoké učení technické v Praze

[36] ADÁMEK, R.: *Vliv záření na vlastnosti vybraných plastů*, Zlín, 2008, UTB ve Zlíně

[37] Technická norma: ČSN EN ISO 179 (64 0612)

[38] Technická norma: ČSN EN ISO 527-1 (64 0604)

[39] Technická norma: ČSN EN ISO 178 (64 0607)

[40] Technická norma: ČSN EN ISO 7619 (62 1432)

[41] *MM průmyslové spektrum*, [online], [cit. 2009-12-11], Dostupný z *WWW: http:// www.mmspektrum.com*

[42] VISHU, S.: *Handbook of Plastics Testing Technology – Second Edition*, New York, 1998, Wiley

[43] IDES – The plastics web, [online], [cit. 2009-12-16], Dostupný z *WWW: http://* www.ides.com

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ρ	hustota	[g/cm3]
s_e	dosah elektronů	[mm]
E	energie částic	[MeV]
t_{opt}	optimální tloušťka	[mm]
λ	přeměnná konstanta	[s^{-1}]
A	aktivita radionuklidu	[Bq]
T	poločas rozpadu radionuklidu	[s]
N	avangardovo číslo	[6,023.10^{26}/kilomol]
M	molární hmotnost radionuklidu	[kg/mol]
D	dávka	[Gy]
$\dot{D}$	dávkový příkon	[Gy/s]
G	stupeň zesítění	[zesítění/100eV]
ε_{tB}	nominální poměrné prodloužení při přetržení	[%]
ε_B	poměrné prodloužení při přetržení	[%]
σ_t	napětí v tahu v lineární oblasti	[MPa]
ε_t	poměrné prodloužení v lineární oblasti	[mm]
σ_B	smluvní napětí při přetržení	[MPa]
σ_y	smluvní napětí meze kluzu	[MPa]
ε_r	relativní změna průřezu	[-]
ε_l	relativní změna délky	[-]
ΔV	rozdíl změny objemu	[mm^3]
V_0	původní velikost objemu	[mm^3]
μ	poissonovo číslo	[-]

h	tloušťka	[mm]
b	šířka	[mm]
L	délka	[mm]
d	aritmetický průměr délek úhlopříček	[mm]
Tg	teplota skelného přechodu	[°C]
L_{EX}	rozpětí extenzometru	[mm]
$\varepsilon_{\sigma m}$	poměrná prodloužení při maximální síle	[%]
$\varepsilon_{F\max}$	deformace při maximální síle	[mm]
σ	napětí	[MPa]
ε	poměrné prodloužení	[%]
ΔL_{Fm}	skutečné prodloužení při maximální síle	[mm]
F	síla	[N]
ΔL	skutečné prodloužení	[mm]
Fm	maximální síla	[N]
Sm	deformace při maximální síle	[mm]
Sv	průhyb	[mm]
Am	práce při maximální síle	[kJ/m^2]
$\bar{x}$	aritmetický průměr	[1]
s	směrodatná odchylka	[1]
s^2	rozptyl	[1]
$\bar{\sigma}$	střední kvadratická chyba	[1]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
σM	mez pevnosti materiálu	[MPa]
$\varepsilon_{\sigma M}$	poměrná deformace při maximálním napětí	[%]

A_V	vrubová práce	[kJ.m-^{2}]
H_D	hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu D	[Shore D]
D	průměr	[mm]
R	poloměr	[mm]
TMA	Teplotně-mechanická analýza	
ČSN	česká technická norma	
EN	evropská norma	
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci	
LDPE	nízko-hustotní polyetylen	
HDPE	vysoko-hustotní polyetylen	
PP	polypropylen	
PE	polyetylen	
UHMWPE	ultra-vysokomolekulární polyetylen	
PEX	zesíťovaný vysoko-hustotní polyetylen	
MDPE	středně-hustotní polyetylen	
LLDPE	lineárně nízko-hustotní polyetylen	
VLDPE	velmi nízko-hustotní polyetylen	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Základní rozdělení polymerů 13
Obr. 2: Tvar makromolekulárních řetězců: a) lineární polymer, ... 15
Obr. 3 Molekulová struktura polyetylénu 16
Obr. 4 Struktura makromolekul různých typů polyetylénu: 18
Obr. 5 Nízko-hustotní polyetylén 22
Obr. 6 Vysoko-hustotní polyetylén 23
Obr. 7 Schématické znázornění ionizace 29
Obr. 8 Schématické znázornění excitace 29
Obr. 9 Typy záření při rozkladu jádra 31
Obr. 10 Schéma průniku záření 32
Obr. 11 Hloubka průniku urychlených elektronů v závislosti na napětí urychlovač 33
Obr. 12 Průběh dávky energie při jednostranném beta záření [13] 34
Obr. 13 Schopnost pronikání elektronů a gama záření [13] 34
Obr. 14 Ilustrace zářením indukovaných procesů 35
Obr. 15 Klasifikace termoplastických polymerů 36
Obr. 16 Klasifikace termoplastických polymerů 36
Obr. 17 A - Gama záření, B – Elektronový paprsek 40
Obr. 18 Síťování PE elektronovým zářením 41
Obr. 19 Závislost vzniku hydrogenu při ozařování polyetylénu s nízkým obsahem přísad [32] 44
Obr. 20 Zdroje ionizujícího záření používané pro ozařování polymerů 50
Obr. 21 Gama zařízení 51
Obr. 22 Schéma urychlovače elektronů 53
Obr. 23 Tlaková nádoba 53
Obr. 24 Žhavící katoda 53
Obr. 25 Urychlovací trubice 54
Obr. 26 Odchylovač proudu elektronů 54
Obr. 27 Snímací trychtýř 54
Obr. 28 Lineární urychlovač 55
Obr. 29 Kruhový urychlovač 56
Obr. 30 Běžné způsoby zatížení zkušebních tělísek 57

Obr. 31 Typy tahových křivek 58
Obr. 32 Závislost „napětí – poměrné prodloužení“ v počáteční oblasti 61
Obr. 33 Obecná křivka „síla – prodloužení“ 62
Obr. 34 Tvary zkušebních tělísek pro zkoušku tahem 63
Obr. 35 Schéma Charpyho kladiva 64
Obr. 36 Tvar zkušebního tělesa 65
Obr. 37 Zkouška tvrdosti dle Brinella 66
Obr. 38 Zkouška dle Vickerse 67
Obr. 39 Zkouška tvrdosti podle Rockwella (HRB, HRC) 68
Obr. 40 Zkušební hroty tvrdoměru typu Shore A a Shore D 69
Obr. 41 Vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 420C 72
Obr. 42 Univerzální trhací stroj Zwick Roell 1456 74
Obr. 43 Teplotní komora a nádoba s tekutým dusíkem 75
Obr. 44 Zkušební stroj CAEST Resil Impactor Junior 76
Obr. 45 Vrubovací stroj CEAST Notchvis 77
Obr. 46 Měřící zařízení Shore typu HPE 77
Obr. 47 Zkušební zařízeni Perkin Elmer TMA-7 78
Obr. 48 Zkušební tělíska 79
Obr. 49 Tělíska pro ozařování 81
Obr. 50 Nastavení extenzometru 84
Obr. 51 Měření zkoušky tahu vně temperanční komory 85
Obr. 52 Srovnání grafů závislosti zatížení na poměrném prodloužení 86
Obr. 53 Srovnání meze pevnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 87
Obr. 54 Srovnání modulu pružnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 87
Obr. 55 Srovnání grafů závislosti zatížení na poměrném prodloužení 88
Obr. 56 Srovnání meze pevnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 89
Obr. 57 Srovnání modulu pružnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 89
Obr. 58 Srovnání grafů závislosti zatížení na poměrném prodloužení 90
Obr. 59 Srovnání meze pevnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C 91
Obr. 60 Srovnání modulu pružnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C 91
Obr. 61 Srovnání grafů závislosti zatížení na poměrném prodloužení 92
Obr. 62 Srovnání meze pevnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C 93

Obr. 63 Srovnání modulů pružnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C 93
Obr. 64 Znázornění použitých hodnot zkoušky vrubové houževnatosti 94
Obr. 65 Srovnání vrubové houževnatosti HDPE 95
Obr. 66 Srovnání vrubové houževnatosti LDPE 96
Obr. 67 Srovnání vrubové houževnatosti HDPE 97
Obr. 68 Srovnání vrubové houževnatosti LDPE 98
Obr. 69 Srovnání tvrdosti Shore D u HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 99
Obr. 70 Srovnání tvrdosti Shore D u LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 100
Obr. 71 TMA zkouška, LDPE 101
Obr. 72 TMA zkouška, HDPE 102
Obr. 73 Změna optických vlastností LDPE 102
Obr. 74 Změna optických vlastnosti HDPE 103
Obr. 75 Procentuální srovnání meze pevnosti a modulu pružnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 104
Obr. 76 Srovnání meze pevnosti a modulu pružnosti LDPE 105
Obr. 78 Srovnání meze pevnosti a modulu pružnosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C 106
Obr. 79 Srovnání meze pevnosti a modulu pružnosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 100°C 107
Obr. 80 Závislost poměrného prodloužení na dávce ozáření LDPE při 100°C 108
Obr. 81 Procentuální srovnání vrubové houževnatosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 109
Obr. 82 Procentuální srovnání vrubové houževnatosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při 23°C 110
Obr. 83 Procentuální srovnání vrubové houževnatosti HDPE v závislosti na dávce ozáření při -20°C 111
Obr. 84 Procentuální srovnání vrubové houževnatosti LDPE v závislosti na dávce ozáření při -20°C 112
Obr. 85 Procentuální srovnání tvrdosti Shore D u HDPE 113
Obr. 86 Procentuální srovnání tvrdosti Shore D u LDPE 113

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní druhy polyetylénu 17
Tab. 2: Srovnání vybraných charakteristik LDPE a HDPE [1] 19
Tab. 3 Klasifikace polymerů podle jejich reakce na ionizující záření [2] 27
Tab. 4 Hodnoty G (x) pro polymery ozářené za pokojových teplot 49
Tab. 5 Rozměry zkušebních tělísek 63
Tab. 6 Rozměry zkušebních těles pro zkoušku rázové houževnatosti 65
Tab. 7 Technické parametry vstřikovacího stroje ARBURG 73
Tab. 8 Přehled technických parametrů trhacího stroje Zwick Roell 1456 75
Tab. 9 Parametry zkušebního stroje CAEST Resil Impactor JR 76
Tab. 10 Parametry zkušebního stroje Perkin Elmer TMA7 78
Tab. 11 Parametry nastavení vstřikovacího stroje 79
Tab. 12 Vlastnosti polyetylenu DOW HDPE 25055 E [18] *80*
Tab. 13 Vlastnosti polyetylenu DOW LDPE 780 E [18] *80*
Tab. 14 Skutečné hodnoty ozáření pro minimální dávku ozáření 15 kGy 81
Tab. 15 Skutečné hodnoty ozáření pro minimální dávku ozáření 33 kGy 82
Tab. 16 Naměřené hodnoty tahové zkoušky HDPE při teplotě 23°C 86
Tab. 17 Naměřené hodnoty tahové zkoušky LDPE při teplotě 23°C 88
Tab. 18 Naměřené hodnoty tahové zkoušky HDPE při zvýšené teplotě 100°C 90
Tab. 19 Naměřené hodnoty tahové zkoušky LDPE při zvýšené teplotě 100°C 92
Tab. 20 Naměřené hodnoty rázové zkoušky HDPE při 23°C 95
Tab. 21 Naměřené hodnoty rázové zkoušky LDPE při 23°C 96
Tab. 22 Naměřené hodnoty rázové zkoušky HDPE při -20°C 97
Tab. 23 Naměřené hodnoty rázové zkoušky LDPE při -20°C 98
Tab. 24 Tvrdost Shore D materiálu HDPE 99
Tab. 25 Tvrdost Shore D materiálu LDPE 100

SEZNAM PŘÍLOH

P1: Naměřené hodnoty tahové zkoušky HDPE při teplotě 23°C

P2: Naměřené hodnoty tahové zkoušky LDPE při teplotě 23°C

P3: Naměřené hodnoty tahové zkoušky HDPE při teplotě 100°C

P4: Naměřené hodnoty tahové zkoušky LDPE při teplotě 100°C

P5: Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti HDPE při teplotě 23°C

P6: Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti LDPE při teplotě 23°C

P7: Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti HDPE při teplotě -20°C

P8: Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti LDPE při teplotě -20°C

P9: Naměřené hodnoty tvrdosti Shore D

PŘÍLOHA P 1: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAHOVÉ ZKOUŠKY HDPE PŘI TEPLOTĚ 23°C

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
Neozářený	1	23,51	845,33	10,13	2,02
	2	23,12	820,03	10,66	2,13
	3	23,44	848,88	10,42	2,08
	4	23,4	845,92	10,56	2,11
	5	23,16	828,37	10,4	2,08
	6	22,82	811,03	10,94	2,19
	7	23,54	794,83	10,39	2,08
	8	23,58	844,18	10,58	2,12
	9	23,33	824,13	10,86	2,17
	10	23,35	844,93	10,61	2,12
15kGy	11	23,44	882,23	10,67	2,13
	12	23,66	880,79	9,82	1,96
	13	23,72	908,63	9,83	1,97
	14	21,12	857,16	10,19	2,03
	15	23,12	1019,6	9,07	1,81
	16	24,24	779,04	9,24	1,85
	17	24,17	1170,82	9,35	1,87
	18	23,83	1063,29	10,4	2,08
	19	22,83	1063,83	9,71	1,94
	20	23,01	1069,45	9,34	1,87
30kGy	21	23,93	914,7	10,1	2,02
	22	23,84	898,81	10,06	2,01
	23	23,69	1072,97	9,89	1,98
	24	23,98	898,39	10,28	2,06
	25	23,9	1100,17	9,4	1,88
	26	23,61	1061,91	9,93	1,98
	27	23,92	1153,85	9,65	1,93
	28	23,83	1141,79	9,8	1,96
	29	23,63	1115,67	9,95	1,99
	30	23,68	1186,57	10,03	2

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
45kGy	31	24,07	1115,48	9,45	1,89
	32	23,74	892,9	10,07	2,01
	33	23,43	883,03	10,28	2,05
	34	24,12	915,01	10,05	2,01
	35	23,78	1090,05	9,55	1,91
	36	23,88	1114,3	9,58	1,91
	37	23,66	1074,93	9,65	1,93
	38	23,98	1118,31	10,17	2,03
	39	23,89	1152,91	10,01	2
	40	23,84	1129,66	10,54	2,11
66kGy	41	23,33	1013,57	9,62	1,92
	42	23,34	1100,65	9,93	1,98
	43	23,56	1051,58	9,84	1,97
	44	23,88	1117,55	9,3	1,86
	45	23,56	1085,2	10,23	2,04
	46	23,58	1108,84	9,87	1,97
	47	23,84	1076,38	9,43	1,88
	48	23,79	1130,95	9,77	1,95
	49	23,8	1086,7	9,37	1,87
	50	23,76	1174,09	9,52	1,9
99kGy	51	23,88	1099,84	9,73	1,94
	52	23,45	1192,64	9,78	1,95
	53	24,21	1115,59	9,31	1,86
	54	23,67	1121,48	9,88	1,97
	55	23,86	1143,33	9,7	1,94
	56	24,14	1287,53	9,43	1,88
	57	23,94	1069,58	9,87	1,97
	58	24,12	1089,11	9,79	1,96
	59	24,03	1140,66	9,27	1,85
	60	24,07	1086,04	9,37	1,87

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
132kGy	61	24,91	1169,7	9,4	1,88
	62	24,02	1094,66	9,85	1,97
	63	24,58	1182,93	9,53	1,9
	64	24,01	1125,19	9,94	1,99
	65	24,24	1147,18	9,73	1,94
	66	24,34	1107,47	9,62	1,92
	67	23,88	1108,3	9,56	1,91
	68	23,88	1186,82	9,66	1,93
	69	24,3	1123,28	9,93	1,98
	70	24,08	1013,6	9,5	1,9
166kGy	71	24,23	1161,38	9,76	1,95
	72	24,42	1134,5	9,63	1,92
	73	24,29	1076,91	9,93	1,98
	74	24,19	1143,34	9,5	1,9
	75	23,7	1068,82	9,03	1,8
	76	24,03	1014,89	9,68	1,93
	77	23,93	1053,36	8,73	1,74
	78	24,01	1013,37	10,2	2,04
	79	23,84	953,55	10,36	2,07
	80	24,04	912,5	10,3	2,06
198kGy	81	24,44	951,89	10,12	2,02
	82	24,59	955	10,57	2,11
	83	24,5	956,76	10,07	2,01
	84	24,51	967,2	10,14	2,03
	85	24,67	964,51	10,31	2,06
	86	24,46	995,81	10,06	2,01
	87	24,48	945,57	10,06	2,01
	88	24,68	953,43	10,1	2,02
	89	24,55	972,99	10,32	2,06
	90	24,73	972,78	10,31	2,06

PŘÍLOHA P 2: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAHOVÉ ZKOUŠKY LDPE PŘI TEPLOTĚ 23°C

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
Neozářený	1	10,05	190,44	59,99	11,99
	2	9,84	192,80	59,82	11,96
	3	9,93	188,93	62,46	12,49
	4	10,03	195,24	58,87	11,77
	5	9,88	185,15	62,33	12,47
	6	10,04	192,30	61,53	12,31
	7	10,33	210,37	57,06	11,41
	8	10,03	189,92	63,43	12,69
	9	9,94	181,38	63,34	12,67
	10	9,88	183,68	63,44	12,69
15kGy	11	10,78	276,00	16,78	3,36
	12	9,81	189,45	61,22	12,25
	13	10,21	201,62	58,68	11,74
	14	10,48	224,90	53,63	10,72
	15	10,43	230,62	52,92	10,58
	16	10,57	238,67	54,11	10,81
	17	10,47	237,15	51,42	10,28
	18	10,53	224,13	52,27	10,45
	19	11,13	251,42	52,62	10,52
	20	11,05	250,86	51,49	10,29
30kGy	21	9,86	195,97	63,19	12,64
	22	9,87	196,64	62,28	12,46
	23	10,21	201,63	61,35	12,27
	24	11,17	248,97	52,25	10,45
	25	10,99	242,16	52,18	10,43
	26	11,03	240,19	52,87	10,57
	27	11,01	240,65	53,37	10,67
	28	11,08	246,06	53,43	10,68
	29	10,99	241,28	52,60	10,51
	30	10,93	244,26	51,63	10,32

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
45kGy	31	10,08	210,10	51,12	10,22
	32	9,76	196,85	47,06	9,41
	33	10,72	230,49	56,36	11,27
	34	10,75	232,54	53,20	10,64
	35	10,71	239,21	53,42	10,68
	36	10,73	242,35	53,02	10,60
	37	10,73	238,96	52,09	10,41
	38	10,70	241,64	53,29	10,65
	39	10,65	230,60	53,40	10,67
	40	10,77	238,12	52,89	10,57
66kGy	41	10,74	244,17	51,29	10,25
	42	10,81	244,70	53,09	10,61
	43	10,82	240,73	52,13	10,42
	44	10,78	233,27	52,27	10,45
	45	10,76	241,86	52,40	10,47
	46	10,74	236,28	54,03	10,80
	47	10,83	246,95	52,67	10,53
	48	10,76	239,18	52,66	10,53
	49	10,82	244,43	52,42	10,48
	50	10,77	236,63	53,20	10,63
99kGy	51	10,86	248,06	53,33	10,66
	52	10,93	246,38	52,83	10,56
	53	10,93	246,74	52,37	10,47
	54	10,85	243,08	52,17	10,43
	55	10,84	234,05	52,66	10,52
	56	10,81	234,43	52,63	10,52
	57	10,80	245,00	52,39	10,47
	58	10,79	256,76	51,25	10,24
	59	10,82	235,46	52,32	10,46
	60	10,80	246,38	53,14	10,63

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
132kGy	61	11,14	259,53	52,10	10,41
	62	11,14	244,51	52,67	10,53
	63	11,16	265,30	52,19	10,43
	64	11,13	262,04	51,31	10,26
	65	11,13	254,88	53,79	10,75
	66	11,07	258,86	52,43	10,48
	67	11,16	255,98	52,66	10,53
	68	11,09	259,02	52,08	10,41
	69	10,93	249,68	53,30	10,65
	70	10,95	249,92	51,63	10,32
166kGy	71	10,92	245,51	53,25	10,64
	72	10,93	250,18	53,30	10,66
	73	10,87	240,56	52,33	10,46
	74	10,89	248,51	52,87	10,57
	75	10,80	236,63	51,33	10,26
	76	10,91	239,52	53,58	10,71
	77	10,85	231,14	53,33	10,66
	78	10,80	236,98	51,59	10,31
	79	10,93	243,29	52,32	10,46
	80	10,86	244,53	52,13	10,42
198kGy	81	11,06	253,15	53,15	10,62
	82	11,05	251,76	53,83	10,76
	83	11,02	249,36	53,84	10,76
	84	10,95	247,64	52,39	10,47
	85	10,84	237,65	57,01	11,40
	86	10,83	248,09	54,72	10,94
	87	10,89	245,30	56,19	11,23
	88	10,81	235,41	52,42	10,48
	89	10,88	236,89	57,45	11,48
	90	10,90	240,96	55,23	11,04

PŘÍLOHA P 3: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAHOVÉ ZKOUŠKY HDPE PŘI TEPLOTĚ 100°C

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
Neozářený	1	6,06	124,49	39,84	7,98
	2	6,06	115,33	41,48	8,30
	3	6,08	114,76	39,48	7,91
	4	6,08	120,63	39,91	7,99
	5	6,15	129,95	40,27	8,06
	6	5,93	122,37	39,73	7,95
	7	5,86	120,31	40,00	8,00
	8	5,87	132,89	41,85	8,37
	9	5,89	114,06	40,35	8,07
	10	5,94	105,85	43,51	8,71
15kGy	11	6,71	144,67	37,64	7,53
	12	6,69	118,89	39,20	7,84
	13	6,85	151,63	37,98	7,60
	14	6,74	137,85	37,09	7,42
	15	6,75	121,34	39,64	7,93
	16	6,55	119,67	38,42	7,68
	17	6,62	123,81	39,50	7,90
	18	6,82	142,38	37,59	7,52
	19	6,68	131,66	39,59	7,92
	20	6,78	138,42	38,76	7,61
30kGy	21	6,79	114,59	38,69	7,74
	22	6,58	116,07	42,05	8,42
	23	6,39	107,56	42,31	8,46
	24	6,60	117,06	42,28	8,45
	25	6,58	105,99	40,20	8,05
	26	6,35	113,82	41,87	8,37
	27	6,21	114,61	43,04	8,62
	28	6,49	118,75	42,35	8,47
	29	6,55	116,14	41,30	8,26
	30	6,67	120,40	40,66	8,14

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
45kGy	31	6,69	114,51	43,20	8,64
	32	6,67	126,99	42,01	8,40
	33	6,59	112,46	42,56	8,52
	34	6,62	130,35	43,08	8,61
	35	6,56	114,40	42,38	8,48
	36	6,69	125,10	41,92	8,39
	37	6,65	123,33	43,38	8,68
	38	6,54	112,90	43,03	8,61
	39	6,64	113,72	43,10	8,62
	40	6,65	116,21	40,47	8,10
66kGy	41	6,21	119,35	42,68	8,54
	42	6,39	119,72	42,43	8,49
	43	6,61	126,83	42,23	8,45
	44	6,30	135,41	42,50	8,50
	45	6,70	142,60	42,28	8,46
	46	6,82	143,32	42,70	8,54
	47	6,93	153,20	42,89	8,58
	48	6,67	121,85	40,73	8,15
	49	6,54	120,96	41,46	8,29
	50	6,66	129,96	42,90	8,58
99kGy	51	6,66	124,33	42,80	8,56
	52	6,89	139,83	43,29	8,66
	53	6,74	128,01	42,98	8,60
	54	6,65	126,26	43,66	8,73
	55	6,66	137,63	42,79	8,56
	56	6,68	138,37	42,21	8,44
	57	6,70	138,31	41,93	8,39
	58	6,73	127,53	42,93	8,59
	59	6,85	143,32	42,57	8,52
	60	6,59	127,80	43,08	8,62

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
132kGy	61	6,78	129,34	42,05	8,41
	62	6,94	151,29	40,68	8,14
	63	6,89	140,55	41,55	8,31
	64	6,85	135,11	43,00	8,60
	65	6,92	134,57	41,68	8,34
	66	6,88	137,53	40,85	8,17
	67	6,73	134,05	41,81	8,36
	68	6,80	131,47	42,18	8,44
	69	6,90	131,85	42,26	8,45
	70	6,74	138,71	40,66	8,13
165kGy	71	6,79	145,45	41,95	8,39
	72	7,15	154,81	42,05	8,41
	73	6,86	133,52	42,56	8,51
	74	6,95	129,73	40,35	8,07
	75	7,06	124,05	42,18	8,44
	76	7,02	133,29	41,79	8,36
	77	6,88	125,49	42,40	8,48
	78	6,86	122,49	43,10	8,62
	79	6,89	127,12	42,64	8,53
	80	6,79	124,33	42,19	8,44
198kGy	81	6,99	125,93	42,34	8,47
	82	7,21	126,73	43,75	8,76
	83	6,99	129,90	42,78	8,55
	84	6,94	131,71	42,80	8,56
	85	7,02	145,30	42,73	8,55
	86	7,06	134,40	43,72	8,75
	87	6,99	137,83	43,15	8,63
	88	7,02	149,20	42,58	8,52
	89	6,99	119,47	43,51	8,70
	90	6,91	120,19	44,02	8,81

PŘÍLOHA P 4: NAMĚŘENÉ HODNOTY TAHOVÉ ZKOUŠKY LDPE PŘI TEPLOTĚ 100°C

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
Neozářený	1	1,53	23,15	27,13	5,45
	2	1,42	24,71	22,49	4,52
	3	1,65	20,3	29,43	5,97
	4	1,7	21,63	27,76	5,57
	5	1,51	21,16	25,72	5,17
	6	1,37	18,28	23,72	4,78
	7	1,28	24,98	22,49	4,51
	8	1,25	19,42	21,17	4,27
	9	1,26	25,96	20,42	4,1
	10	1,26	23,11	19,09	3,84
15kGy	11	1,58	18,39	34,9	7,02
	12	1,5	20,26	31,51	6,33
	13	1,66	24,87	37,4	7,49
	14	1,53	24,24	34,36	6,88
	15	1,55	22,89	36,36	7,29
	16	1,76	24,05	38,84	7,79
	17	1,8	21,07	34,88	7
	18	1,61	20,04	33,64	6,74
	19	1,56	19,84	35,24	7,08
	20	1,83	63,42	44,87	8,95
30kGy	21	1,75	20,45	53,34	10,69
	22	1,84	23,37	58,63	11,74
	23	1,71	18,33	53,94	10,82
	24	1,64	19,64	51,57	10,33
	25	1,68	18,6	53,02	10,63
	26	1,82	22,4	62,09	12,43
	27	1,88	24,88	60	12,02
	28	1,8	22,3	56,37	11,3
	29	1,83	19,15	58,28	11,68
	30	1,75	21,31	50,59	10,15

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
45kGy	31	1,79	24,89	71,49	14,32
	32	1,83	22,43	68,62	13,74
	33	1,85	18,8	73,38	14,71
	34	1,84	24,45	79,04	15,83
	35	1,81	23,2	70,96	14,22
	36	1,89	24,39	77,38	15,5
	37	2,04	23,5	73,37	14,7
	38	1,8	18,86	57,91	11,62
	39	1,93	20,29	69,68	13,97
	40	2,03	20,95	72,48	14,52
66kGy	41	1,89	21,31	77,89	15,6
	42	1,95	19,23	84,24	16,88
	43	1,9	18,79	84,19	16,87
	44	1,88	20,41	77,14	15,47
	45	1,97	21,44	87,65	17,56
	46	2,15	24,91	82,55	16,51
	47	2,02	19,3	82,47	16,52
	48	2,07	23,94	82,51	16,52
	49	1,86	25,21	73,14	14,65
	50	1,9	21,53	78,18	15,67
99kGy	51	2,04	18,15	102,91	20,61
	52	2,05	23,12	116,88	23,4
	53	1,99	21,34	114,28	22,89
	54	2,01	22,48	101,8	20,37
	55	2,04	21,92	94,72	18,97
	56	2,09	25,39	91,8	18,38
	57	2,06	23,68	97,2	19,46
	58	2,16	24,06	96,99	19,42
	59	2,02	21,53	91,9	18,41
	60	2,3	22,53	93,21	18,67

	Nr	σM	E-Modulus	ε σM	εFmax.
		[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
132kGy	61	2,18	23,49	70,92	14,22
	62	2,23	23,52	93,33	18,69
	63	2,23	20,16	99,79	19,98
	64	2,2	19,61	98,56	19,73
	65	2,22	23,24	97,54	19,53
	66	2,32	21,54	93,46	18,72
	67	2,33	23,35	107,19	21,46
	68	2,29	18,74	109,09	21,83
	69	2,32	20,61	112,42	22,51
	70	2,18	24,69	78,63	15,74
166kGy	71	2,25	24,96	107,95	21,6
	72	2,22	20,24	101,84	20,4
	73	2,18	20,17	108	21,62
	74	2,19	21,29	111,97	22,42
	75	2,21	18,77	121,86	24,4
	76	2,53	24,49	126,44	25,3
	77	2,23	21,11	102,59	20,54
	78	2,29	22,57	131,53	26,33
	79	2,33	23,66	117,82	23,57
	80	2,38	23,68	127,2	25,45
198kGy	81	2,34	24,15	131,86	26,4
	82	2,33	22,4	126,49	25,33
	83	2,27	19,12	119,16	23,84
	84	2,26	22,37	107,87	21,59
	85	2,16	23,42	103,03	20,63
	86	2,55	25,27	137,14	27,45
	87	2,23	24,87	102,77	20,58
	88	2,3	23,16	102,91	20,61
	89	2,43	24,19	112,18	22,44
	90	2,43	25,32	131,51	26,32

PŘÍLOHA P 5: NAMĚŘENÉ HODNOTY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI HDPE PŘI TEPLOTĚ 23°C

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
Neozářený	1	320,54	1,28	1,34	6,88	6,94
	2	321,35	1,24	1,30	6,95	6,99
	3	319,23	1,29	1,29	7,02	7,02
	4	326,81	1,25	1,31	6,94	6,94
	5	323,52	1,31	1,24	6,86	7,06
	6	332,24	1,28	1,33	7,01	7,12
	7	328,36	1,30	1,35	6,97	6,91
	8	324,42	1,35	1,29	6,83	6,87
	9	319,74	1,27	1,32	6,92	6,90
	10	324,53	1,29	1,34	7,05	7,03
15 kGy	1	324,63	1,34	1,36	6,92	7,29
	2	332,78	1,33	1,34	7,03	7,21
	3	330,77	1,30	1,32	7,02	7,26
	4	322,51	1,25	1,33	6,87	7,19
	5	325,93	1,27	1,32	7,20	7,26
	6	331,04	1,31	1,37	6,98	7,32
	7	318,87	1,28	1,34	7,05	7,27
	8	326,12	1,32	1,35	6,76	6,94
	9	327,47	1,35	1,39	7,04	7,36
	10	334,24	1,29	1,32	7,03	7,22
30 kGy	1	341,01	1,28	1,31	7,03	7,24
	2	343,71	0,60	0,72	1,71	7,12
	3	345,07	1,29	1,32	7,03	7,23
	4	340.88	1,28	1,41	7,08	7,22
	5	343,01	1,25	1,39	7,06	7,34
	6	346,12	1,32	1,36	7,08	7,25
	7	339,52	1,30	1,38	7,05	7,30
	8	337,20	1,24	1,42	7,13	7,21
	9	349,91	1,27	1,39	7,11	7,22
	10	342,44	1,33	1,37	7,05	7,17

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
45 kGy	1	336,91	1,35	1,36	7,16	7,42
	2	335,83	1,38	1,43	7,12	7,31
	3	347,18	1,38	1,42	7,08	7,27
	4	339,01	1,36	1,46	7,19	7,34
	5	344,39	1,39	1,41	7,13	7,32
	6	349,73	1,31	1,42	7,14	7,76
	7	344,82	1,33	1,48	7,28	7,41
	8	357,24	1,32	1,40	7,10	7,80
	9	335,59	1,36	1,39	7,34	7,55
	10	350,48	1,47	1,50	7,37	7,58
66 kGy	1	334,24	1,35	1,41	7,24	7,72
	2	336,95	1,40	1,48	7,30	7,98
	3	331,53	1,49	1,57	7,34	7,97
	4	332,89	1,35	1,46	7,17	8,21
	5	341,01	1,29	1,33	7,18	7,46
	6	338,30	1,27	1,30	7,07	7,30
	7	334,24	1,29	1,32	7,12	7,32
	8	334,24	1,30	1,34	7,13	7,51
	9	326,12	1,35	1,39	7,20	7,48
	10	327,47	1,34	1,45	7,02	7,92
99 kGy	1	355,89	0,64	1,43	1,72	7,98
	2	328,83	1,33	1,43	6,85	7,75
	3	399,19	1,77	1,82	12,40	12,95
	4	342,36	1,46	1,49	8,26	8,44
	5	341,01	1,47	1,50	8,10	8,35
	6	353,19	1,47	1,51	8,05	8,39
	7	339,65	1,34	1,37	7,63	7,83
	8	335,59	1,46	1,48	8,35	8,53
	9	350,48	1,35	1,40	7,86	8,27
	10	347,77	1,33	1,36	7,41	7,68

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
132 kGy	1	347,77	1,46	1,51	8,27	8,68
	2	335,59	1,34	1,46	7,30	8,36
	3	354,54	1,29	1,41	7,47	8,63
	4	343,71	1,35	1,49	7,43	8,76
	5	364,01	1,31	1,46	7,10	8,59
	6	346,42	1,47	1,50	8,23	8,48
	7	349,13	1,29	1,40	7,04	8,00
	8	361,30	1,53	1,61	8,43	9,24
	9	354,54	1,34	1,47	7,18	8,44
	10	342,36	1,45	1,48	8,32	8,50
165 kGy	1	362,66	1,51	1,54	8,95	9,15
	2	358,60	1,49	1,54	8,81	9,30
	3	350,48	1,46	1,51	8,23	8,61
	4	341,01	1,46	1,49	8,42	8,61
	5	351,83	1,47	1,49	8,75	8,94
	6	359,95	1,29	1,45	7,13	8,71
	7	353,19	1,35	1,43	8,09	8,78
	8	347,77	1,47	1,53	8,26	8,81
	9	368,07	1,28	1,41	7,27	8,56
	10	366,72	1,52	1,55	8,62	8,82
198 kGy	1	359,95	1,52	1,55	9,02	9,21
	2	351,83	1,50	1,53	8,73	8,93
	3	353,19	1,44	1,47	9,06	9,27
	4	365,36	1,49	1,54	8,95	9,34
	5	368,07	1,51	1,54	9,25	9,43
	6	357,24	1,30	1,48	7,18	9,05
	7	378,90	1,53	1,56	9,45	9,63
	8	351,83	1,46	1,52	8,40	8,91
	9	368,07	1,28	1,43	7,37	8,91
	10	355,89	1,41	1,47	8,79	9,35

PŘÍLOHA P 6: NAMĚŘENÉ HODNOTY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI LDPE PŘI TEPLOTĚ 23°C

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
Neozářený	1	237,07	7,20	7,38	42,16	45,89
	2	232,72	7,06	7,40	41,79	45,46
	3	139,87	7,21	7,49	42,16	45,93
	4	239,67	7,11	7,31	42,28	45,48
	5	233,04	7,13	7,29	41,22	45,73
	6	138,99	7,12	7,53	41,78	45,36
	7	239,67	7,09	7,44	42,10	45,44
	8	232,24	7,15	7,37	41,99	45,59
	9	237,08	7,18	7,51	42,23	45,50
	10	238,56	7,11	7,33	41,87	45,72
15 kGy	1	239,39	7,08	7,55	44,58	46,27
	2	241,31	7,03	7,57	44,92	46,02
	3	243,30	7,18	7,61	44,21	46,75
	4	242,75	7,29	7,68	44,20	45,81
	5	241,39	7,38	7,58	44,34	46,50
	6	244,89	7,41	7,64	44,48	46,72
	7	238,74	7,34	7,62	43,98	46,47
	8	238.40	7,25	7,57	44,33	46,12
	9	240.76	7,19	7,59	44,86	46,57
	10	242.02	7,21	7,60	44,01	45,87
30 kGy	1	243,58	7,46	7,60	43,28	43,75
	2	246,02	7,02	7,66	41,79	46,48
	3	243,58	7,05	7,69	42,29	46,61
	4	245,97	7,22	7,67	43,21	46,22
	5	243,58	7,36	7,81	42,64	43,72
	6	245,03	7,17	7,74	42,29	46,67
	7	243,17	7,39	7,65	41,81	46,21
	8	244,13	7,20	7,59	43,23	46,55
	9	243,21	7,45	7,74	42,97	46,72
	10	245,69	7,27	7,61	42,56	45,98

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
45 kGy	1	246,28	7,69	7,86	44,62	46,62
	2	243,58	7,37	7,67	44,55	45,53
	3	242,8	7,62	7,85	43,53	46,52
	4	243,5	7,38	7,88	43,78	45,96
	5	246,49	7,44	7,63	43,96	46,40
	6	242,23	7,68	7,71	43,01	46,59
	7	242,6	7,45	7,73	43,06	45,88
	8	244,3	7,65	7,85	44,15	46,26
	9	246,4	7,39	7,69	43,54	46,09
	10	245,7	7,51	7,71	43,63	46,38
66 kGy	1	235,46	7,39	7,81	42,20	45,33
	2	243,58	7,81	7,91	43,86	44,65
	3	240,87	7,25	7,72	43,19	46,65
	4	239,52	7,31	7,74	42,98	46,18
	5	240,87	7,23	7,74	42,41	46,22
	6	238,16	7,38	7,75	43,09	45,84
	7	238,16	7,31	7,76	42,88	46,16
	8	240,87	7,09	7,7	41,62	46,16
	9	242,22	7,02	7,73	41,07	46,42
	10	242,22	7,23	7,74	42,32	46,14
99 kGy	1	238,16	6,74	7,66	39,8	46,62
	2	234,1	7,3	7,78	41,93	45,42
	3	236,81	7,53	7,84	42,92	45,19
	4	239,52	6,96	7,73	40,4	46,12
	5	240,87	6,82	7,7	40,12	46,61
	6	239,52	6,78	7,73	39	46,06
	7	244,93	6,77	7,72	39,86	46,94
	8	243,58	7,23	7,69	43,45	46,88
	9	239,52	7,14	7,76	41,64	46,23
	10	244,93	6,92	7,66	41,67	47,24

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
132 kGy	1	246,28	7,31	7,85	41,33	45,46
	2	238,16	6,76	7,78	38,33	45,86
	3	240,87	6,97	7,76	40,43	46,31
	4	243,58	6,7	7,66	39,81	47,03
	5	238,16	6,84	7,72	39,87	46,31
	6	242,22	6,68	7,73	38,82	46,68
	7	239,52	6,86	7,73	39,64	46,08
	8	247,64	7,62	7,84	43,71	45,46
	9	240,87	6,91	7,77	40,17	46,54
	10	242,22	6,73	7,72	39,19	46,62
165 kGy	1	240,87	6,51	7,74	37,34	46,46
	2	238,16	6,59	7,76	37,34	45,95
	3	236,81	6,57	7,74	37,6	46,14
	4	242,22	7,41	7,89	41,34	44,95
	5	242,22	6,73	7,67	39,7	46,78
	6	248,99	6,3	7,59	37,99	47,86
	7	242,22	6,82	7,71	40,01	46,7
	8	243,58	6,68	7,7	38,83	46,46
	9	240,87	6,54	7,71	37,71	46,29
	10	239,52	6,61	7,73	38,07	46,32
198 kGy	1	240,87	6,57	7,70	38,14	46,51
	2	242,22	7,46	7,89	41,61	44,85
	3	242,22	7,16	7,87	39,80	45,15
	4	242,22	7,01	7,90	38,08	44,69
	5	244,93	6,96	7,68	41,32	46,75
	6	247,64	7,47	7,91	41,74	45,14
	7	246,28	6,73	7,85	37,09	45,63
	8	240,87	6,86	7,84	37,73	45,04
	9	251,70	6,95	7,62	42,78	48,04
	10	239,52	6,80	7,72	39,48	46,26

PŘÍLOHA P 7: NAMĚŘENÉ HODNOTY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI HDPE PŘI TEPLOTĚ -20°C

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
Neozářený	1	163,95	2,32	2,35	3,97	4,06
	2	161,78	1,26	1,69	1,89	3,37
	3	137,59	1,65	1,78	3,19	3,62
	4	191,04	1,65	1,73	3,10	3,40
	5	153,80	1,11	1,74	1,38	3,33
	6	138,32	1,52	1,55	3,29	3,37
	7	149,44	1,60	1,90	2,57	3,61
	8	133,00	1,28	1,35	2,30	2,52
	9	153,55	2,14	2,28	3,32	3,80
	10	128,65	1,60	1,66	2,94	3,11
15 kGy	1	212,80	2,29	2,37	4,01	4,26
	2	222,23	2,08	2,44	3,08	4,36
	3	150,17	1,73	1,80	3,49	3,71
	4	141,46	1,65	1,85	3,33	4,09
	5	233,84	1,86	1,91	1,62	1,79
	6	134,93	1,67	1,77	3,38	3,70
	7	165,16	1,66	1,96	2,85	3,89
	8	134,45	1,69	1,90	3,11	3,84
	9	148,72	2,10	2,46	2,94	4,30
	10	136,63	1,65	1,83	3,34	3,99
30 kGy	1	183,06	2,10	2,56	3,00	4,73
	2	179,19	1,82	2,06	3,43	4,34
	3	140,50	1,76	1,96	3,47	4,23
	4	157,18	1,76	1,99	3,43	4,29
	5	135,18	1,55	1,58	3,33	3,41
	6	137,11	1,66	1,84	3,29	3,93
	7	144,12	1,58	1,74	3,45	4,08
	8	147,99	1,62	1,74	3,52	3,96
	9	147,27	1,57	1,61	3,43	3,52
	10	136,14	1,67	1,75	3,45	3,72

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
45 kGy	1	162,98	1,68	2,13	2,87	4,54
	2	141,46	1,81	1,91	3,87	4,21
	3	140,74	1,68	1,90	3,39	4,24
	4	179,91	2,35	2,42	4,56	4,78
	5	145,09	1,62	1,65	3,70	3,78
	6	167,58	2,04	2,07	4,33	4,44
	7	146,30	1,77	1,86	3,93	4,24
	8	152,83	1,50	1,95	2,50	4,14
	9	143,88	1,71	1,78	3,64	3,85
	10	140,98	1,92	1,95	4,22	4,30
66 kGy	1	143,64	1,66	1,86	3,43	4,19
	2	177,74	1,71	1,95	3,08	3,97
	3	147,75	1,74	1,77	3,85	3,94
	4	157,18	2,21	2,25	4,51	4,65
	5	150,89	2,27	2,30	4,10	4,18
	6	156,94	2,07	2,23	3,95	4,60
	7	150,65	1,66	1,81	3,56	4,12
	8	140,50	1,59	1,88	2,80	3,91
	9	184,99	2,42	2,46	3,97	4,08
	10	148,96	1,90	1,99	4,34	4,72
99 kGy	1	151,38	1,86	1,92	4,04	4,25
	2	148,48	1,73	1,90	3,68	4,36
	3	155,97	1,75	1,79	4,05	4,13
	4	152,10	1,74	1,78	4,13	4,27
	5	140,50	1,89	1,93	4,09	4,18
	6	156,46	1,78	1,84	3,97	4,16
	7	207,48	2,00	2,25	3,45	4,41
	8	180,40	2,20	2,45	3,72	4,72
	9	162,50	2,05	2,09	4,20	4,30
	10	141,70	1,67	1,78	3,56	3,94

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Ab [kJ/m2]
132 kGy	1	157,91	1,76	1,79	4,42	4,51
	2	149,20	1,78	1,86	3,82	4,14
	3	180,88	2,34	2,88	2,81	4,85
	4	147,27	0,00	0,03	0,00	0,08
	5	144,85	1,83	1,91	3,79	4,10
	6	144,61	1,79	1,88	3,92	4,26
	7	148,72	1,58	1,74	3,51	4,14
	8	145,82	1,80	1,88	3,86	4,13
	9	187,41	2,15	2,19	4,26	4,39
	10	156,46	1,57	1,77	3,55	4,34
165 kGy	1	165,64	1,36	2,26	1,67	4,86
	2	214,73	2,60	3,17	2,85	5,02
	3	155,00	1,57	1,84	3,36	4,47
	4	224,89	1,68	2,32	2,26	4,66
	5	157,66	1,93	2,01	4,18	4,51
	6	149,20	1,78	1,87	3,79	4,13
	7	169,00	1,98	2,27	3,47	4,68
	8	163,23	1,93	2,05	3,74	4,22
	9	150,65	1,57	1,72	3,62	4,22
	10	183,54	2,11	2,67	2,79	4,92
198 kGy	1	152,34	1,79	1,82	4,20	4,30
	2	164,92	2,08	2,12	4,75	4,88
	3	150,65	1,76	1,80	4,42	4,50
	4	161,05	1,74	1,87	3,92	4,47
	5	144,36	1,64	1,67	4,10	4,18
	6	152,59	1,90	2,01	3,99	4,41
	7	156,21	1,87	1,91	4,37	4,47
	8	160,81	1,52	1,75	3,47	4,43
	9	159,36	1,62	1,83	3,76	4,69
	10	192,00	2,28	2,35	5,07	5,34

PŘÍLOHA P 8: NAMĚŘENÉ HODNOTY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI LDPE PŘI TEPLOTĚ -20°C

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
Neozářený	1	142,67	3,71	3,74	9,52	9,60
	2	151,38	5,34	5,37	15,70	15,78
	3	123,33	3,87	3,91	8,20	8,29
	4	160,08	6,82	6,85	23,40	23,49
	5	139,53	4,38	4,42	11,63	11,72
	6	129,13	3,59	3,63	8,06	8,13
	7	146,54	5,03	5,06	13,93	14,01
	8	145,82	4,95	4,98	13,25	13,33
	9	137,11	3,82	3,86	8,97	9,04
	10	134,69	5,74	5,77	14,87	14,95
15 kGy	1	147,02	5,28	5,31	14,08	14,16
	2	146,30	5,94	8,82	18,32	30,85
	3	144,85	5,09	5,12	14,55	14,63
	4	152,10	5,89	5,92	17,29	17,38
	5	148,72	5,13	5,16	14,21	14,29
	6	157,91	5,16	5,19	16,29	16,37
	7	148,48	4,92	4,95	13,83	13,91
	8	142,19	5,51	5,54	15,39	15,48
	9	145,09	5,22	5,26	14,01	14,09
	10	153,80	4,72	4,75	12,79	12,87
30 kGy	1	145,57	4,20	4,23	11,37	11,45
	2	124,29	4,29	4,32	9,71	9,78
	3	153,31	4,70	4,73	13,04	13,13
	4	147,02	4,71	4,74	12,14	12,22
	5	152,59	5,31	5,35	15,35	15,43
	6	153,55	4,76	4,79	14,11	14,20
	7	151,86	6,35	6,38	17,13	17,21
	8	136,38	4,07	4,11	9,68	9,76
	9	155,49	6,60	8,89	18,68	29,23
	10	149,20	6,54	8,87	19,20	29,61

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
45 kGy	1	147,51	6,63	8,83	20,91	30,73
	2	156,70	4,70	4,73	14,36	14,45
	3	148,72	4,68	4,71	12,25	12,33
	4	168,06	5,22	5,26	17,04	17,14
	5	152,34	4,49	4,52	13,00	13,08
	6	160,81	5,04	5,08	15,62	15,71
	7	147,27	6,59	8,83	20,75	30,60
	8	147,51	6,01	6,05	17,86	17,94
	9	154,28	4,80	4,84	13,05	13,13
	10	153,07	4,61	4,64	13,10	13,20
66 kGy	1	154,04	4,93	4,96	14,96	15,05
	2	153,55	4,82	4,86	14,44	14,54
	3	150,41	6,07	8,82	18,75	31,02
	4	143,16	5,66	8,84	16,38	29,92
	5	152,34	5,06	5,09	14,85	14,93
	6	145,09	5,88	5,91	15,08	15,16
	7	154,76	4,76	4,79	13,97	14,05
	8	151,62	4,63	4,66	11,96	12,04
	9	169,03	4,70	4,73	15,40	15,49
	10	155,97	4,00	4,03	11,68	11,76
99 kGy	1	154,52	4,93	4,96	13,79	13,88
	2	156,21	5,21	5,25	16,54	16,64
	3	154,04	4,96	5,00	14,10	14,18
	4	160,32	4,95	4,98	14,83	14,92
	5	162,02	4,28	4,31	12,05	12,13
	6	155,49	5,69	5,72	15,44	15,52
	7	161,29	4,66	4,69	13,95	14,04
	8	166,13	5,10	5,13	17,31	17,39
	9	164,92	4,03	4,06	12,19	12,27
	10	163,47	4,20	4,24	12,06	12,15

	Číslo měření	Fm [N]	Sm [mm]	Sb [mm]	Am [kJ/m2]	Av [kJ/m2]
132 kGy	1	159,60	3,83	3,87	10,55	10,65
	2	178,70	4,06	4,10	12,55	12,64
	3	157,91	3,36	3,39	8,85	8,94
	4	162,74	3,13	3,16	8,44	8,53
	5	161,53	3,18	3,21	8,40	8,49
	6	154,76	2,86	2,94	7,60	7,93
	7	155,49	3,37	3,40	8,99	9,07
	8	155,49	2,92	2,95	7,36	7,45
	9	168,55	3,19	3,23	8,95	9,06
	10	156,94	2,86	2,89	7,42	7,52
165 kGy	1	167,10	3,86	3,89	12,00	12,11
	2	162,50	3,97	4,05	10,40	10,69
	3	166,85	3,24	3,28	9,35	9,47
	4	168,55	3,39	3,42	8,98	9,07
	5	157,18	2,92	2,96	7,90	8,00
	6	184,26	3,12	3,15	9,11	9,22
	7	159,84	2,48	2,52	5,94	6,04
	8	158,87	2,44	2,51	4,66	4,88
	9	151,14	1,96	2,19	4,44	5,40
	10	156,21	2,26	2,33	5,54	5,81
198 kGy	1	149,68	2,24	2,47	4,99	5,94
	2	165,40	2,80	2,84	7,86	7,96
	3	159,12	2,30	2,41	5,33	5,73
	4	171,93	2,97	3,04	8,37	8,70
	5	180,15	3,01	3,04	8,70	8,80
	6	181,60	3,63	3,66	11,68	11,77
	7	167,82	2,38	2,46	5,95	6,28
	8	174,35	2,84	2,87	8,39	8,50
	9	168,55	3,11	3,20	8,55	8,93
	10	170,96	2,82	2,85	7,38	7,47

PŘÍLOHA P 9: NAMĚŘENÁ DATA TVRDOSTI SHORE D

Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu HDPE při teplotě 23°C

Měření	0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]
1	58,2	58,9	58,6	59,9	60,6	60,3	59,8	59,6	59,8
2	58,4	58,7	58,7	59,9	59,8	60,7	59,8	59,0	59,8
3	58,3	58,8	58,2	59,4	59,6	60,3	59,8	59,9	60,5
4	58,6	58,7	58,2	58,0	60,2	60,8	60,5	60,4	59,7
5	5,8	58,8	58,0	59,4	60,4	60,7	59,9	60,0	60,3
6	58,4	58,0	58,4	58,2	59,2	59,9	59,7	60,7	60,0
7	58,6	58,8	57,3	59,0	60,0	59,1	59,6	60,5	60,6
8	58,4	58,5	58,2	58,8	60,1	60,6	59,9	60,0	60,4
9	58,5	58,8	57,6	58,6	59,9	60,8	59,7	60,5	59,5
10	58,2	58,6	58,5	59,2	58,8	59,8	59,3	59,3	60,0

Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu HDPE při teplotě 23°C

Měření	0 kGy	15 kGy	30 kGy	45 kGy	66 kGy	99 kGy	132 kGy	165 kGy	198 kGy
	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]	[Shore D]
1	46,0	46,8	46,8	46,2	46,6	46,7	47,5	46,9	46,9
2	46,1	46,2	46,0	46,4	47,2	46,6	47,0	47,0	46,4
3	46,5	46,6	46,4	46,1	46,1	47,0	47,5	46,2	47,0
4	46,3	46,4	46,3	46,8	46,9	46,1	46,8	47,0	46,3
5	46,2	46,7	46,6	46,8	47,2	47,2	47,6	46,5	47,1
6	46,6	46,6	46,6	46,4	46,4	46,0	47,4	47,3	47,1
7	46,1	46,1	45,8	46,7	46,6	46,7	47,1	472,0	47,4
8	46,5	46,4	46,8	46,4	46,8	46,5	46,9	46,9	47,8
9	46,2	46,3	45,6	46,4	46,0	46,4	47,1	47,4	47,2
10	46,3	46,1	46,4	46,0	46,7	46,8	47,0	47,0	46,4