

# **Modifikace mechanických vlastností konstrukčních polymerů ionizujícím beta zářením**

Bc. Lukáš Staněk

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš Staněk**

Osobní číslo: **T13509**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Modifikace mechanických vlastností konstrukčních polymerů ionizujícím beta zářením**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerže na danou problematiku
2. Příprava zkušebních těles vstřikováním
3. Ozáření zkušebních těles beta zářením
4. Testování zkušebních těles
5. Vyhodnocení výsledků měření

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Martin Bednařík**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

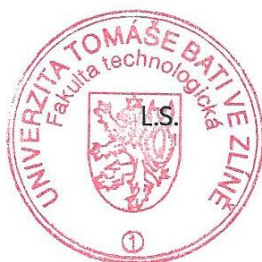
**30. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2015**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- 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 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> 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 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11. 5. 2015

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## ABSTRAKT

Hlavní snahou v plastovém průmyslu je nahrazovat drahé speciální polymery jako například LCP, PPS či PEI levnějšími variantami jako jsou PA, PE, PBT atd. Jednou z mnoha metod je radiační síťování plastů. Jedná se o velice efektivní způsob cílené modifikace vlastností polymerních materiálů, nejen mechanických, ale i tepelných či chemických.

Předložená diplomová práce pojednává o vlivu ionizujícího beta záření na mechanické vlastnosti konstrukčních polymerních materiálů. Předmětem výzkumu v této diplomové práci je sledování vlivu dvou dávek záření na tahové vlastnosti při různých teplotách. Zkoumanými materiály jsou polyamidy.

Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Vypracovaná literární studie v teoretické části v sedmi kapitolách popisuje aspekty polymerních materiálů, polyamidů, následně modifikace vlastností spolu s radiačním síťováním a tahovou zkouškou. Praktická část je věnována popisu vybraných polyamidů, použitých zařízení. Následně popisuje přípravu, testování zkušebních těles a na závěr jsou všechny získané výsledky vyhodnoceny a prodiskutovány.

*Klíčová slova:* radiační síťování, modifikace polymerních materiálů, polymery, polyamid, ionizující záření, beta záření, mechanické vlastnosti, tahová zkouška, modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu, poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu.

## **ABSTRACT**

The main effort in the plastic industry is to replace expensive special polymers such as LCP, PPS and PEI by cheaper options like PA, PE, PBT etc. One of the many methods of improvement of plastics is the radiation crosslinking. It's very effective way of targeted modification of the properties of polymer materials, not only mechanical, but also thermal or chemical properties.

This submitted master thesis deals with the influence of ionizing EB radiation on the mechanical properties of technical polymer materials. The object of research in this thesis is to monitoring the effect of two doses of radiation on the tensile properties at different temperatures. Polyamides are examined here.

The master thesis is divided into theoretical and practical part. The literary study in the theoretical part describes aspects of polymer materials, polyamides, followed by modifying of the properties along with radiation crosslinking and tensile testing in seven chapters. The practical part is devoted to a description of selected polyamides, used machines, the preparation and testing of specimens. In the end of the thesis, all the results are evaluated and discussed.

*Keywords:* radiation crosslinking, modification of polymer materials, polymers, polyamide, ionizing radiation, EB radiation, mechanical properties, tensile testing, Young's modulus, tensile strength, nominal strain at tensile strength.

## PODĚKOVÁNÍ

Zde na tomto místě bych chtěl velice rád touto cestou poděkovat všem, bez kterých by dokončení této práce nebylo možné.

Jako první chci poděkovat především vedoucímu práce Ing. Martinu Bednaříkovi za podporu, odborné vedení, cenné připomínky a čas, který mně věnoval při vypracovávání a řešení dané problematiky v této diplomové práci. Také bych chtěl zde poděkovat panu Ing. Zdeňkovi Holíkovi, Ph.D. za cenné rady při počátcích realizace samotného experimentu v praktické části.

Dále chci poděkovat panu Ing. Vladimíru Šumberovi za rady a technickou asistenci při zpracovávání materiálů a výrobě zkušebních těles.

Mé poděkování rovněž putuje ke společnosti BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG., která zajistila ozáření zkušebních těles. Konkrétně bych zde chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Daňkovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady a přátelský přístup, který věnoval mé osobě.

Taktéž děkuji doktorandovi Ing. Ladislavu Fojtlovi za jeho ochotu, cenné rady a připomínky, jež mě byly nápomocny při testování zkušebních těles.

Za pomoc a cenné rady při statistickém vyhodnocování naměřených dat jsem vděčný doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi.

Můj poslední a zároveň největší dík patří celé mé rodině za jejich lásku, trpělivost a podporu, kterou mě poskytovala po dobu mého studia.

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

Ve Zlíně 11. 5. 2015

.....

***Bc. Lukáš Staněk***



**“MULTOS FORTUNA LIBERAT POENA, METAU NEMINEM.”**

*(Osud osvobodí mnohé od trestu, ale od strachu nikoho.)*

**Seneca** (4 př. n. l. – 65 n. l.)

**“I’VE NEVER LET MY SCHOOL INTERFERE WITH MY EDUCATION.”**

*(Nikdy jsem nedopustil, aby škola stála v cestě mému vzdělání.)*

**Mark Twain** (1835 – 1910)

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>14</b>
<b>1 POLYMERY</b> .....	<b>15</b>
1.1    KLASIFIKACE POLYMERŮ .....	15
1.1.1    Makromolekulární struktura polymerů .....	17
1.1.2    Nadmolekulární struktura polymerů .....	18
1.2    MOLEKULOVÁ HMOTNOST POLYMERŮ .....	19
<b>2 POLYAMIDY</b> .....	<b>20</b>
2.1    CHARAKTERISTIKA POLYAMIDU 66 .....	20
2.2    VLASTNOSTI POLYAMIDŮ .....	22
2.2.1    Mechanické vlastnosti .....	22
2.2.2    Teplotní vlastnosti .....	22
2.2.3    Chemické vlastnosti .....	22
2.2.4    Povětrnostní stárnutí.....	23
2.3    NAVLHAVOST A SUŠENÍ POLYAMIDŮ .....	23
2.4    VYUŽITÍ POLYAMIDŮ .....	24
<b>3 MODIFIKACE POLYMERŮ</b> .....	<b>25</b>
3.1    FYZIKÁLNÍ MODIFIKACE .....	25
3.2    MECHANOCHEMICKÁ MODIFIKACE.....	25
3.3    CHEMICKÁ MODIFIKACE .....	26
<b>4 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ</b> .....	<b>27</b>
4.1    PROCES TVORBY SÍTĚ .....	27
4.2    DRUHY SÍŤOVÁNÍ .....	28
4.2.1    Síťování peroxidovými činidly .....	28
4.2.2    Síťování silany .....	29
4.2.3    Síťování ionizujícím zářením.....	29
4.3    POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD .....	29
4.4    SÍŤOVACÍ PROSTŘEDKY .....	30
4.4.1    Polyfunkční monomery .....	30
4.4.2    Aktivátory síťování .....	30
4.4.3    Urychlovače síťování .....	30
<b>5 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ</b> .....	<b>31</b>
5.1    ZÁKLADNÍ TYPY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	31
5.1.1    Záření beta.....	31
5.1.2    Záření gama.....	32
5.1.3    Rentgenové záření .....	32
5.2    POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ZÁŘENÍ.....	32
5.3    ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ .....	34
5.3.1    Urychlovače elektronů .....	34
5.4    INTERAKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ S POLYMERY.....	35
5.4.1    Reakce v materiálu .....	35
5.4.2    Interakce se zářením beta .....	36

5.4.3	Penetrace beta záření .....	37
5.4.4	Faktory ovlivňující ozařování polymerů .....	38
5.4.5	Vliv záření na polymery .....	39
5.5	MĚRNÉ JEDNOTKY PRO IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ .....	41
5.6	APLIKACE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ .....	41
<b>6</b>	<b>RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ .....</b>	<b>43</b>
6.1	PRINCIP SÍŤOVACÍHO PROCESU .....	44
6.2	TYPY SÍŤOVÁNÍ .....	44
6.3	RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ ZA POMOCÍ BETA ZÁŘENÍ.....	45
6.4	VLIV RADIAČNÍHO SÍŤOVÁNÍ NA POLYMERY.....	46
6.5	RADIAČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYAMIDŮ .....	47
6.6	VÝHODY A NEVÝHODY RADIAČNÍHO SÍŤOVÁNÍ .....	48
<b>7</b>	<b>MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....</b>	<b>49</b>
7.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	49
7.1.1	Zkušební tělesa.....	49
7.1.2	Testovací zařízení.....	51
7.1.3	Tahový diagram .....	51
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI.....</b>	<b>54</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>55</b>
<b>9</b>	<b>CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE.....</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>57</b>
10.1	SUŠÍCÍ ZAŘÍZENÍ ARBURG THERMOLIFT 100 – 2 .....	57
10.2	VSTŘIKOVACÍ STROJ ARBURG ALLROUNDER 470H 1000 – 400 .....	58
10.3	UNIVERZÁLNÍ ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL 1456.....	59
10.4	ELEKTRONOVÝ URYCHLOVAČ RHODOTRON 10 MeV – 200 kW .....	60
<b>11</b>	<b>CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH POLYMERŮ .....</b>	<b>61</b>
<b>12</b>	<b>PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....</b>	<b>62</b>
12.1	VSTŘIKOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	62
12.2	OZAŘOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	63
12.2.1	Gelová zkouška .....	65
<b>13</b>	<b>TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....</b>	<b>66</b>
13.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	66
13.1.1	Interpretace naměřených dat .....	66
13.1.2	Naměřené výsledky pro neozářené polyamidy .....	68
13.1.3	Naměřené výsledky pro polyamidy ozářené 66 kGy .....	75
13.1.4	Naměřené výsledky pro polyamidy ozářené 132 kGy .....	82
<b>14</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>89</b>
14.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	89
14.1.1	Modul pružnosti v tahu $E$ .....	89
14.1.2	Mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ .....	91
14.1.3	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ .....	93
14.2	REGRESNÍ ANALÝZA.....	95
14.2.1	Regresní analýza pro neozářené polyamidy.....	95

14.2.2	Regresní analýza pro polyamidy ozářené 66 kGy.....	98
14.2.3	Regresní analýza pro polyamidy ozářené 132 kGy.....	100
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>103</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>105</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>110</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>115</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>119</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>121</b>

## ÚVOD

Nedílnou součástí rozvoje lidské civilizace je hledání nových materiálů. Stále náročnější požadavky kladené na materiály s sebou přinášejí potřebu nových progresivních materiálů s unikátními a komplexními vlastnostmi. Je zřejmé, že každý materiál reaguje se svým okolím prostřednictvím svého povrchu. Jednou z možností jak změnit nejen povrchové vlastnosti materiálu a zvýšit tak jeho životnost, je modifikace materiálů pomocí radiačního záření.

Zmiňovaná modifikace polymerních materiálů, jejíž hlavním průkopníkem je považován profesor Dr. Arthur Charlesby, je známá už od 50. let minulého století. Tento způsob úpravy vlastností polymerů je významnou částí průmyslových aplikací technologie záření. Kromě ekonomických přínosů, ozařování polymerních materiálů přináší řadu technických a ekologických výhod. Jak už bylo uvedeno, již více než půl století zpracování polymerních materiálů, polymerních pryskyřic a dalších plastových komponentů pomocí ionizujícího záření prokázalo v komerčním měřítku, že se jedná o velmi účinný prostředek, vedoucí ke zlepšení fyzikálních vlastností a dalších aspektů u různých polymerů. Na tuto oblast už bylo napsáno mnoho prací a vědeckých článků, taktéž byla vyvinuta celá řada užitečných aplikací a patentů v automobilovém průmyslu, farmaceutickém průmyslu, zdravotnictví atd.

Nutno uznat, že oblast radiačního sítování polymerních materiálů je relativně mladá vědní oblast. Proto každý nový poznatek o vlivu záření může přispět k lepšímu pochopení dané problematiky a může tak rozšířit pole nových aplikací a vědních poznatků.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

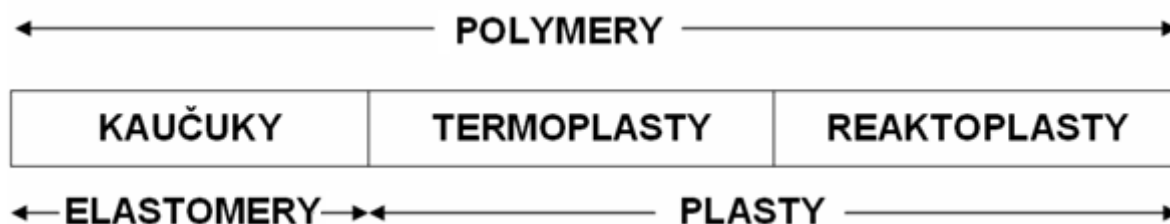
## 1 POLYMERY

Polymery jsou chemické látky neobvyklé šíře vlastností, obsahující ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru i jiných prvků. [6]

### 1.1 Klasifikace polymerů

Polymery je možno klasifikovat podle různých kritérií. Z hlediska teplotního chování lze polymery rozdělit na dvě základní skupiny [6, 30]:

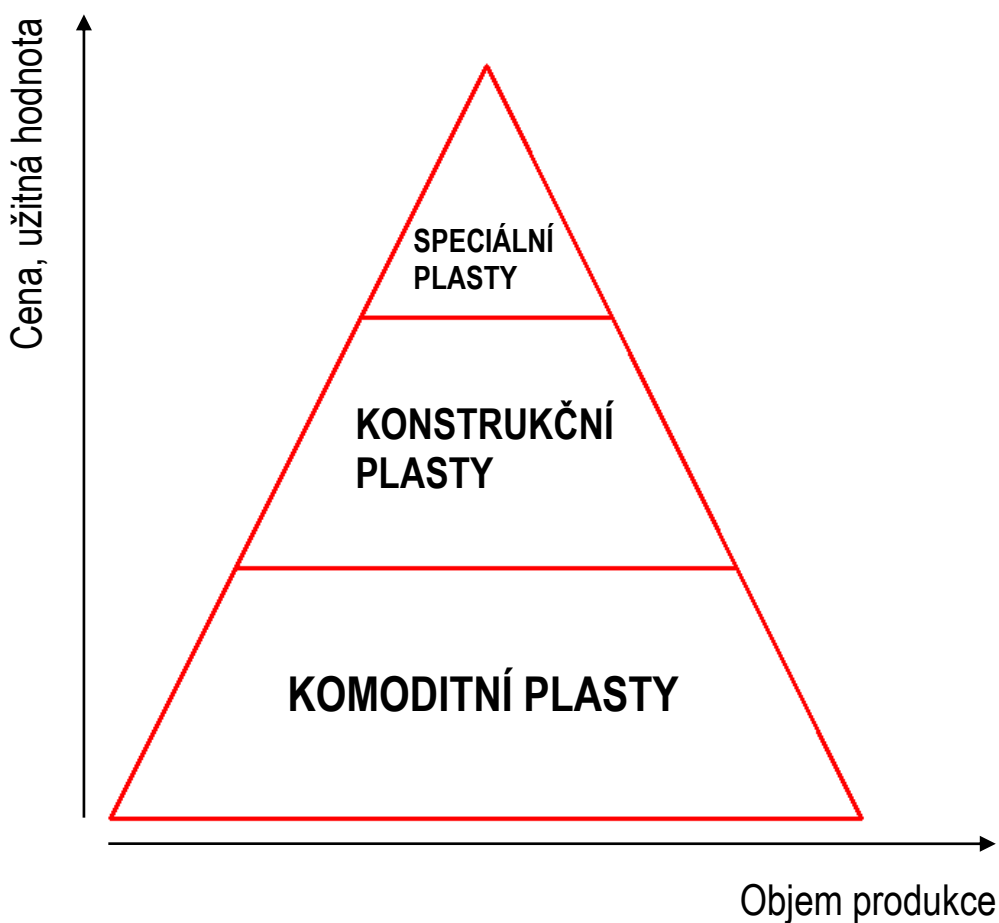
- **Elastomery** – elastomer je vysoce elastický polymer, který lze za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Nejpočetnější podmožinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryž.
- **Plasty** – jsou polymery za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. Plasty je možno dělit na:
  - **Termoplasty** – jedná se o polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, do stavu vysoce viskózních neneutonských kapalin, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Jedná se pouze o fyzikální proces.
  - **Reaktoplasty** – jedná se o polymerní materiály, dříve nazývané termosety, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci - prostorovému zesíťování struktury, k tzv. vytvrzování. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci).



Obrázek 1: Základní klasifikace polymerů [37]

Plasty mohou dále být děleny dle uplatnění na trhu na [31]:

- **Komoditní plasty** – tyto plasty se vyrábějí v největším množství, jejich výroba trvale roste, ale příliš nevynikají užitnými vlastnostmi. Zato jsou levné.
- **Konstrukční plasty** – mají výtečné mechanické vlastnosti i teplotní odolnost, ale proti komoditním plastům jsou mnohem dražší.
- **Speciální plasty** – jsou plasty s vynikající teplotní i chemickou odolností, dlouhou životností, popřípadě biologickou snášenlivostí. Jsou ovšem ze všech polymerních materiálů nejdražší.



Obrázek 2: Rozdělení polymerů dle aplikace [24]

Jiné dělení polymerů vychází ze způsobu jejich vzniku [35]:

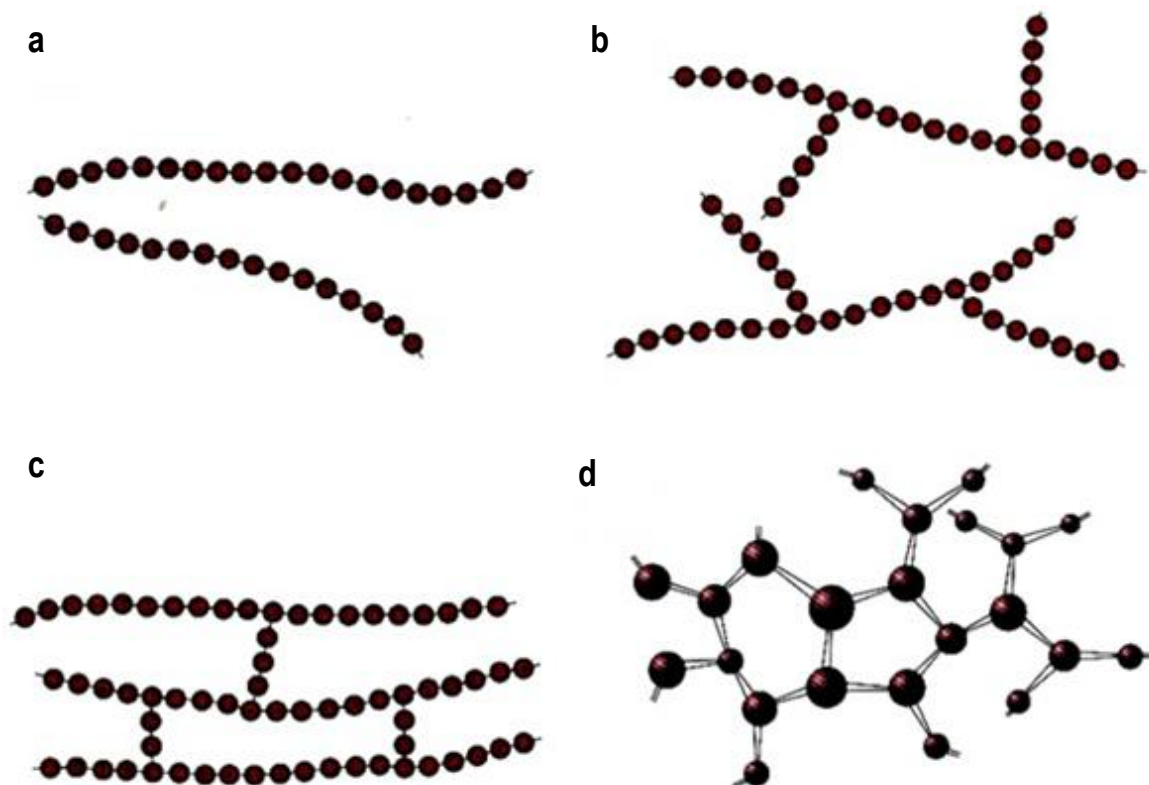
- **Přírodní polymery** – bílkoviny, škrob, celulóza, kaučuk a látky syntetické, ale přírodním polymerům podobné (celuloid, vulkánfibr, viskóza, umělé hedvábí, umělá rohovina apod.).
- **Syntetické polymery** – polyetylen, polyvinylchlorid, atd.



### 1.1.1 Makromolekulární struktura polymerů

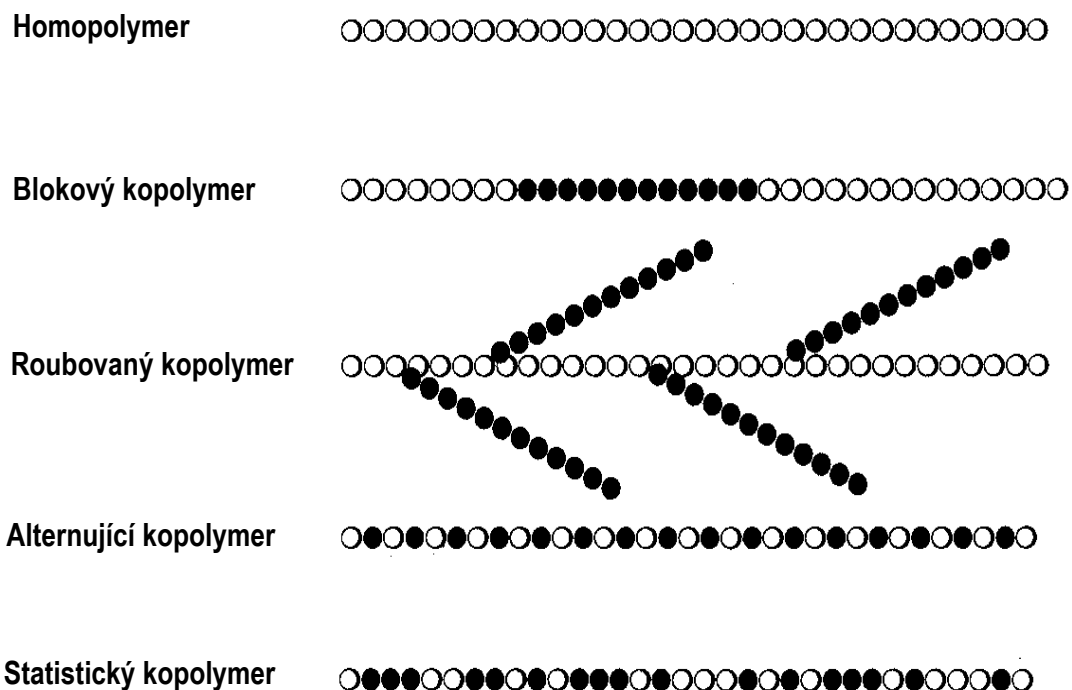
Polymery jsou tvořeny tzv. makromolekulami, složenými z jednotlivých opakujících se dílců – monomerů. Podle jejich seřazení se polymery dělí na [38]:

- **Lineární polymery** – v tomto případě jsou jednotlivé monomery seřazeny za sebou, takže vytvoří jednoduchý řetězec. Mezi těmito pružnými řetězci působí slabé Van der Waalsovy vazby.
- **Rozvětvené polymery** – jejich makromolekula se vyznačuje hlavním řetězcem, z něhož vystupují postranní “větve”. Celá struktura má menší hustotu, než lineární polymery.
- **Polymery se zkříženými články** – z obrázku 3c plyne, že sousední řetězce těchto polymerů jsou mezi sebou propojeny články, které jsou vázány pomocí silné kovalentní vazby.
- **Sítované polymery** – trojrozměrné monomery, které mají tři aktivní kovalentní vazby, vytvářejí trojrozměrnou síť.



Obrázek 3: Struktura polymerů (a – lineární polymer; b – rozvětvený polymer; c – polymer se zkříženými články; d – síťovaný polymer) [35]

Při použití dvou druhů jednotek (monomerů) A a B vznikají kopolymery s následujícím možným uspořádáním:



Obrázek 4: Struktura kopolymerů [39]

### 1.1.2 Nadmolekulární struktura polymerů

Polymerní látky, zejména lineární a málo větvené, jsou schopné částečné krystalizace, a to buď z velmi zředěných roztoků, nebo z taveniny. To znamená, že části makromolekul se spolu skládají a vytvářejí tak pravidelnou prostorovou strukturu. Skládají se do lamel, což jsou destičkové útvary s tloušťkou cca 10 nm a s plošnými rozměry v řádu mikrometrů. Lamely vyrůstají na sobě tzv. dendritickým způsobem a vytvářejí větší, téměř kulový útvar nazývaný sférolit. Částečná krystalizace znamená, že mezi krystalickou uspořádanou strukturou je i neuspořádaná amorfní struktura. [7]

Pokud makromolekuly nemají schopnost samovolného uspořádání při přechodu z kapalného do tuhého stavu (krystalizace) a řetězce zůstávají v nepravidelném tvaru, v tzv. statistickém klubku i v tuhém stavu, tj. jsou bez pravidelné nadmolekulární struktury, nazývají se amorfními. Všechny polymery ve stavu taveniny jsou amorfní. [7]

Jak u amorfních, tak u částečně krystalických polymerů jsou makromolekulární řetězce i jejich části v pevném stavu vázány k sobě mezimolekulárními silami. Na jejich intenzitě jsou závislé zejména mechanické vlastnosti příslušného polymeru. Dále platí, že účinek působení mezimolekulárních sil je nepřímě závislý na vzájemné vzdálenosti mole-

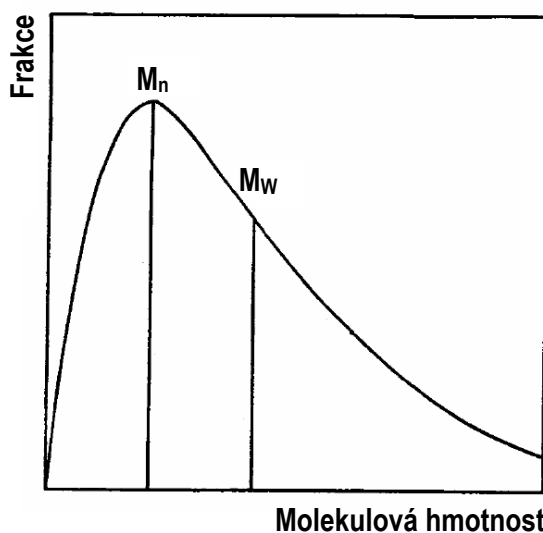
kul a ta je nejmenší u uspořádaných částí řetězců v krystalickém stavu. Krystalické polymery mají tedy vyšší a na teplotě méně závislé mechanické vlastnosti oproti polymerům amorfním. [7]

## 1.2 Molekulová hmotnost polymerů

Hodnota molekulové hmotnosti rozhoduje o chování polymeru za různých podmínek. Má-li mít makromolekulární látka nějakou mechanickou pevnost, musí se její polymerační stupeň, tj. počet merů v makromolekule, pohybovat minimálně v rozmezí od 40 do 80. [6]

Další odlišností struktury polymerů a nízkomolekulárních látek je skutečnost, že řetězce jedné a téže makromolekulární látky nejsou stejné, ale mají různou délku. [6]

Distribuce molekulových hmotností se stanovuje statisticky a z této distribuce lze vypočítat střední hodnotu molekulové hmotnosti. Distribuci molekulových hmotností lze názorně vyjádřit tzv. distribuční křivkou, což je závislost hmotnosti polymeru o dané velikosti makromolekuly (frakce) na délce makromolekulárního řetězce nebo jeho molekulové hmotnosti. [6]



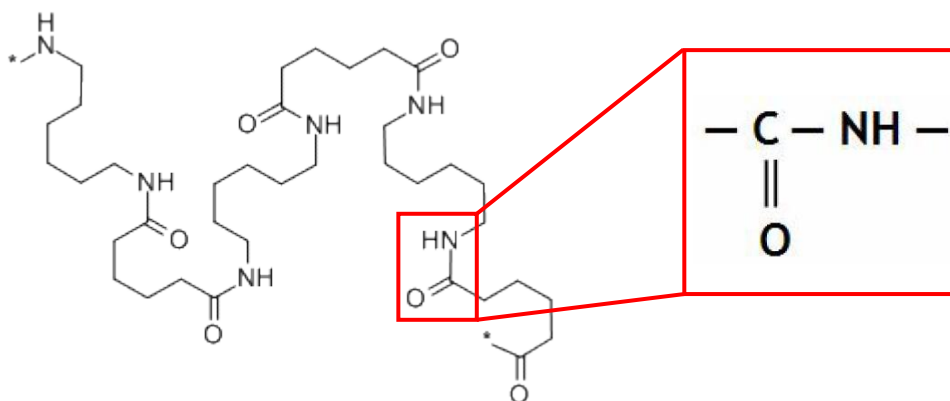
Obrázek 5: Příklad distribuční křivky [6]

**Pozn.:**  $M_n$  – číselně střední molekulová hmotnost;  $M_w$  – hmotnostně střední molekulová hmotnost

Poměr  $M_w / M_n$  se označuje jako index neuniformity, tj. míra distribuce molekulových hmotností. Jeho hodnoty pro běžné polymery se pohybují většinou kolem 1,5 až 2, ale mohou dosáhnout 20 i 50. [6]

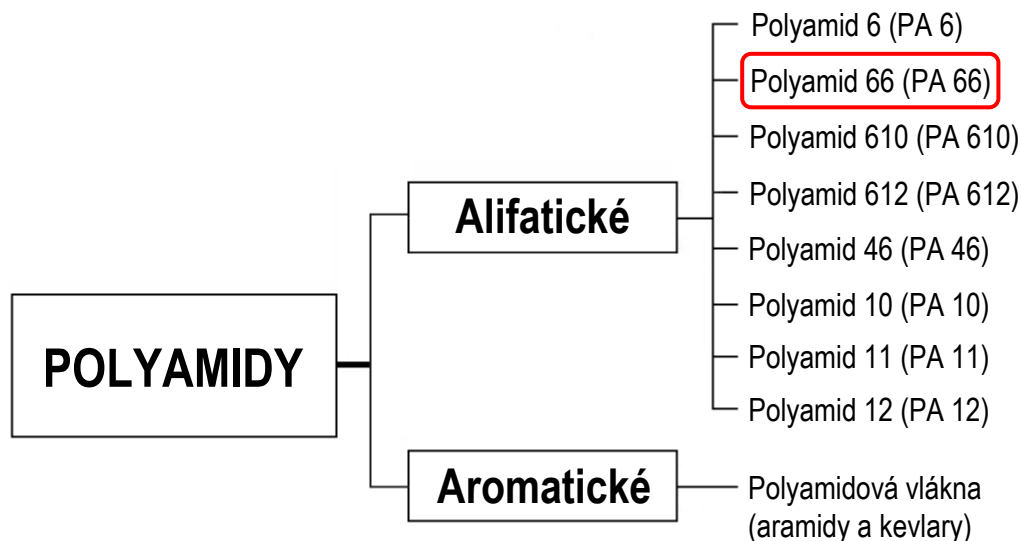
## 2 POLYAMIDY

Polyamidy jsou lineární polymery charakterizované hlavním polymerním řetězcem, v němž se pravidelně střídají skupiny  $-CO-NH-$  (Obrázek 6) s větším počtem skupin methylenových, tedy  $-CH_2-$ . Nejvýznamnější a nejrozšířenější jsou polyamidy s alifatickými řetězci, na trhu jsou však i typy aromatické [3, 6]



Obrázek 6: Vzorec PA 66 obsahující skupinu  $-CO-NH-$  [33]

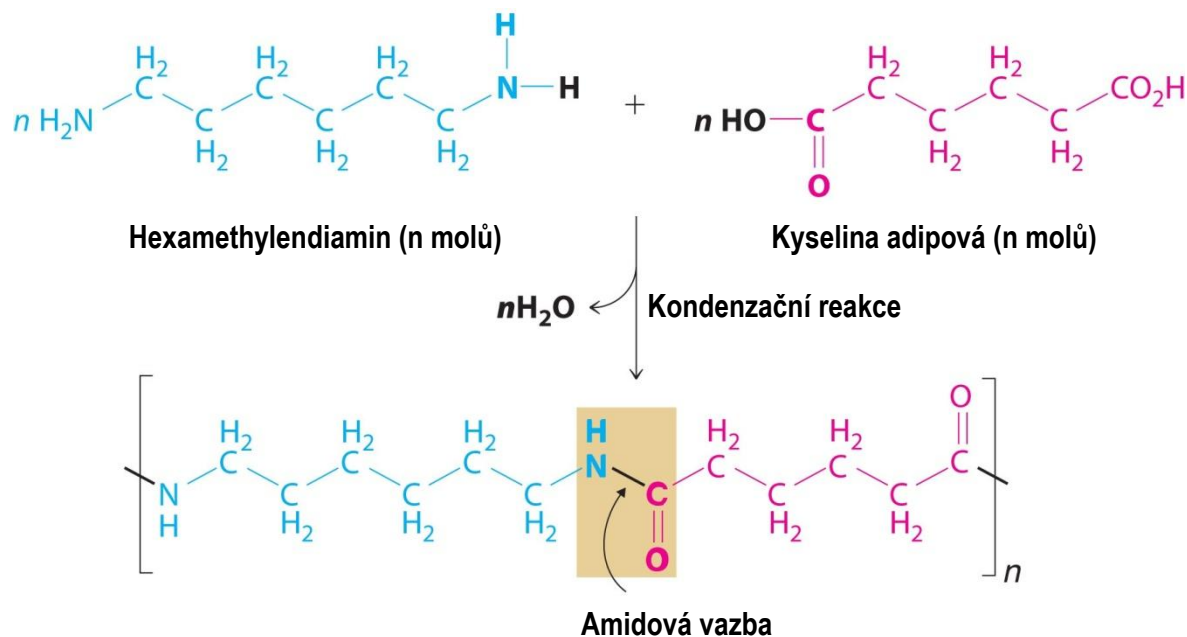
Podle struktury makromolekul lze polyamidy rozdělit na alifatické a aromatické, jak si lze povšimnout na obrázku 7.



Obrázek 7: Rozdělení polyamidů [3, 41]

### 2.1 Charakteristika polyamidu 66

Polyamid 66 je dnes nejrozšířenějším typem polyamidu vyráběného polykondenzací, zřejmě především pro nejsnadnější dostupnost obou surovin – hexamethyldiaminu a kyseliny adipové (viz Obrázek 8). [6]



Obrázek 8: Schéma vzniku PA 66 [43]

Prvním stupněm je vznik soli z ekvimorálních množství diaminu a kyseliny. V dalších se zahříváním roztoku soli v methanolu na 220 až 230 °C vytvoří napřed oligomer rozpustný ve vodě a po jejím odstranění za teplot 270 až 280 °C dojde k dokončení polykondenzace. Produkt se pak z autoklávu vytlačí dusíkem a zgranuluje. [6]

Tabulka 1: Charakteristické vlastnosti PA 66 [3, 6, 10]

Vlastnost		Hodnota
Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]		1130
Teplota tání [°C]		250 ÷ 260
Modul pružnosti v tahu [MPa]		1700
Teplotní odolnost [°C] (krátkodobě)		170 ÷ 200
Relativní permitivita (1 kHz)		4
Teplota skelného přechodu [°C]	zasucha	80
	zamokra	35
Specifické teplo [J.g <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]		1,7
Tepelná vodivost 10 <sup>-5</sup> [K <sup>-1</sup> ]		0,23 ÷ 0,25
Rozpustnost v HCOOH [%]		80

PA 66 má ve srovnání s PA 6 výhodu ve vyšší teplotě tání, poněkud vyšší pevnosti a nižší navlhavosti. PA 66 slouží v širokém měřítku jako konstrukční termoplast i jako materiál pro výrobu vláken a fólií. [41]

## 2.2 Vlastnosti polyamidů

Vlastnosti polyamidů se mění v závislosti na výchozích monomerech. Typické polyamidy jsou v tuhém stavu z 30 až 50 % krystalické a neprůhledné. Řetězové molekuly jsou propojovány vodíkovými můstky mezi amidovými skupinami. Jejich množství ovlivňuje krystalickou strukturu, bod tání,  $T_g$  a většinu dalších vlastností. [3]

### 2.2.1 Mechanické vlastnosti

Polyamidy se mezi ostatními termoplasty vyznačují vynikajícími mechanickými vlastnostmi, zvláště kombinací pevnosti a tvrdosti při vysoké houževnatosti a odolnosti vůči oděru. Tyto vlastnosti jsou určeny nejen jejich chemickou strukturou, ale také poměrem mezi krystalickou a amorfni fází polyamidu a obsahem vlhkosti. [10]

### 2.2.2 Teplotní vlastnosti

S obsahem krystalické fáze v polyamidech také úzce souvisí jejich termické chování. Teplota tání vzrůstá v zásadě s koncentrací amidových vazeb v makromolekulách polyamidů v důsledku četnějšího zastoupení vodíkových můstků. Vysoká teplota tání aromatických polyamidů je dána přítomností neohebných, tuhých aromatických konstitučních jednotek v makromolekulách těchto polymerů. Z alifatických polyamidů se termickému chování aromatických polyamidů blíží PA 46 právě pro nejvyšší obsah krystalické fáze. Podle typu je možné používat polyamidy (v závislosti na mechanickém namáhání materiálu při dané aplikaci) do teplot  $80 \div 120$  °C, krátkodobě i při teplotách kolem 140 °C, houževnaté typy až do  $-40$  °C. Plně aromatické PA jsou trvale teplotně odolné v rozmezí  $200 \div 250$  °C. [10]

### 2.2.3 Chemické vlastnosti

Nejslabším článkem polyamidových řetězců je amidová vazba  $-\text{CO}-\text{NH}-$ . Většina reakcí při působení chemikálií je spojena se štěpením této vazby. Odolnost polyamidů vůči kyselinám je velmi nízká. Polyamidy je možné ponechat v kontaktu se zředěnými roztoky slabých organických kyselin při pokojové teplotě anebo mírně zvýšené teplotě. V koncentrovaných roztocích slabých kyselin nebo ve zředěných silných kyselinách se polyamidy rozpouštějí a postupně se hydrolyticky odbourávají. [10]

Vůči alkáliím jsou polyamidy relativně odolné, báze sice štěpí amidovou vazbu (podobně jako kyseliny) především při zvýšených teplotách a koncentracích, ovšem rychlost jejich penetrace, a proto i rychlost hydrolyzy je relativně nízká. [10]

#### 2.2.4 Povětrnostní stárnutí

Polyamidy patří do skupiny polymerů s relativně nízkou odolností vůči povětrnostním vlivům. Vlivem přímého slunečního záření za současného působení vzdušného kyslíku a kyselých reagujících nečistot z ovzduší dochází již v průběhu několika málo měsíců k barevným změnám materiálu, vzniku trhlin a zhoršení mechanických vlastností. Mezi jednotlivými typy polyamidů nejsou technicky významné rozdíly v jejich chování vůči klimatickým vlivům. Bez přísad stabilizátorů nejsou polyamidy vhodné pro venkovní aplikace. [10]

### 2.3 Navlhavost a sušení polyamidů

Charakteristickou vlastností všech semikrystalických polyamidů je, že absorbují vlhkost, jsou-li skladovány na vzduchu nebo ponořeny do vody. Míra absorpce vody je převážně určována typem polyamidu, mírou krystalinity a okolní vlhkostí. Absorbovaná voda zmenšuje mezimolekulární síly, což znamená, že má změkčující účinek. Ten se prakticky projevuje ve snížení pevnosti, tvrdosti a tuhosti. [41]

Tabulka 2: Navlhavost u jednotlivých polyamidů [3]

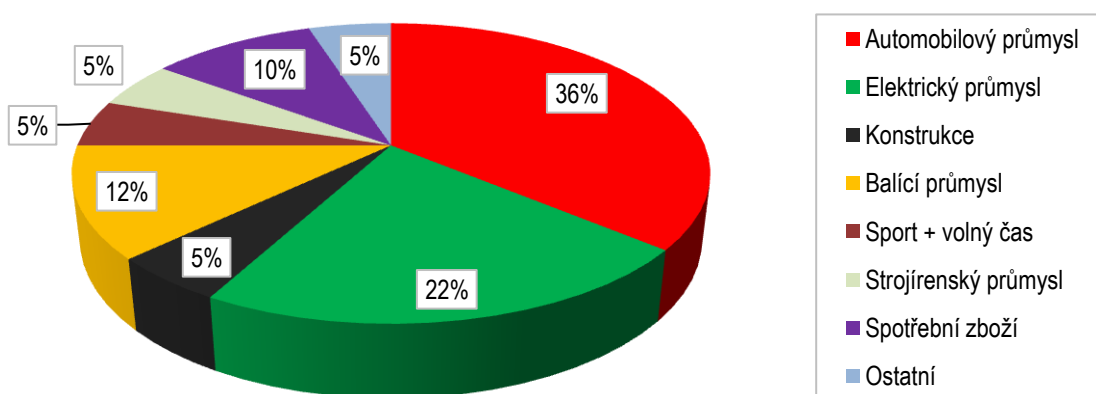
Typ polyamidu	Navlhavost [%]	
	při 23 °C	po uložení ve vodě
PA 6	3,0	10,0
PA 66	2,8	9,0
PA 610	1,4	3,3
PA 612	1,2	3,0
PA 11	0,8	1,8
PA 12	0,7	1,5

Při vstřikování polyamidů by měl být obsah vlhkosti v granulátu menší než 0,2 %. Doba sušení před vstřikováním závisí na vstupní vlhkosti granulátů, ale obvykle by neměla být menší než 4 hodiny při sušení suchým vzduchem. Dlouhá doba sušení se může projevit termooxidací sušeného granulátu, tj. jeho žloutnutím v přírodním provedení nebo změnou barevného odstínu u barevných materiálů. [7]

Někteří výrobci dodávají polyamid vysušený (zpravidla pod 0,1 % obsahu vody) v hermeticky uzavřených obalech. Pokud je obsah pytle použit najednou, není potřeba sušení, pokud zůstane materiál, je nutné jej sušit. [7]

## 2.4 Využití polyamidů

V posledních letech se světová spotřeba polyamidu zvyšovala tempem o cca 7 % za rok. Tento trend, zdá se, jen tak v budoucnu neskončí. Vysoká univerzálnost polymerů a možnost jejich úpravy za pomoci plniv, elastomerů a aditiv zajišťuje, že polyamidy budou i nadále mít vysoký inovační potenciál. Z konstrukčních plastů, co se týče objemu produkce, jsou tedy polyamidy číslo jedna. [44]



Obrázek 9: Spotřeba polyamidů v západní Evropě v roce 2003 [44]

V automobilovém průmyslu nahrazují polyamidy ocelové a hliníkové části vozů. Jsou lehké, nekorozivní a především samomazné, proto se uplatňují jako ozubená kola, ložiska a jiné součásti motorů. Polyamidy mají dobré elektrické vlastnosti, používají se v elektrických a elektronických zařízeních jako konektory, izolační systémy, elektrické rozvody, vypínače, zásuvky apod. [41]



### 3 MODIFIKACE POLYMERŮ

Modifikace polymerů je velmi široký pojem, který zahrnuje velký počet způsobů fyzikálních a chemických přeměn polymerů. Jedná se o záměrnou přeměnu polymerů prováděnou za účelem získání nového polymerního materiálu s odlišnými vlastnostmi. Vzhledem ke stále stoupajícím nárokům na vlastnosti polymerů v souvislosti se stále se rozšiřujícími oblastmi jejich použití, význam modifikace polymerů neustále vzrůstá. [6]

K získání modifikovaných polymerů se používá těchto základních způsobů [6]:

- *Fyzikální modifikace*
- *Mechanochemické modifikace*
- *Chemické modifikace*

#### 3.1 Fyzikální modifikace

Tento nejjednodušší způsob nabývá stále širšího uplatnění. Mezi fyzikální modifikace patří [6]:

- *Mechanické míchání dvou a více polymerů* – velmi jednoduchá metoda, mnohdy se získají směsi s vynikajícími mechanickými vlastnostmi.
- *Použití přísad* – přísady ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti polymeru. Makromolekulární látka plní funkci pojiva a určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti polymerů. Přísady mohou být organické nebo anorganické. Jsou to např. plniva, stabilizátory, maziva, barviva, změkčovadla, iniciátory, nadouvadla, tvrdidla, retardéry hoření, apod.

#### 3.2 Mechanochemická modifikace

K mechanochemické modifikaci polymerů dochází reakcí aktivních částí, které vznikají při mechanické destrukci makromolekulárních řetězců. Používá se při ní v podstatě dvou základních metod [6]:

- *Mechanické degradace směsi polymerů*
- *Mechanické degradace polymeru v přítomnosti monomeru*

V obou případech probíhá současně řada reakcí, které vedou mimo jiné ke vzniku roubovaných nebo blokových kopolymerů, lišících se strukturou a délkou bloků. Výsledný produkt není ze strukturálního hlediska ani zdaleka jednotný a jednoznačně definovatelný.

Pro tento druh kopolymeru, obsahujícího různé zastoupení uvedených struktur spolu s homopolymery, byl zaveden termín “interpolymer”. [6]

### 3.3 Chemická modifikace

Chemickou modifikací polymerů se rozumí úmyslná přeměna chemické struktury působením účinných chemických látek nebo reakčních podmínek. Z hlediska délky makromolekulárních řetězců (střední molekulové hmotnosti) lze chemické reakce polymerů rozdělit na [6, 8]:

- ***Polymeranalogické přeměny*** – reakce probíhající prakticky za zachování střední molekulové hmotnosti polymeru. Patří sem např. halogenace, esterifikace, hydrolýza atd.
- ***Reakce, při nichž se polymerační stupeň mění***
  - Zvětšováním velikosti makromolekul – např. roubováním nebo síťováním.
  - Snižováním velikosti makromolekul – degradací nebo depolymerací.

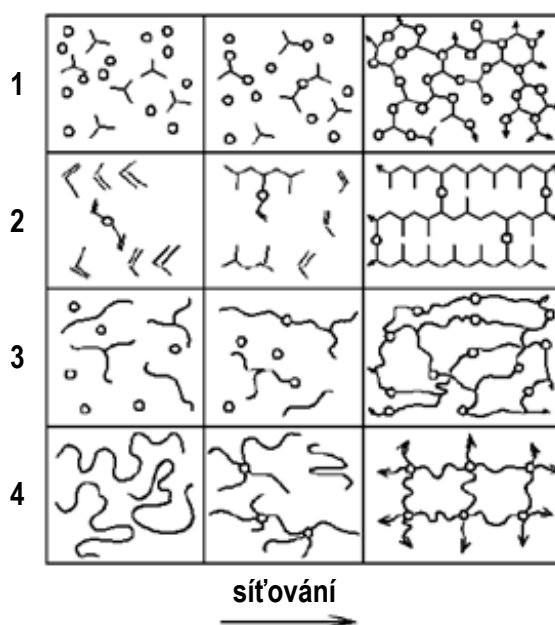
## 4 SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ

Pod pojmem síťované polymery se rozumí makromolekulární látky, jejichž řetězce molekul jsou vzájemně spojeny chemickými vazbami tak, že vytvářejí trojrozměrnou prostorovou síť. Vznikají buď sesíťováním lineárního nebo rozvětveného polymeru, nebo vzájemnou reakcí dvou nebo více monomerů. Během síťování dochází k výrazným změnám vlastností polymerů. Procesem síťování se z termoplastických materiálů stávají termosety. [6, 28]

Sesíťované polymery nejsou tedy rozpustné v rozpouštědlech i když se v nich v lineárním stavu výborně rozpouštěly, většinou jimi botnají a jsou netavitelné. Do určitého, velmi malého stupně sesíťování si zachovávají jistou tepelnou tvarovatelnost, která však klesá se vzrůstající koncentrací příčných vazeb. [6]

### 4.1 Proces tvorby sítě

Chemickým spojováním dvoufunkčních jednotek vznikají lineární polymery. Je-li některá ze složek více než dvoufunkční, dochází v průběhu reakce k větvení a později i ke vzniku nekonečné trojrozměrné struktury, prostorové sítě, gelu. [2]



Obrázek 10: Schéma vzniku sítě [2]

**Pozn.:** 1 – Polykondenzace nebo polyadice nízkomolekulárních látek; 2 – Síťovací polymerace; 3 – Spojování reaktivně končených předpolymerů, zpravidla polyadiční reakcí; 4 – Nahodilé síťování vysokomolekulárních polymerů

Zesíťované polymery mohou vznikat těmito procesy [2]:

- Postupnými reakcemi nízkomolekulárních látek. Polyadičními či polykondenzačními reakcemi vznikají např. epoxidové a fenolové pryskyřice. Jejich síť se dokončuje ve vytvrzovacím kroku.
- Polymerační řetězovou reakcí, síťovací polymerací.
- Spojováním reaktivních konců nízkomolekulárních polymerů o molární hmotnosti řádu  $10^3 \text{ g.mol}^{-1}$ . Proces vzniku sítě je formálně podobný jako v případě 1 (viz obrázek 10).
- Zavedením příčných vazeb do vysokomolekulárních polymerů.

Ve všech čtyřech případech probíhají při síťování tyto děje [2]:

- V první fázi vzrůstají rozměry molekul i polydisperzita systému.
- Při určitém stupni reakce dospěje systém do bodu gelace, ve kterém molekulová hmotnost vzroste nad všechny meze a v systému se objeví první stopy nekonečné struktury, gelu.
- Po překročení bodu gelace se systém skládá ze dvou částí: z nekonečné struktury, gelu a z molekul konečné velikosti, solu, který lze od gelu oddělit extrakcí; gel je nerozpustný, v rozpouštědle pouze botná.
- V dalším průběhu reakce obsah solu klesá a jeho molekulová hmotnost i polydisperzita se zmenšují.
- V gelu vznikají tzv. elasticky aktivní řetězce sítě, které při deformaci nesou napětí a určují velikost modulu pružnosti gelu a jeho rovnovážný stupeň nabotnění.

## 4.2 Druhy síťování

V dnešní době se při síťování polymerů využívají tyto tři základní metody. Existuje také metoda vulkanizace sírou, která se využívá u kaučukových směsí. [28]

### 4.2.1 Síťování peroxidovými činidly

Při síťování pomocí peroxidů se obvykle používají vyšší teploty (polymer se při ní taví). V prvním kroku se pomocí tepla rozloží peroxid na volné radikály, které dále reagují s polymerním řetězcem. Nevýhodou tohoto síťování je jeho nízká účinnost (vedlejší reakce peroxidů a volných radikálů) a také nutnost použití velkého množství poměrně drahých peroxidů. [28]

#### 4.2.2 Síťování silany

Peroxid je zde použit na vytvoření primárního radikálu. Molekuly silanu se poté naroubují na tyto primární radikály. Pro optimální rychlost reakce se využívá zvýšené teploty a přítomnosti katalyzátoru. Výhodou síťování silany je, že proces výroby síťovaného materiálu se provádí na běžných extruzních strojích. [28]

#### 4.2.3 Síťování ionizujícím zářením

U tohoto síťování je základní předpoklad, že materiál při působení ionizujícího záření převážně síťuje a nedegraduje. Zkušenost s radiačním síťováním jsou především u materiálů na bázi PE, TPU, PUR, PA a PVC. Tato metoda se provádí již na hotovém výrobku bez potřeby zvýšení teploty při provozu. [28]

Více je tato metoda popsána v kapitolách 5 a 6.

### 4.3 Porovnání jednotlivých metod

Tabulka 3 uvádí určité technologické aspekty těchto metod síťování. Každá z těchto metod má svá úskalí. Peroxidová činidla a silany nejsou vhodné pro tenké materiály, jsou vhodné pro trubky a kabely vysokých průměrů. Na druhou stranu, radiační způsob nelze aplikovat na materiály tlustší než je dosah průniku elektronových svazků. [5]

Tabulka 3: Technologické porovnání síťovacích metod u polymerů [5]

Charakteristika		Typ síťování		
		Záření	Peroxid	Silan
Plasty	PE	O	O	O
	PP	O	Δ	Δ
	PVC	O	Δ	Δ
	Konstrukční plasty	O	X	X
	PTFE	O	X	X
	Fluoropolymer	O	O	Δ
Cena směsi		Nízká	Střední	Vysoká
Skladování směsi		Dlouhé	Střední	Krátké
Tloušťka produktu		< 10 cm	> 0,3 mm	> 0,3 mm
Rychlost síťování		Vysoká	Nízká	Nízká
Stupeň síťování		Střední	Vysoký	Nízký

**Pozn.:** O – praktické využití, Δ – technicky možné, ale ne praktický příklad, X – obtížná aplikace

## 4.4 Síťovací prostředky

Do této skupiny přísad patří látky, které se účastní síťovacích reakcí, tj. spojování lineárních nebo rozvětvených makromolekul řetězců příčnými vazbami do struktury prostorové sítě. [6]

### 4.4.1 Polyfunkční monomery

K dosažení lepší efektivity radiačního síťování (kapitola 6), je u některých polymerů (např. polyamidů), nutný přídavek malého množství polyfunkčních monomerů. Dodatečné zesílení můžou podpořit následující polyfunkční monomery [8]:

- *Tetrametylolmetantetraakrylát (TMMTA)*
- *Trimetylolpropantriakrylát (TMPTA)*
- *Ttriallylkyanurát (TAC)*
- *Triallysokyanurát (TAIC)*
- *Trimetylolpropantrimetakrylát (TMPTMA)*

Jedná se o nízkomolekulární, převážně troj-funkční aditiva. Tyto přísady reagují na záření rozdílně, tzn. je možné tedy dosáhnout různých stupňů zesílení při různých dávkách záření. [8]

### 4.4.2 Aktivátory síťování

Pod tento pojem jsou shrnovány přísady, které aktivují síťovací reakci, tj. zmenšují její aktivační energii. To se projevuje menší závislostí rychlosti síťování na teplotě. Druhou význačnou vlastností aktivátorů síťování je jejich neméně významný vliv na výsledek síťovací reakce, jejíž účinnost podstatně zvětšují, tj. v jejich přítomnosti vznikne z určitého látkového množství polyfunkčních monomerů více příčných vazeb (hustší síť) než v jejich nepřítomnosti. Pro radiační síťování se pro aktivátory síťování používá označení senzibilizátory. [6]

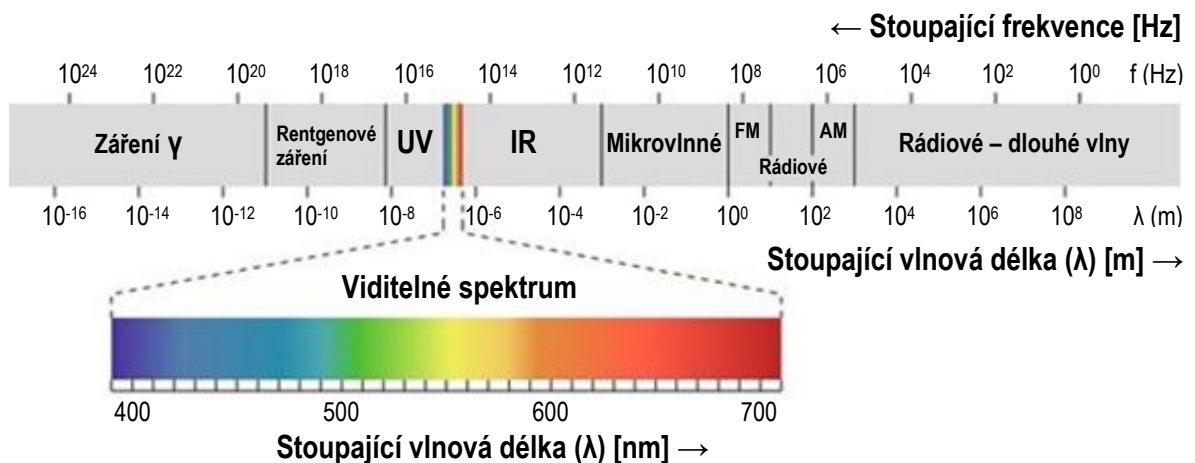
### 4.4.3 Urychlovače síťování

Síťování polymeru probíhá někdy velmi pomalu, což je v technologické praxi ekonomicky neúnosné. Proto se síťovací reakce v těchto případech urychlují látkami, které se z pochopitelných důvodů nazývají urychlovače. [6]

## 5 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ

Ionizujícím zářením se rozumí záření způsobující ionizaci látky, kterou prochází, a to jednak přímo, jednak prostřednictvím sekundárního záření. Ionizující záření lze dále dělit na [14]:

- **Přímo ionizující záření** – je tvořeno nabitými částicemi (elektrony, pozitrony, protony, částicemi alfa apod.), jejich kinetická energie je dostatečně velká k tomu, aby vyvolala ionizaci.
- **Nepřímo ionizující záření** – je tvořeno nenabitými částicemi (neutrony, fotony), které vzhledem k tomu, že nemají elektrický náboj, nemohou ionizovat. Procházejí-li nenabitě částice látkou, pak interakci s atomy této látky uvolňují v ní nabitě částice nebo způsobí jadernou přeměnu provázenou emisí přímo ionizujícího záření.



Obrázek 11: Elektromagnetické spektrum záření [42]

Z jiného hlediska lze ionizující záření rozdělit na korpuskulární a elektromagnetické záření. Korpuskulární záření je záření proudu částic s nenulovou klidovou hmotností. Jedná se o záření  $\alpha$ ,  $\beta$ , jaderné a neutronové záření. Elektromagnetické záření má tvar příčné vlny charakterizované dvěma na sebe navzájem kolmými vektory – intenzitou elektrického pole a magnetickou indukcí. [14]

### 5.1 Základní typy ionizujícího záření

#### 5.1.1 Záření beta

Záření beta je tvořeno urychlenými elektrony. Vzniká při přeměně mnoha přírodních i umělých radionuklidů. V porovnání se zářením alfa jsou částice beta mnohem lehčí, po-

hybují se při stejné energii podstatně rychleji. Při průchodu prostředím daleko méně ionizují. S tím souvisí i výrazně větší dosah záření beta – ve vzduchu činí až několik metrů, ve vodě nebo tkáni jednotky až desítky milimetrů a u těžších materiálů desetiny až jednotky milimetrů. [14]

### 5.1.2 Záření gama

Záření gama je elektromagnetické záření obvykle jaderného původu. Záření gama obsahuje emitované fotony. Při průchodu prostředím uvolňuje záření gama elektricky nabitě částice a předává jim energii dostatečnou k tomu, aby byly schopny ionizovat. Jedná se tedy o nepřímo ionizující záření. Vzhledem k velice krátkým vlnovým délkám má záření  $\gamma$  velkou energii a tudíž velkou pronikavost. U přirozeně radioaktivních prvků velice často doprovází přechod excitovaného jádra do stabilnějšího stavu při přeměně  $\alpha$  a  $\beta$ . [14, 16]

Protože fotony záření gama mají stejnou fyzikální podstatu jako jiné druhy elektromagnetického záření, jejich rychlost se rovná rychlosti světla. Mezi nejčastěji používané radioaktivní izotopy v lékařské a průmyslové praxi patří Kobalt ( $^{60}\text{Co}$ ), Cesium ( $^{137}\text{Cs}$ ) a Iridium ( $^{192}\text{Ir}$ ). Poločas rozpadu u  $^{60}\text{Co}$  je 5,3 roku, u  $^{137}\text{Cs}$  30 let a pro  $^{192}\text{Ir}$  74 dní. [12, 16]

### 5.1.3 Rentgenové záření

Rentgenové záření je elektromagnetické záření, jehož vlnové délky leží v intervalu  $10^{-8}$  až  $10^{-12}$  m. Vzniká při přeměně energie rychle se pohybujících elektronů, které dopadají na povrch kovové elektrody, na energii elektromagnetického záření. Podle vlnové délky se rozlišuje měkké rentgenové záření, které má větší vlnovou délku, a tvrdé rentgenové záření, jehož vlastnosti se blíží záření  $\gamma$ . [13]

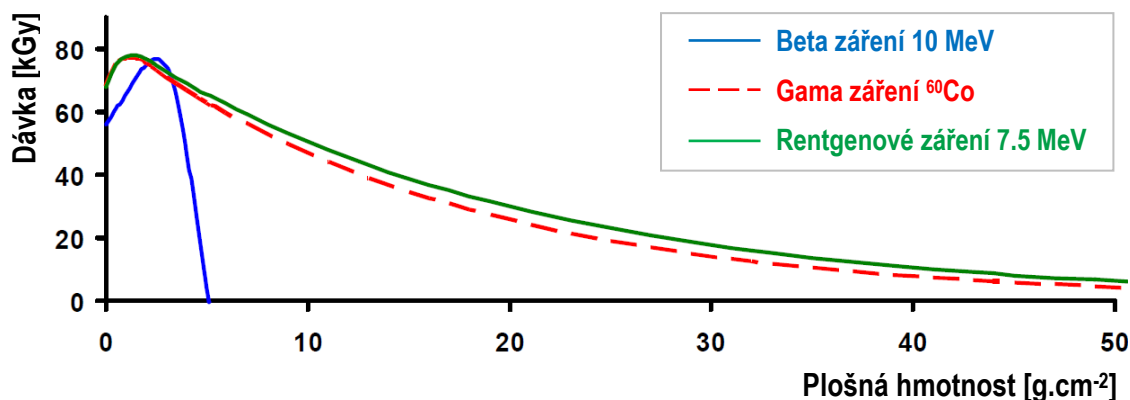
Vlnová délka rentgenového záření určuje jeho základní vlastnosti: schopnost pronikat látkami, působit na fotografickou emulzi, vyvolat ionizaci látky, kterou záření prochází. Čím kratší je vlnová délka rentgenového záření, tím lépe záření proniká látkami a má větší ionizační účinky. Jako zdroj rentgenového záření se v praxi používá speciální trubice – rentgenka. [13]

## 5.2 Porovnání jednotlivých záření

Hlavní rozdíl mezi těmito druhy záření spočívá ve schopnosti pronikání materiálem a intenzitě dávky ozáření. V zařízeních s urychlovači elektronů se pracuje s vysokými intenzitami dávek ozáření, ale s omezenou hloubkou pronikání závislou na energii. Naproti to-



mu záření gama má vysokou schopnost penetrace při relativně nízké intenzitě dávky ozáření. Výkon dávky ozáření je závislý na instalované celkové aktivitě gama zařízení. Z hlediska technického použití to znamená, že v urychlovačích elektronů je v průběhu několika sekund dodána dávka, pro kterou by zařízení se zářením gama potřebovalo několik hodin. Proto je v průmyslově využívaných gama zařízeních ozařován větší objem současně. [32]



Obrázek 12: Penetrace jednotlivých typů záření [36]

Rentgenové záření je z hlediska interakce s polymery podobné spíše gama záření (viz Obrázek 12). Stejně jako gama záření má záření rentgenem vysokou schopnost pronikání do materiálu. Tím pádem praktický rozsah zpracovávaných tloušťek u ozařovaných produktů bude podstatně větší než u beta záření. Následující tabulka shrnuje charakteristiky jednotlivých uvedených záření. [5]

Tabulka 4: Porovnání jednotlivých ozařovacích technologií [5, 11]

Charakteristika	Typ záření		
	Beta	Gama	Rentgenové
Zdroj záření	Elektrický; Ize snadno zapnout i vypnout	Radioaktivní izotopy; nelze vypnout	Elektrický; Ize snadno zapnout i vypnout
Vlastnosti	Hmotnost elektronu $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg	Fotony (1,25 MeV) $\lambda = 1,0 \times 10^{-3}$ nm	Fotony $\lambda = 4,1 \times 10^{-3}$ nm
Výkon	Vysoký	Nízký	Nízký
Obsluha a údržba zařízení	Komplikovaná	Snadná	Komplikovaná
Hloubka penetrace	Nízká	Velká	Velká
Provozní náklady	Nízké	Vysoké	Vysoké
Tlumení zdroje	Žádné	Vyžadované	Žádné
Stínění	Vysoké po potřeby ozařování	Méně náročné	Méně náročné
Intenzita dávek záření	$360\,000 \text{ kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ ; $100 \text{ kGy}\cdot\text{s}^{-1}$	$10 \text{ kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ ; $2,8 \times 10^{-3} \text{ kGy}\cdot\text{s}^{-1}$	$960 \text{ kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ ; $0,27 \text{ kGy}\cdot\text{s}^{-1}$

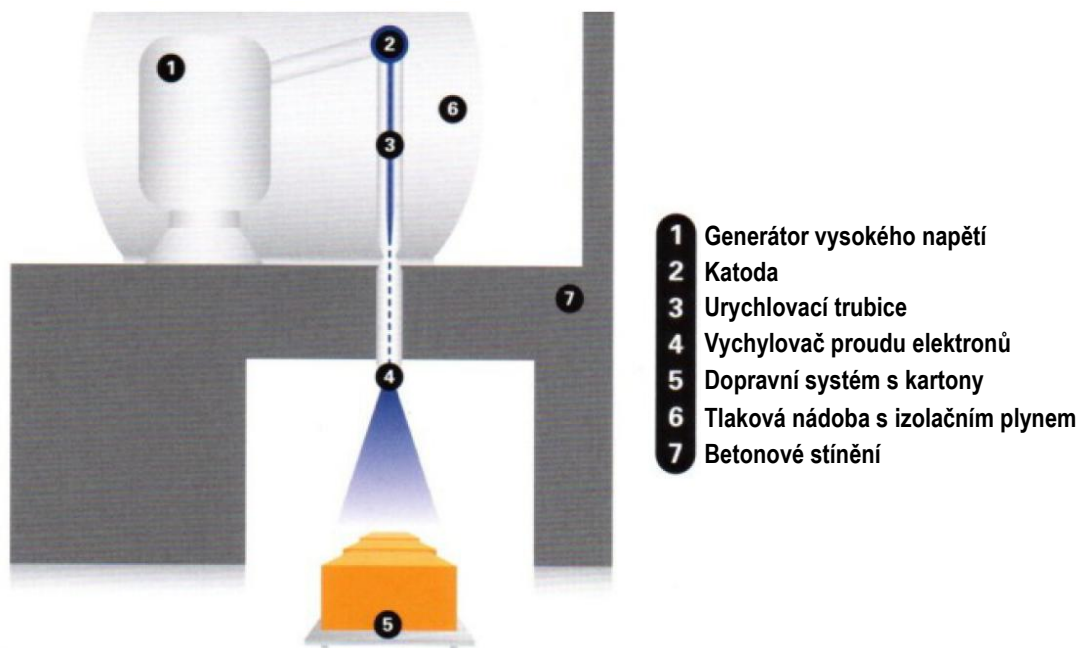
Nicméně vzhledem k neefektivitě elektronových paprsků u rentgenu je výkon a rychlost samotného procesu ozařování mnohem nižší oproti technologii záření beta. Dále rovněž intenzita dávky záření je menší než u urychlených elektronů. Lze konstatovat, že beta záření bude mít, co se týče ozařování polymerů, do budoucna oproti např. gama záření širší uplatnění. A to díky vyššímu výkonu procesu ozařování, nižším provozním nákladů a také kvůli nedostatku zdrojů izotopů na světě. [5]

### 5.3 Zdroje ionizujícího záření

Zdrojem ionizujícího záření jsou přirozeně radioaktivní látky, uměle vyrobené radionuklidy, a speciální zařízení jako rentgenky, urychlovače elektronů (kapitola 5.3.1), jaderné reaktory apod. [14]

#### 5.3.1 Urychlovače elektronů

Zdrojem beta záření v průmyslu jsou urychlovače elektronů. Žhavicí katoda emituje elektrony, které jsou poté urychlovány v elektromagnetickém poli na přibližně 99 % rychlosti světla. Rychlost elektronů je funkcí napětí mezi žhavicí katodou a anodou. Uvnitř urychlovací trubice se nachází vysoké vakuum. Elektrony, vycházející z katody, jsou usměrňovány a následně urychlovány. Při výstupu z trubice je paprsek elektronů vychýlen pomocí střídavého magnetického pole. Na konci výstupu z trubice následně vychází vějířovitý proud elektronů, který ozařuje daný produkt. [24]



Obrázek 13: Schéma elektronového urychlovače [24]

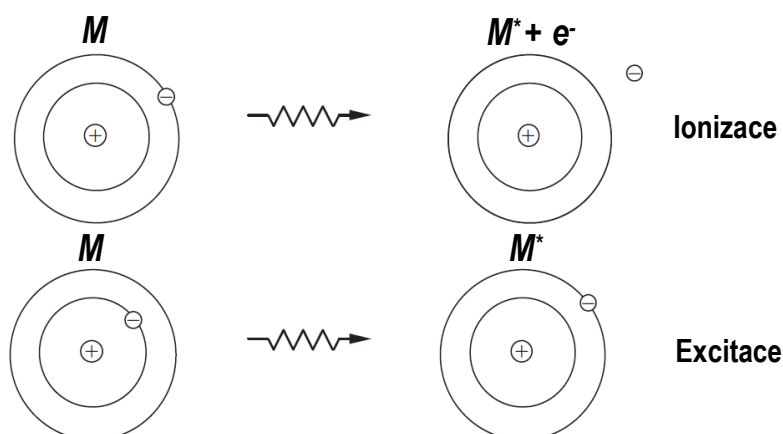
Průmyslové elektronové urychlovače lze klasifikovat dle množství dodávané energie na [5]:

- *Nízkoenergetické urychlovače (0,08 ÷ 0,3 MeV)*
- *Středně-energetické urychlovače (0,3 ÷ 5 MeV)*
- *Vysokoenergetické urychlovače (5 ÷ 10 MeV)*

Dále dle tvaru trajektorie, po níž se urychlovaná částice pohybuje, lze rozlišit urychlovače na lineární a kruhové urychlovače. [13]

#### 5.4 Interakce ionizujícího záření s polymery

Ionizující záření ztrácí při průchodu absorbující látkou svou energii. Způsob ztráty energie závisí na druhu ionizujícího záření a na fyzikálních vlastnostech absorbující látky. [16]



Obrázek 14: Ionizace a excitace [5]

Excitace je děj, při kterém se elektron v atomu absorbující látky dostává absorpcí energie ionizujícího záření ze základního stavu do excitovaného stavu (vyšší energetická hladina). Atom setrvává v excitovaném stavu krátkou dobu ( $10^{-5} \div 10^{-8}$  s). Při deexcitaci (návratu do základního stavu) je rozdíl příslušných energetických hladin uvolněn ve formě kvanta elektromagnetického záření. Ionizace spočívá ve vyrážení elektronu z obalu absorbujícího atomu. [16]

##### 5.4.1 Reakce v materiálu

Při interakci ionizujícího záření s polymery lze do primárních reakcí zahrnout ionizaci (1), excitaci (2) a vznik volných radikálů (3). Tvorba volných radikálů probíhá buď při

štěpení hlavního řetězce polymeru, nebo prostřednictvím disociace postranního C - H řetězce. [5]

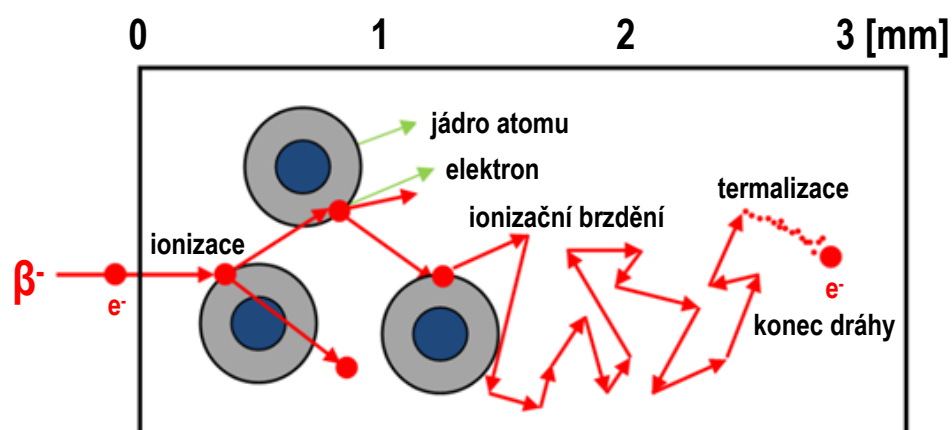


**Pozn.:** P = Polymer, R = radikál

Mezi sekundární reakce patří vznik dvojité vazby, síťování nebo větvení, štěpení řetězce, oxidace a roubování. [5]

#### 5.4.2 Interakce se zářením beta

Vnikne-li do látky částice  $\beta^-$ , což je záporně nabitý elektron  $e^-$ , pak při svém průletu kolem atomů působí elektrickými odpuzivými silami na elektrony, které vyráží z atomového obalu a tím atomy ionizuje. Jelikož jsou elektrony velmi lehké částice, při každé takové ionizaci atomu elektron  $\beta$  prudce změní směr svého pohybu - odpuzivými elektrickými silami se odrazí od atomu. A hned pak od dalšího a dalšího atomu – elektron  $\beta$  se bude pohybovat “cik-cak” a odrážet mezi atomy, které ionizuje a přitom ztrácí energii. Zabrzdí se, v závislosti na své energii, v hloubce do 1 ÷ 4 mm v látce hustoty vody, v těžkých kovech pak nedoletí hlouběji než do cca 0,1 mm. [20, 45]



Obrázek 15: Schematické znázornění průchodu částic  $\beta^-$  látkou a mechanismu ionizace [20]

Dolet 3 mm, uvedený jako příklad v měřítku na obrázku 15, odpovídá přibližně záření o energii kolem 1,5 MeV. Vlivem srážek a rozptylu je stopa částice v látce velmi křivo-

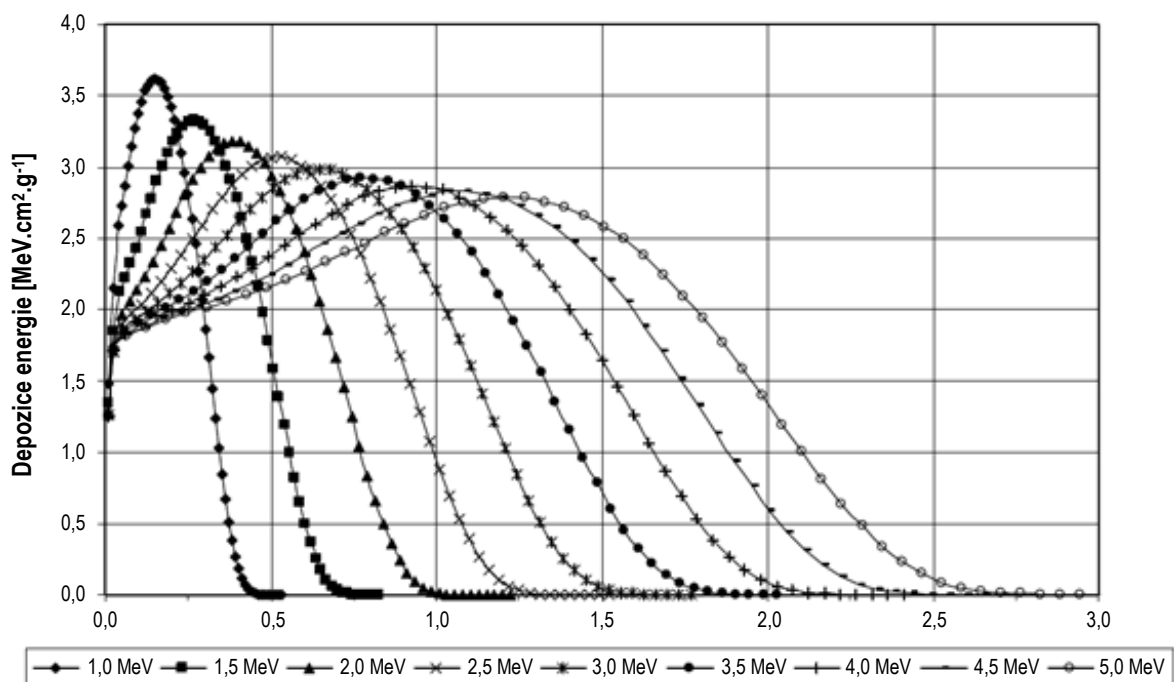
laká, takže i dva elektrony o stejné počáteční energii, emitované z téhož místa a ve stejném směru, se mohou zabrzdit ve značně rozdílných hloubkách. Ty elektrony, které se pohybovaly v přímějším směru a prodělaly menší počet kolizí s menšími ztrátami energie, proniknou dále, zatímco elektrony, které mnohokrát změnily svůj směr a ztratily při srážkách více energie, se zabrzdí blízko. [20, 45]

Ke konci dráhy, kdy již energie elektronu nestačí na ionizaci, bude elektron ztrácet energii excitací elektronů v atomech. Pokud není tento elektron zachycen v některém atomu, posléze se jeho kinetická energie sníží na termální hodnotu  $\approx 3/2 k.T$  ( $k$  je Boltzmannova konstanta), která při pokojové teplotě činí jen cca 0,04 eV. [20, 45]

### 5.4.3 Penetrace beta záření

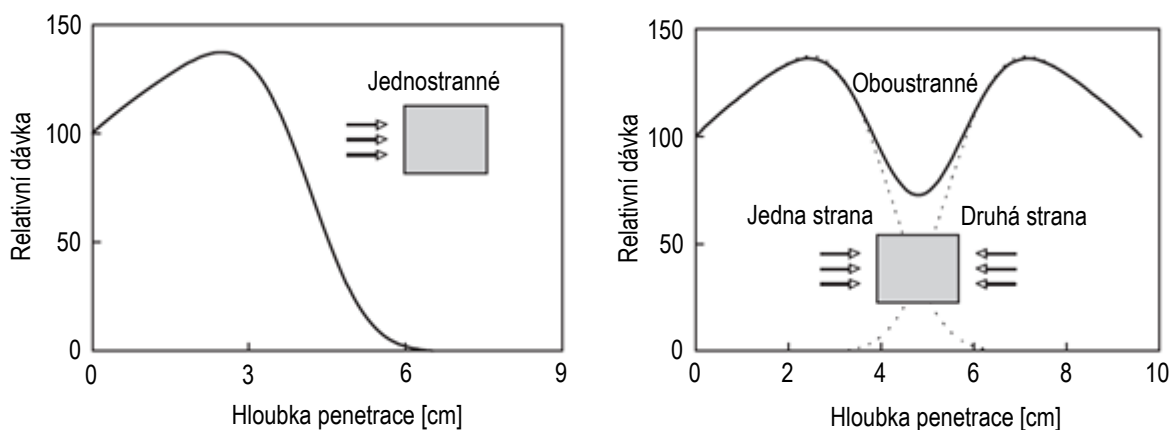
Jelikož mají elektrony velmi nízkou hmotnost, beta záření velice rychle ztrácí svou energii elektronových paprsků při interakci s ozařovanou hmotou. Hloubka penetrace zde závisí na již vzpomínané energii, na hustotě ozařovaného materiálu u produktu a také na jeho geometrii. [5]

Obrázek 16 zobrazuje jednotlivé křivky penetračního profilu pro různé energie záření. Maximální absorbovaná dávka se vždy nachází v malé hloubce pod ozařovaným povrchem. Při dosáhnutí svého maxima poté již dochází k rapidnímu poklesu. [5]



Obrázek 16: Distribuce dávky záření ve vodě v jednotkách cm [36]

Při zpracovávání komerčních produktů se často používá oboustranného ozařování. Tento způsob se provádí hlavně za účelem lepšího rozložení dávky záření v ozařovaném dílu, a to buď postupně ozařováním jedné a posléze druhé strany, nebo současně z obou stran za použití dvou urychlovačů elektronů, jak lze vidět na obrázku 17. [5]



Obrázek 17: Srovnání jednostranného a oboustranného způsobu ozáření [5]

#### 5.4.4 Faktory ovlivňující ozařování polymerů

Při řešení vhodnosti polymerních materiálů pro ozařování je také nutno brát v úvahu některé další faktory, mezi které patří [9]:

**Teplota** – při zvýšené teplotě je více podpořena míra radiačně-chemické přeměny v polymeru. To je zejména patrné při průchodu taveninou nebo za teploty skelného přechodu.

**Tlak** – rychlost a směr transformace polymerů jsou vysoce ovlivňovány vnějším tlakem. Při vysokém tlaku (okolo 3 GPa) se snižuje degradace polymeru. Např. u elastomerů, které jsou vystavěny vysokému tlaku při radiačně-chemickém procesu, probíhá síťování 3 ÷ 15 x rychleji než při atmosférickému tlaku.

**Fázový stav polymeru** – účinnost radiační přeměny v polymerech se zvyšuje při jejich přechodu ze skelného do vysoce elastického stavu a ještě více při přechodu na viskózní stav. Pokud polymer obsahuje viskózní a krystalické fáze, budou radiačně-chemické přeměny probíhat rychleji v amorfnní oblasti a na rozhraní, než v krystalické fázi.

**Vady v polymeru** – tuhé polymery vždy obsahují některé vady (mikrotrhliny, mikro dutiny, nečistoty, rozhraní, atd.), které ovlivňují prostorové lokalizace energie ionizujícího záření. Proto radiační odolnost polymeru závisí také na jeho historii.

**Ozáření** – kombinované působení ionizujícího záření, UV záření, viditelného a infračerveného záření světla působí ještě větší změny u fyzikálně-chemických vlastností polymerů. Tento fakt je třeba brát v potaz při hodnocení radiační odolnosti.

#### 5.4.5 Vliv záření na polymery

Při působení záření na polymerní materiály se v polymerech vyskytují paralelně dva procesy: síťování a degradace. To, který z procesů převažuje, závisí na chemické struktuře polymeru. Na základě této skutečnosti lze polymery rozdělit podle jejich chování při ozáření do dvou skupin. Polymery první skupiny převážně síťují, jejich řetězce jsou spojeny do rozvětvené trojrozměrné struktury s vysokou molekulární hmotností. Polymery patřící do druhé skupiny naopak degradují, snižuje se jejich molekulová hmotnost, doprovázená náhodným štěpením polymerních řetězců. [20]

Tabulka 5: Vybrané polymery a jejich reakce na ionizující záření [1]

Druh polymeru	Převažující reakce
Polyetylen	Síťování
Polypropylen	Síťování
Polystyren	Síťování
Polyvinylchlorid	Síťování
Polyisobutylen	Degradace
Polybutadien	Síťování
Polyvinylfluorid	Degradace
Polyakrylonitril	Degradace
Polychloropren	Síťování
Polyvinylbutyral	Degradace
Polyamid	Síťování
Polyester	Síťování
Polymethylmetakrylát	Degradace
Polyoxometylen	Degradace
Polyuretan	Síťování
Polysulfon	Síťování
Polyakrylát	Síťování

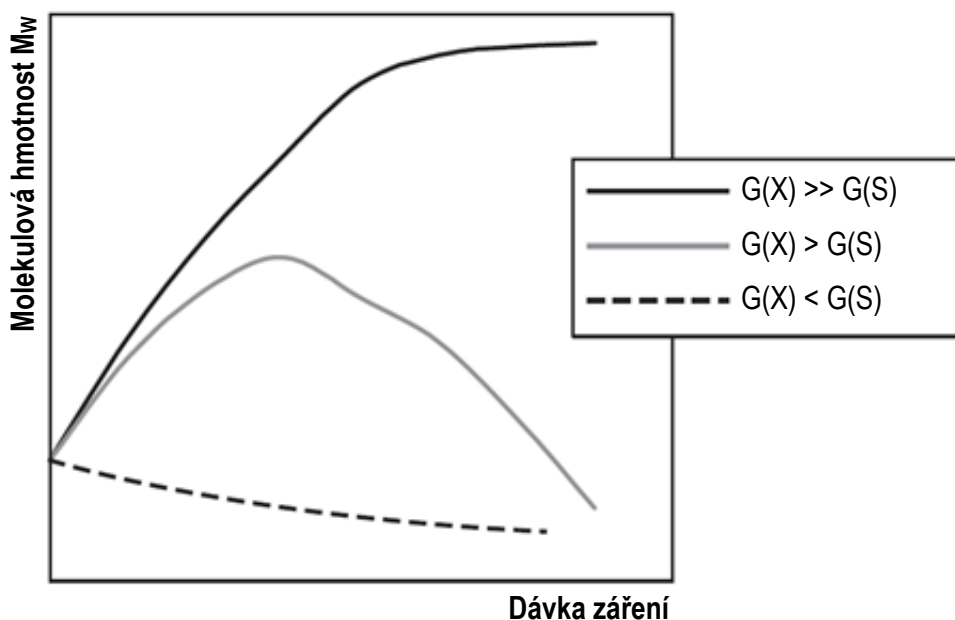
Tabulka 6 obsahuje vybrané typy polyamidů, které jsou radiačně síťovatelné. V této tabulce jsou uvedeny jejich jednotlivé hodnoty G pro síťování G(X) a degradaci G(S). Tato data jsou získána z vícera zdrojů, uvedené rozsahy se mohou v praxi lišit pro různé výrob-

ce daných polymerů. Ačkoli některé polymery mohou spíše více síťovat než degradovat, nízká hodnota  $G(X)$  značí, že polymer vyžaduje větší dávku záření pro získání lepších vlastností. [29]

Tabulka 6: Hodnoty  $G(X)$  a  $G(S)$  pro vybrané typy polyamidů [29]

Polymer	$G(X)$ Ozáření na vzduchu	$G(S)$ Ozářeno ve vakuu
Polyamidy	0,5 ÷ 1,15	0,6 ÷ 1,4
PA 6	0,67	0,68
PA 66	0,50	0,70
PA 610	0,62	0,76
PA 11	0,92	0,85
PA 12	0,92	0,85

Uvedené hodnoty  $G(X)$  mohou být zlepšeny přidavkem polyfunkčních monomerů. To může zapříčinit snížení potřebné dávky pro ozáření a vést ke snižování potenciálních nepříznivých jevů, jako může být např. oxidace, vznik volných radikálů a vylučování plynu. Použitím těchto nízkomolekulárních látek lze poskytnout výrobu radiačně síťovaných výrobků, kterých by jinak nebylo možné dosáhnout. [29]



Obrázek 18: Závislost molekulové hmotnosti na velikosti dávky záření [5]

Důležitý je také vztah mezi molekulovou hmotností polymeru a dávkou záření (Obrázek 18). Může zde dojít ke třem situacím. Je-li  $G(X)$  výrazně vyšší než  $G(S)$ , molekulová hmotnost se bude neustále zvyšovat v důsledku síťování polymeru. Bude-li  $G(X)$  sice větší



než G(S), ale ne o moc a u molekulové hmotnosti nastane zlom, celková reakce se bude měnit ze síťování na degradaci. Za předpokladu G(S) větší než G(X) bude docházet k degradaci polymerního materiálu. [5]

## 5.5 Měrné jednotky pro ionizující záření

**Dávka** – z hlediska fyziky je dávka definovaná jako poměr absorbované energie záření k hmotnosti ozařované hmoty. Dnes se v soustavě SI používá jednotka Gray (Gy). Předtím se jako jednotka používala Rad. [24]

$$1\text{Gy} = 1\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} = 100\text{rad} \quad (4)$$

$$10\text{kGy} = 1\text{Mrad} \quad (5)$$

**Energie** – je definována jako absorbovaná energie záření za jednotku času, vztažená ke hmotnosti. Její velikost hraje důležitou roli u zesíťování hmoty. [24]

$$1\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1\text{W} \cdot \text{kg}^{-1} = 0,36\text{Mrad} \cdot \text{h}^{-1} \quad (6)$$

**Penetrace** – penetrace (hloubka pronikání) vysoce energetických elektronů, popř. gama záření, je funkcí jejich energie a hustoty produktu, jenž má být ozářen. Měrnou jednotkou je Joule (J), dříve to býval elektronvolt (eV). [24]

$$1\text{MeV} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{J} = 0,16\text{pJ} \quad (7)$$

**Aktivita** – pomocí této veličiny je popsán výkon radioaktivního zdroje záření. Dříve se užívala jednotka Curie (Ci). Nyní je v souladu SI jednotkou Becquerel (Bq). [24]

$$1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1} \quad (8)$$

$$1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Bq} = 37\text{GBq} \quad (9)$$

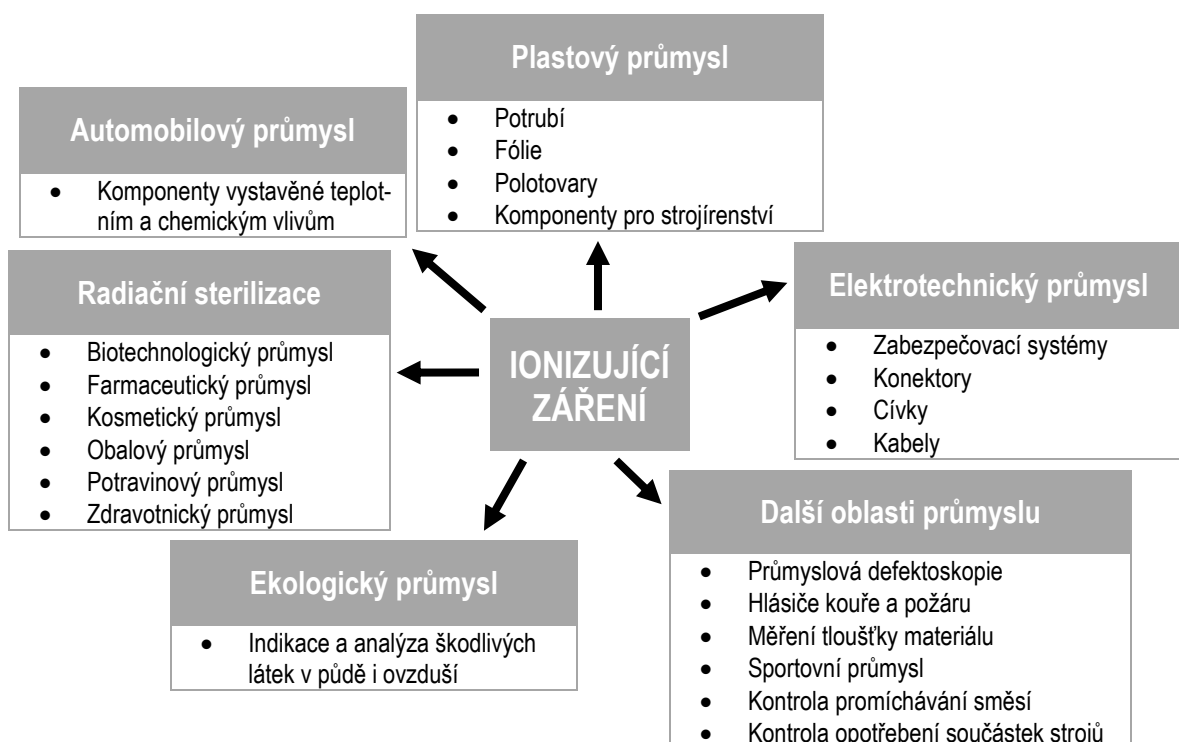
## 5.6 Aplikace ionizujícího záření

Ionizující záření nachází uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti. Vedle průmyslových aplikací se jedná hlavně o aplikace v lékařství (jak v diagnostických metodách, tak při terapii). [19]

K praktickým použitím ionizujícího záření patří sledování homogenizace procesu, studium kinetiky reakcí, studium pochodů ve vysoké peci, lékařská diagnostika, měření

rychlosti proudění různých materiálů, vyhledávání netěsnosti potrubí, kontrola opotřebení materiálů atd. [19]

Jako radiační technologie jsou označovány procesy výroby materiálů nebo jejich modifikace, založené na fyzikálních, chemických či biologických změnách vlastností látek nebo objektů v důsledku ozáření ionizujícím zářením. Jako příklad lze uvést radiační syntézu látek, radiační terapii v medicíně, radiační ošetřování potravin, sterilizaci farmaceutických přípravků a medicínského nářadí, iontovou implantaci, elektronovou a iontovou litografii, radioaktivní zdroje světla a elektřiny a také v neposlední řadě radiační síťování polymerů. [19]



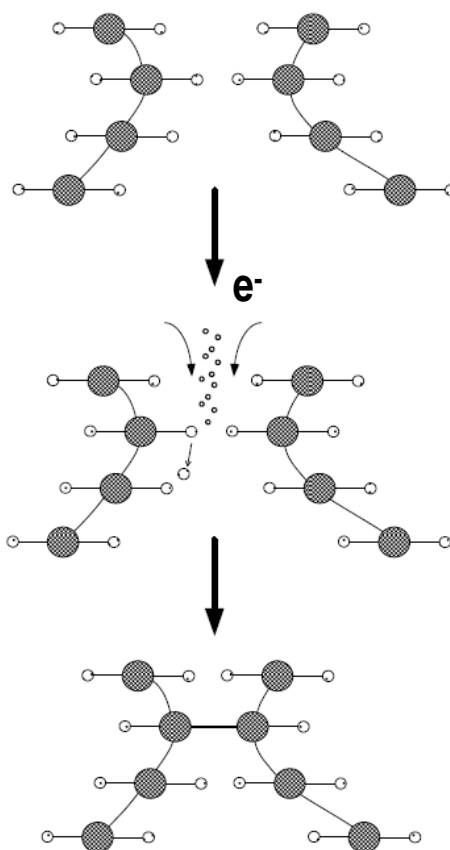
Obrázek 19: Oblasti využití ionizujícího záření [25, 28, 46]

Je však třeba uvážit, že každá praktická aplikace ionizujícího záření může vést k ozáření pracovníků nebo obyvatelstva. Vždy je třeba mít na zřeteli bezpečnostní hledisko a dodržovat všechny požadavky radiační ochrany. [19]

## 6 RADIČNÍ SÍŤOVÁNÍ POLYMERŮ

Pod pojmem síťování polymerů je myšleno vzájemné spojování polymerních řetězců za vzniku prostorové sítě. Jeden z mnoha postupů k docílení tohoto procesu je v dnešní době velmi progresivní metoda radiačního síťování. [6, 24]

Radiační síťování je založeno na efektu vysoce nabitých částic beta a gama záření. Polymery jsou vystaveny přesně předem stanoveným dávkám gama a beta záření a tímto způsobem dojde k zesíťování molekul. [6, 32]



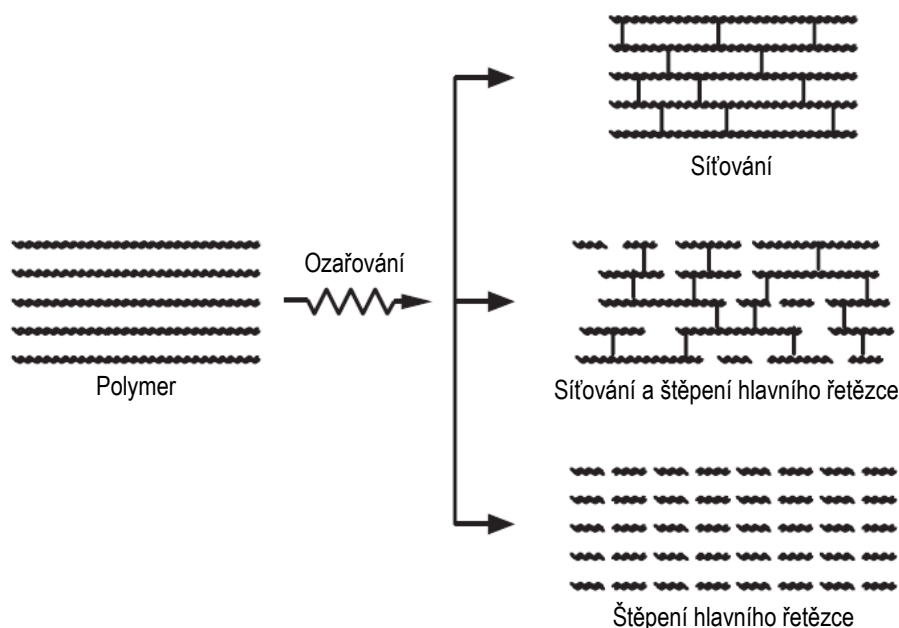
Obrázek 20: Princip radiačního síťování [21]

Radiační síťování probíhá při pokojové teplotě bez dodatečného namáhání výrobků. Výhodou je variace ozařovacích parametrů, kterými lze měnit stupeň síťování v ozařovaném dílu a ovlivňovat tak vlastnosti materiálu přesně podle toho, jak je vyžadováno. Radiační síťování se nejčastěji využívá pro izolace kabelů a drátů, hadice a trubkové profily, tvarované a vstřikované díly, kompozitní materiály a granuláty polymerů, u kterých se cíleně mění reologické vlastnosti. [22, 24]

Velmi důležité je, že ozářené produkty poté nejsou radioaktivní a ani samy neemitují vlastní záření. [24]

## 6.1 Princip síťovacího procesu

Pro radiační síťování je základní předpoklad, že materiál při působení ionizačního záření převážně síťuje a nedegraduje. Obvykle proces síťování a štěpení hlavního řetězce (degradace) probíhá současně (viz kapitola 5.4.5). Obrázek 21 ukazuje vliv záření na polymery. Jestliže je počet vzniklých spojení dvojnásobně vyšší než počet vzniklých štěpení hlavního řetězce v síti, daná struktura potom síťuje. [5, 32]



Obrázek 21: Ilustrační pohled na vliv záření na polymerní řetězce [5]

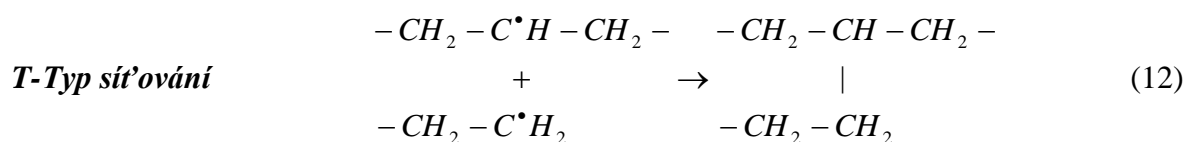
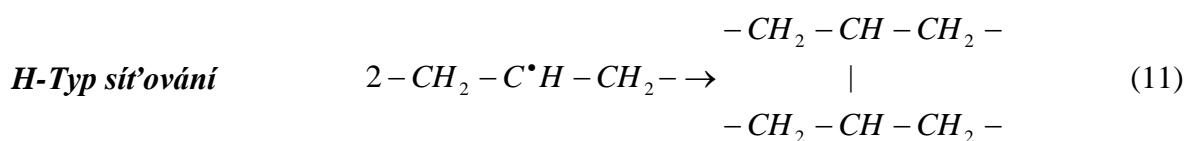
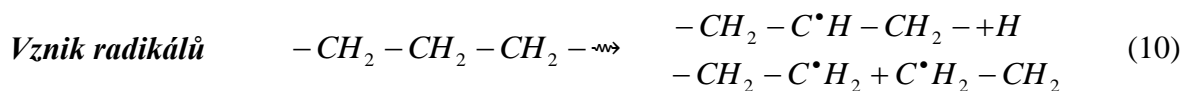
Interakcí záření s polymerem vznikají polymerní radikály (rozpad vazeb C – H), ty pomocí rekombinace v řetězci vytvoří síť, a to spojením dvou volných radikálů mezi sousedními řetězci za vzniku vazby C – C. [32]

U některých typů polymerů, resp. receptur je potřebný přídavek pomocného síťovacího činidla. Ta mohou být přidávána během samotné přípravy polymerní směsi, anebo přímo před lisováním polymerního granulátu ve formě masterbatche. [32]

## 6.2 Typy síťování

Podle způsobu míst spojení se rozlišují dva typy síťování. Jsou H-typy a T-typy. Polymerní radikály zapojené do H-typu (11) jsou sekundární radikály vzniklé buď při rozštěpení postranních řetězců připojených k hlavnímu řetězci, anebo po připojení malých radikálů do nenasycené vazby (C = C) hlavního řetězce. [5, 8]

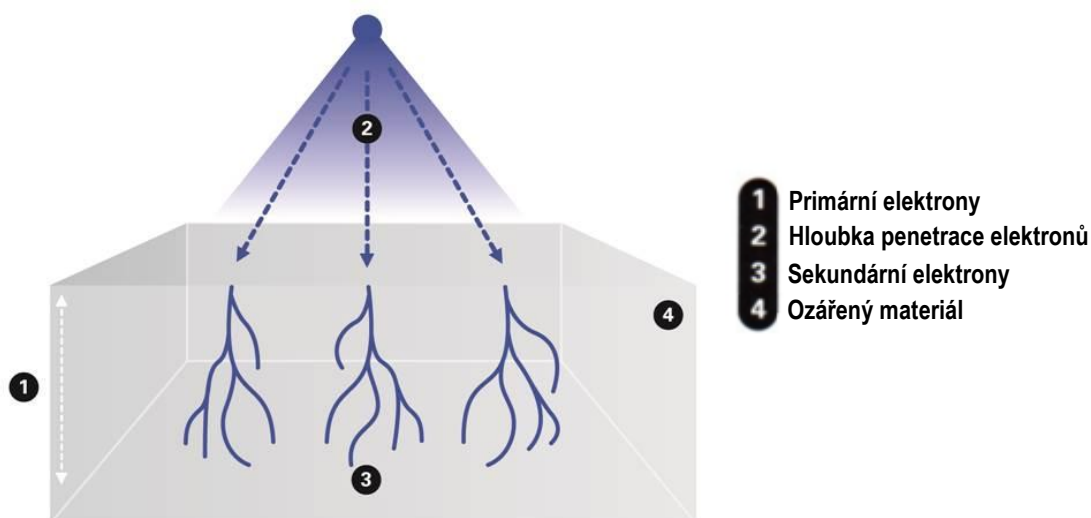
T-typ síťování (12) je převážně tvořen rekombinací sekundárních radikálů s radikály primárními, které vznikají při štěpení hlavního řetězce. [5, 8]



U elastomerů mají tendenci převažovat H-typy síťování, u tuhých plastů převážně T-typy. [5, 8]

### 6.3 Radiační síťování za pomoci beta záření

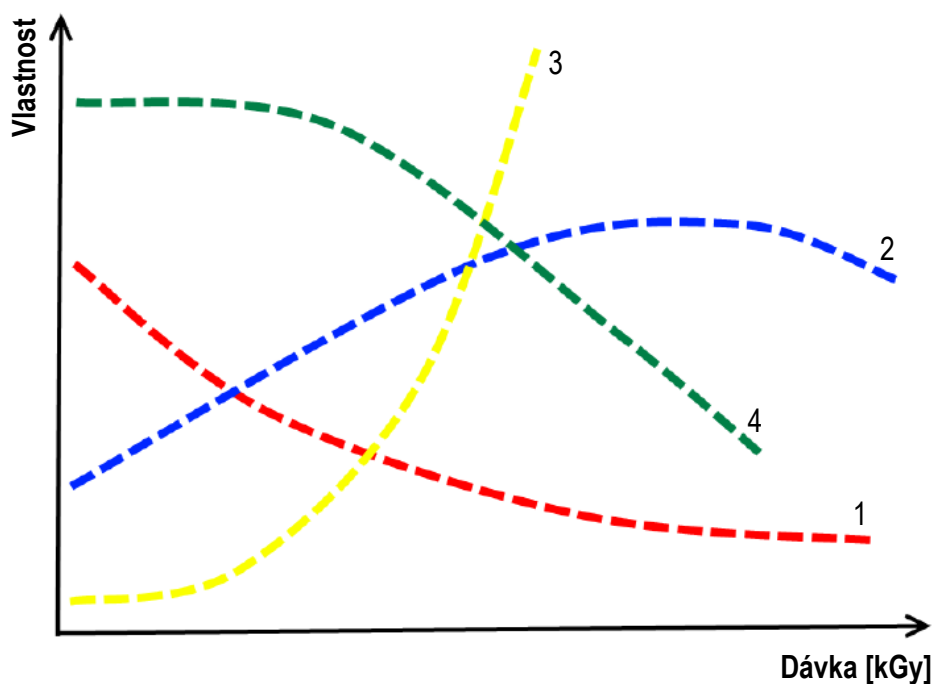
Pro síťování vlivem beta záření se využívá účinku urychlovačů elektronů. Výkon beta záření, resp. urychlovaných elektronů závisí na dvou faktorech: vygenerovaném urychlovacím napětí a na směru proudu elektronových paprsků. Energie elektronů, která ovlivňuje jejich schopnost penetrace v materiálu, má stejnou velikost jako urychlovací napětí. Proud paprsku stanovuje počet urychlených elektronů. Na 1 ampér (A) proudu spadá průtok  $6,3 \times 10^{18}$  elektronů za sekundu ( $e^- \cdot s^{-1}$ ). Energie ze záření je materiálem absorbována a vznikají radikály, které spolu reagují při následné chemické reakci a vytváří očekávané spojení. Dnes často využívané energie u beta záření se běžně pohybují v rozmezí od 100 keV do 10 MeV. [5, 24]



Obrázek 22: Radiační síťování beta zářením [24]

## 6.4 Vliv radičního síťování na polymery

Některé termoplasty jsou díky radičnímu síťování převedeny na takové termoplasty, které se v širokých oblastech teplot chovají jako elastomery. Elastomerické vlastnosti se projevují především nad teplotou tání krystalů, respektive teplotou skelného přechodu neupraveného polymeru. [32]



Obrázek 23: Vlastnosti polymerů v závislosti na dávce záření (1 – tažnost; 2 – pevnost v tahu; 3 – tvarová stálost za tepla; 4 – botnání) [24]

V důsledku radičního síťování může původně termoplastický výrobek odolávat vyšším teplotám než předtím. Tvarová stálost za působení tepla je značně zlepšena v porovnání s výchozím termoplastickým materiálem. Radiční síťování mění následující vlastnosti plastů [24, 32]:

### Mechanické vlastnosti:

- *Zvýšení Youngova modulu pružnosti*
- *Zvýšení pevnosti*
- *Redukce tečení (creepu)*
- *Zlepšení meze únavy (při střídavém ohybu)*
- *Zlepšení odolnosti proti vnitřnímu pnutí*
- *Zlepšení otěruvzdornosti*
- *Zlepšení chování při dlouhodobém zatížení vnitřním tlakem*

Tepelné vlastnosti:

- *Zlepšení tvarové stálosti za tepla*
- *Zvýšení tepelné odolnosti*
- *Zvýšení odolnosti proti stárnutí*
- *Zlepšení trvalé deformace při zatížení tlakem (tahem)*

Chemické vlastnosti:

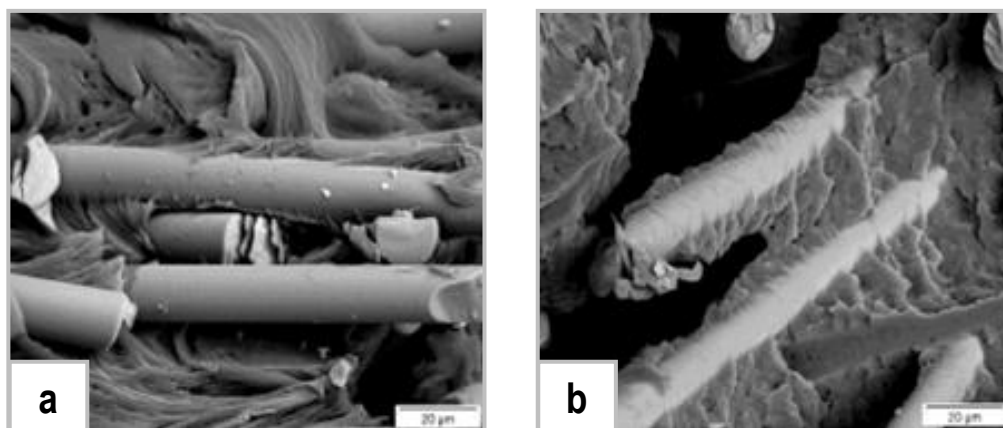
- *Snížení rozpustnosti*
- *Zvýšení odolnosti proti botnání*
- *Zvýšení odolnosti proti vzniku trhlin*
- *Zlepšení odolnosti proti hydrolyze a olejovzdornosti*

Spektrum získaných vlastností hlavně závisí na typu použitého polymeru. [24]

## 6.5 Radiační síťování polyamidů

V podstatě všechny typy polyamidů mohou být radiačně síťovatelné i ty, které jsou vyztužené vlákny nebo polyamidy obsahující retardéry hoření. Radiačně zesíťované polyamidy mohou často nahrazovat reaktoplasty nebo speciální plasty jako jsou PPS, PEI, LCP atd. Největší zastoupení síťovatelných polyamidů jsou v současnosti PA 6, PA 66, PA 11 a PA 12. Aby mohlo dojít k zesíťování polyamidů, musí tyto polymerní materiály obsahovat příslušná aditiva (polyfunkční monomery, aktivátory síťování). [27]

Použijí-li se polyamidy, vyztužené vlákny, záření poté bude mít prospěšný účinek na zlepšení přilnavosti mezi vlákny a maticí u polyamidů, což bude mít pozitivní vliv na jejich mechanické vlastnosti (viz Obrázek 24). [27]



Obrázek 24: Struktura PA 6 GF 30 (a – neozářeného; b – ozářeného) [23]

## 6.6 Výhody a nevýhody radiačního sítování

Ve srovnání s chemickými modifikacemi polymerních vlastností při podobných reakcích, ale za pomoci chemikálií, má tento způsob sítování polymerů své výhody i některé nevýhody. [5]

Mezi výhody patří v důsledku rychlejšího procesu vyšší výkon oproti ostatním modifikacím, úspora energie, nižší citlivost na vlhké prostředí, výrazné snížení emisí těkavých organických látek z důvodu absence rozpouštědla. Dále do předností lze zařadit čistotu plastických dílů a nižší toxicitu, poněvadž není potřeba žádných toxických chemikálií. Další výhodou ozařování hotových vstřikovaných dílů je, že plastový odpad z výroby lze jednoduše recyklovat a vracet zpět do výroby. [5, 24]

Ovšem radiační sítování má také několik svých nevýhod. Ačkoli denní provozní náklady nemusí být vysoké, vybavení pro tuto technologii je obvykle velmi drahé. Pro požadovaný výkon a kapacitu zařízení jsou vyžadovány značné kapitálové investice. Mimo jiné také provozní náklady budou záviset na objemu produkce. Nebude-li objem denní produkce dostatečně velký, mohou být náklady na ozařování podstatně vyšší oproti chemickým způsobům modifikace. V některých případech mohou být vlastnosti dosažené radiační modifikací nižší než ty, kterých lze dosáhnout chemickou modifikací. Dále lze jako nevýhodu shledávat nedostatek znalostí z této oblasti a také nedostatečné přijetí této technologie ze strany veřejnosti, což se jeví jako překážka. [5]

Je důležité mít na paměti skutečný potenciál této modifikace. Dále je nutné uvědomit si, že tato metoda nabízí mnohem více výhod než nevýhod. [5]



## 7 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Mechanickými zkouškami se zjišťuje chování materiálu za působení vnějších sil, tzn., že se zkoumají jeho mechanické vlastnosti. Používané zkušební metody mohou být rozděleny do tří skupin [15]:

- **Statické zkoušky** – při těchto zkouškách je materiál namáhán pomalu se měnícími silami. Síla se zvyšuje rovnoměrně pomalu, obvykle do okamžiku zničení tělesa.
- **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.
- **Únavové zkoušky** – mechanické vlastnosti se zkoušejí dlouhodobě za předepsaných podmínek časově proměnného namáhání, obvykle až do porušení materiálu. Pro jednotlivé druhy plastů tyto zkoušky bývají rozličné.

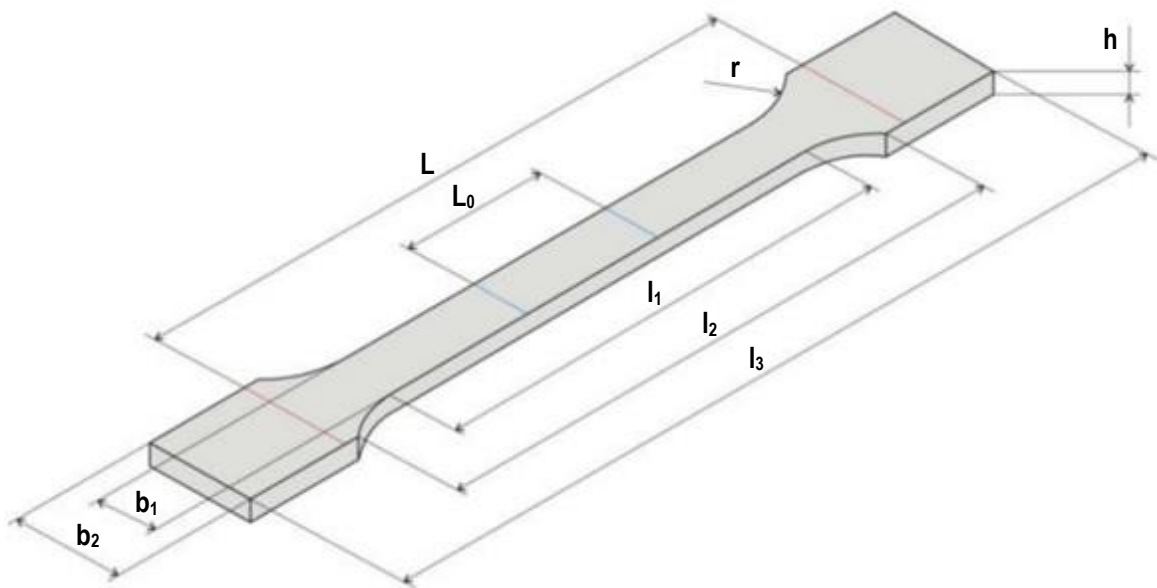
Výsledky mechanických zkoušek jsou závislé nejen na vlastnostech polymeru, tj. chemickém složení, molekulové hmotnosti a její distribuci, krystalinitě, obsahu nečistot apod., ale ve značné míře i na režimu zpracování a způsobu přípravy zkušebních těles. [15]

### 7.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška patří mezi základní metody sloužící k hodnocení mechanických vlastností materiálů. Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní zkušební rychlostí do jeho přerušeni nebo do okamžiku, kdy napětí (zatížení) nebo deformace (prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. [25, 40]

#### 7.1.1 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa z plastů jsou ve většině případů vyhotovena vstřikováním, přičemž jejich tvar a rozměry jsou uvedeny v příslušné normě ISO. Vzorky jsou buď kruhového anebo obdélníkového průřezu. Jejich konce tzv. ramena mají zvětšenou velikost nebo upravený tvar kvůli jejich uchycení ve zkušebním zařízení. Na zúžené délce  $l_1$  při testování by se měly koncentrovat všechny deformace a přerušeni tělesa. U tohoto rozměru se rovněž měří elongace zkoušeného tělesa. [18]



Obrázek 25: Zkušební těleso typu 1A a 1B [17, 26]

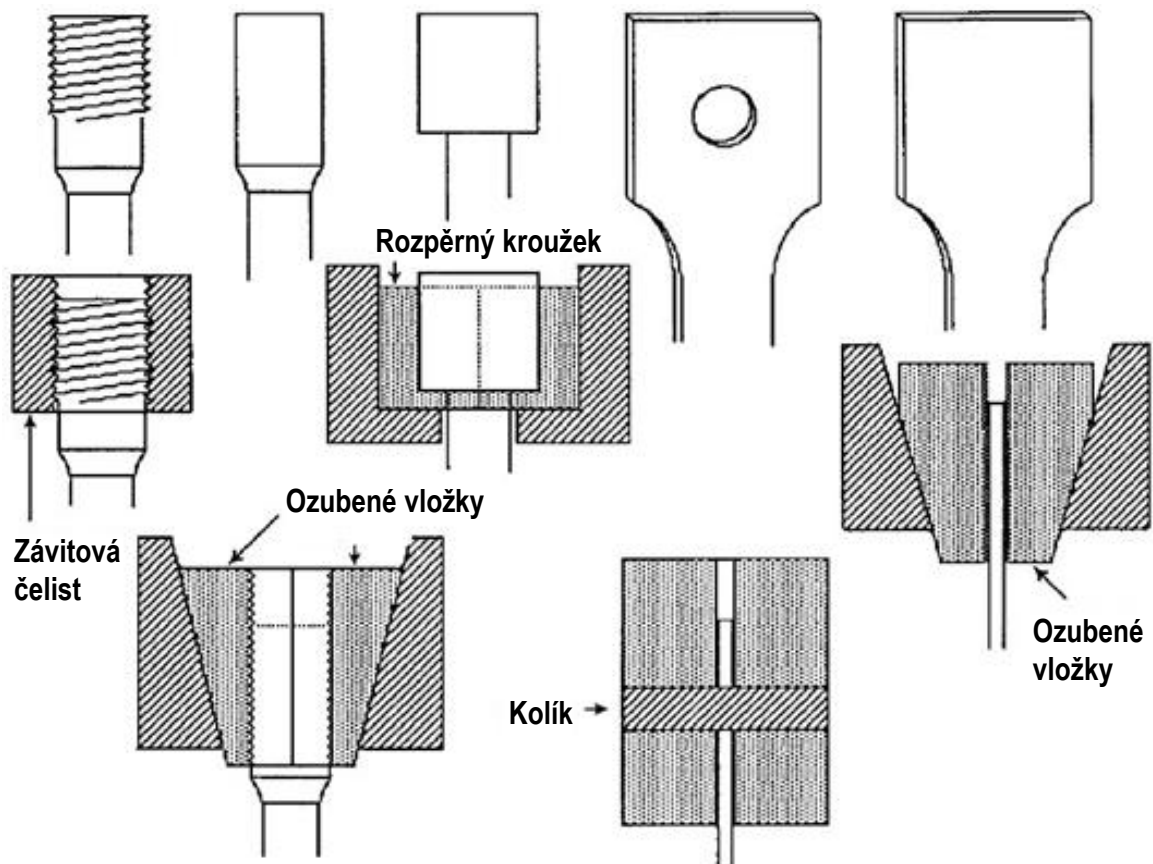
Kdykoliv je to možné, používají se tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 1A a 1B (viz Obrázek 25). Typ 1A se používá pro vstříkovaná víceúčelová zkušební tělesa, typ 1B pro mechanicky obráběná zkušební tělesa. [26]

Tabulka 7: Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B [26]

Rozměr [mm]		Typ zkušebního tělesa	
		1A	1B
$l_3$	Celková délka	170	$\geq 150$
$l_1$	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$80 \pm 2$	$60,0 \pm 0,5$
$r$	Poloměr	$24 \pm 1$	$60,0 \pm 0,5$
$l_2$	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	$109,3 \pm 3,2$	$108,0 \pm 1,6$
$b_2$	Šířka konců	$20,0 \pm 0,2$	
$b_1$	Šířka zúžené části	$10,0 \pm 0,2$	
$h$	Doporučená tloušťka	$4,0 \pm 0,2$	
$L_0$	Počáteční měřená délka (preferovaná)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Počáteční měřená délka (přípustná, jestliže se požaduje pro řízení kvality, nebo když je předepsána)	$50,0 \pm 0,5$	
$L$	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$115 \pm 1$	$115 \pm 1$

Existují různé způsoby uchopení zkušebních těles, z nichž některé jsou znázorněny na obrázku 26. Konec vzorku může být zašroubován do závitové čelisti, nebo může být zachycen pomocí kolíku. Styčné konce tělesa nebo část přípravku mohou být uchyceny mezi klíny. Nejvíce důležitým aspektem při volbě metody uchopení tělesa je zajistit, aby

upínací čelist byla schopna udržet těleso při maximálním zatížení bez jakékoliv jeho poruchy nebo prokluzu. Ohýbání by mělo být minimalizováno. [18]



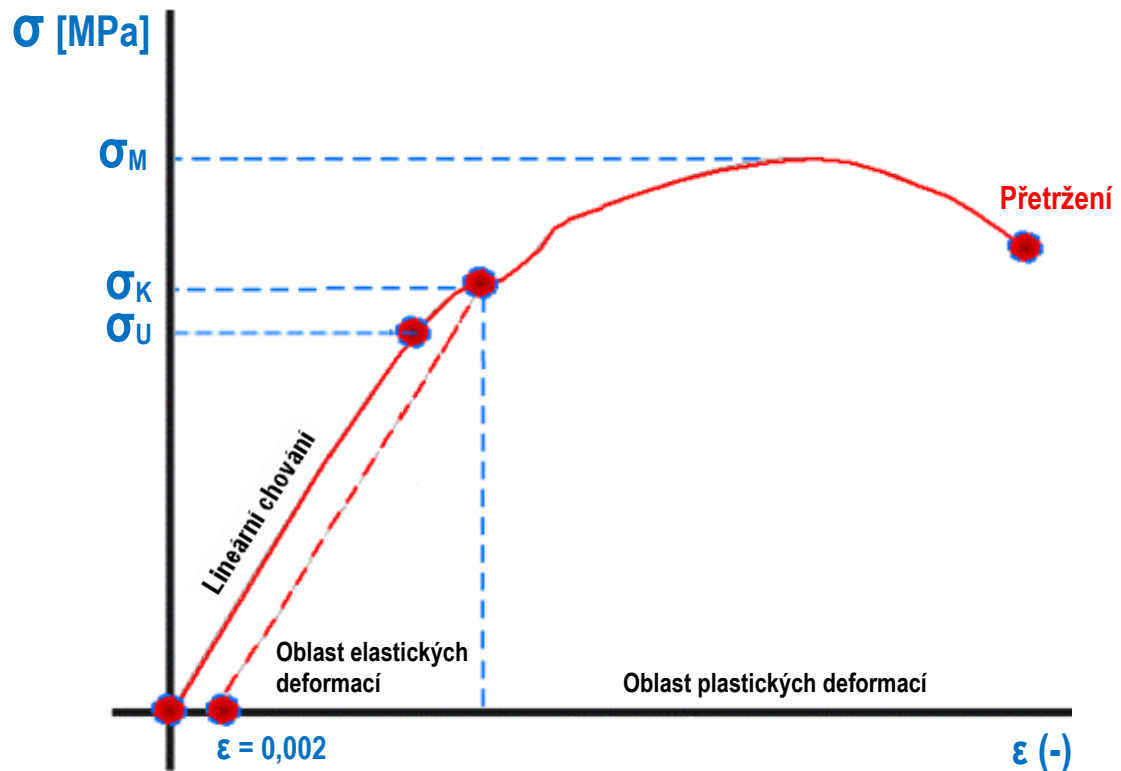
Obrázek 26: Různé způsoby uchycení zkušebních těles [18]

### 7.1.2 Testovací zařízení

Běžně se tahové zkoušky provádí na univerzálních zkušebních strojích, které jsou schopny testovat materiál na tah, také tlak nebo ohyb. Testovací stroje jsou buď elektromechanické, nebo hydraulické. Elektromechanické stroje jsou založeny na proměnných otáčkách elektromotoru a převodovky. Rám, ve kterém je zkušební těleso uchyceno do upínacích čelistí, se pohybuje po jednom, dvou nebo čtyřech vodících šroubech. Jeho rychlost lze měnit pomocí otáček motoru. Hydraulické stroje jsou stavěny buď na jednočinném, nebo dvojčinném pístu, které pohybují s příčnickem po vodících šroubech nahoru a dolů. [18]

### 7.1.3 Tahový diagram

Obecná tahová křivka polymeru je ukázána na obrázku 27. Na této křivce je několik důležitých bodů, které vypovídají o tahovém chování zkoušeného materiálu. [40]



Obrázek 27: Tahový diagram [34]

Chování elastických materiálů v oblasti malých deformací lze popsat Hookovým zákonem, který definuje přímo úměrný vztah mezi napětím a deformací. Konstantou úměrnosti je **modul pružnosti  $E$  (Youngův modul)**. [40]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [Pa]} \quad (13)$$

Hodnota modulu pružnosti se stanovuje z tahových křivek v oblasti, kde je patrná lineární závislost napětí na deformaci. Čím vyšší hodnota modulu pružnosti je, tím je vyšší tuhost zkoušeného materiálu. Bod na křivce, kde končí oblast hookovského chování se označuje jako **mez úměrnosti** a je vyjádřena smluvním napětím [40]:

$$\sigma_U = \frac{F_U}{S_0} \text{ [Pa]} \quad (14)$$

S rostoucím zatížením dochází k zakřivení tahové křivky, ve kterém je zahrnuta časově závislá elastická a plastická deformace. Místo, do kterého je ještě deformace vratná se označuje jako **mez pružnosti**. [40]

$$\sigma_E = \frac{F_E}{S_0} \text{ [Pa]} \quad (15)$$

Po uvolnění napětí se deformace vrátí do původního stavu. Za tímto bodem dochází i při nepatrném zvýšení napětí k velké deformaci, nastává plastická (nevratná) deformace. Nastává *mez kluzu*.

$$\sigma_K = \frac{F_K}{S_0} \text{ [Pa]} \quad (16)$$

**Mez pevnosti v tahu (pevnost v tahu)** se definuje jako napětí potřebné k přetržení zkušebního tělesa vztažené na původní průřez, tedy smluvní napětí potřebné k přetržení. [40]

$$\sigma_M = \frac{F_M}{S_0} \text{ [Pa]} \quad (17)$$

Prodloužením zkušebního tělesa se mění jeho původní délka a nastalá délková změna se definuje jako **poměrné (relativní) prodloužení**. [40]

$$\varepsilon_L = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ [-]} \quad (18)$$

Současně se však mění také velikost průřezu tělesa, které se vyjadřuje jako **poměrné zkrácení**. [40]

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0}, \varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0} \text{ [-]} \quad (19)$$

Poměrné protažení se často vyjadřuje také v procentech jako protažení [40]:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (20)$$

Podobně je definována mezní hodnota deformace, tedy protažení při přetržení, které se zkráceně označuje jako **tažnost**. [40]

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (21)$$

Vztah mezi poměrným zkrácením a poměrným prodloužením je tzv. **Poissonův poměr**. [40]

$$\nu = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_L} = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_L} \text{ [-]} \quad (22)$$

## 8 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI

Vypracovaná literární studie v této diplomové práci se zabývá problematikou modifikace polymerních materiálů za pomoci ionizujícího záření. Obsah teoretické části je rozdělen do sedmi kapitol.

První kapitola popisuje polymerní materiály a jejich klasifikaci včetně podkapitol věnovaných jejich makromolekulární a nadmolekulární struktuře.

Kapitola druhá charakterizuje skupinu termoplastů z oblasti konstrukčních polymerů, a to konkrétně polyamidy. Je zde hlavně uvedena charakteristika polyamidu 66, který je poté následně použit v praktické části diplomové práce. Dále kapitola uvádí vlastnosti polyamidů, jejich navlhavost se sušením a využití na trhu.

Třetí kapitola přichází s popisem modifikací, kterých je možné použít pro cílenou přeměnu vlastností polymerních materiálů.

Čtvrtou kapitolu tvoří síťování polymerů spolu s procesem tvorby sítě, druhy metod síťování a popisem síťovacích prostředků.

Pátá kapitola je zaměřena na ionizující záření. Jsou zde rozebrány tři základní typy záření, které se nejběžněji mohou používat při ozařování polymerů. Také jsou zde popsány možné zdroje ionizujícího záření. Dále kapitola rozebírá vliv ionizujícího záření na polymerní materiály a reakce v materiálu, k nimž dochází při vzájemné interakci se zářením. Na závěr uvádí jednotky charakteristické pro ionizující záření a jeho aplikace.

Obsahem šesté kapitoly je radiační síťování polymerů. Je zde brán zřetel na princip, vliv na polymery, výhody a nevýhody této metody.

Poslední sedmá kapitola je věnována tahové zkoušce z oblasti mechanických zkoušek polymerů.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 9 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je prozkoumat vliv ionizujícího beta záření na vlastnosti vybraných konstrukčních polymerů. Primárně se jedná o mechanické vlastnosti a to vlastnosti v tahu u dvou konkrétních materiálů. Hlavním záměrem diplomové práce je pozorovat a porovnat účinek ionizujícího záření na tahové vlastnosti v určitém spektru teplot.

Jednotlivé cíle praktické části této diplomové práce lze shrnout do následujících bodů:

➤ ***Volba vhodného typu polymerů***

Budou vybrány dva typy polymerních materiálů, které budou podrobeny výzkumu.

➤ ***Vyhotovení zkušebních těles***

Zkušební tělesa budou připravena na vstřikovacím stroji.

➤ ***Ozáření zkušebních těles***

Připravená zkušební tělesa budou vystavena účinkům ionizujícího beta záření při stanovených dávkách záření.

➤ ***Testování zkušebních těles***

Neozářená zkušební tělesa spolu s ozářenými budou otestována při tahové zkoušce.

➤ ***Statistické vyhodnocení naměřených dat***

Data získána z tahové zkoušky budou statisticky vyhodnocena. Výstupem toho budou výsledky ve formě grafů a tabulek.



## 10 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

Při řešení praktické části bylo využito několika typů zařízení. Všechna tato zařízení jsou jednotlivě popsána v následujících kapitolách. Tyto zařízení a stroje jsou:

- *Sušící zařízení ARBURG THERMOLIFT 100 – 2*
- *Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470H 1000 – 400*
- *Univerzální zkušební stroj ZWICK ROELL 1456*
- *Elektronový urychlovač RHODOTRON 10 MeV – 200 kW*

### 10.1 Sušící zařízení ARBURG THERMOLIFT 100 – 2

Toto zařízení slouží k sušení a přípravě navlhavých polymerních materiálů před samotným procesem vstřikování. K obsluze stroje slouží příslušný ovládací panel. Výhoda zařízení spočívá v tom, že s ním lze libovolně manipulovat kolem vstřikovacího stroje. Další výhodou je případná obsluha více vstřikovacích strojů najednou. Polymery, které jsou zbavovány vlhkostí lze dopravovat pomocí hadice přímo do plastikační jednotky vstřikovacího stroje.



Obrázek 28: Sušící zařízení ARBURG THERMOLIFT 100 – 2

## 10.2 Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470H 1000 – 400

Pro výrobu zkušebních těles byl využit vstřikovací stroj model ALLROUNDER 470H od společnosti ARBURG. Daný stroj se skládá z hydraulické uzavírací jednotky, vstřikovací jednotky a také sklopného ovládacího panelu, který je vybaven řídicím systémem SELOGICA. Skrz tento systém lze do stroje zadávat příslušné parametry a prakticky řídit celý vstřikovací proces.



Obrázek 29: Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470H 1000 – 400

### 10.3 Univerzální zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

Tento zkušební stroj lze používat pro testování zkušebních těles na tah, tlak a ohyb. V tomto případě při řešení praktické části posloužilo toto zařízení pro tahovou zkoušku. Součástí stroje je i počítač se softwarem TextXpert v2.1. Pomocí tohoto programu jsou zadávány potřebné parametry pro dané testování. Také jsou zde do počítače zaznamenávány naměřená data při měřeních, kdy daný software vyhodnocuje parametry jako aritmetický průměr, směrodatnou odchylku a variační koeficient. K provádění měření za zvýšených teplot je stroj opatřen temperační komorou ZWICK W91255.



Obrázek 30: Univerzální zkušební stroj ZWICK ROELL 1456

## 10.4 Elektronový urychlovač Rhodotron 10 MeV – 200 kW

Tohoto typu elektronového urychlovače o energii 10 MeV a výkonu 200 kW bylo využito k ozáření zkušebních těles. Princip funkce tohoto urychlovače je obdobný jako u typu urychlovače, který je popsán v teoretické části diplomové práce na obrázku 13 v kapitole 5.3.1.



*Obrázek 31: Elektronový urychlovač Rhodotron 10 MeV – 200 kW [47]*

## 11 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH POLYMERŮ

Pro experiment byly vybrány dva typy polymerů. Jsou to konstrukční polymerní materiály z řad polyamidů, spadající do skupiny termoplastů. Jedná se o tyto polymery:

- *Polyamid 66 GF 30 - V-PTS-CREAMID-A3H7.2G6\*M0129A schwarz*
- *Polyamid 7T GF 56 - V-DURAMID-TH7G12.0SZB\*9207*

Oba tyto polymery jsou plněné skleněnými vlákny. První uvedený materiál (dále jen PA 66 GF 30) je plněn 30 % skleněných vláken, jehož vybrané vlastnosti z materiálového listu jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Vybrané vlastnosti PA 66 GF 30 [48]

Vlastnost	Hodnota	Norma
Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]	1,37	ISO 1183
Vrubová houževnatost [kJ.m <sup>-2</sup> ]	8	ISO 179-1
Modul pružnosti v tahu [MPa]	10000	ISO 527-2
Pevnost v ohybu [MPa]	260	ISO 178
Teplota měknutí dle Vicata [°C]	255	ISO 306
Absorpce vlhkosti [%]	0,6	ISO 62

Druhý polyamid (dále jen PA 7T GF 56) je plněn 56 % skleněnými vlákny. Jeho vlastnosti, deklarované dodavatelem, jsou nastíněny v následující tabulce.

Tabulka 9: Vybrané vlastnosti PA 7T GF 56 [49]

Vlastnost	Hodnota	Norma
Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]	1,63	ISO 1183
Vrubová houževnatost [kJ.m <sup>-2</sup> ]	25	ISO 179-1
Modul pružnosti v tahu [MPa]	19000	ISO 527-2
Pevnost v ohybu [MPa]	290	ISO 178
Teplota měknutí dle Vicata [°C]	229	ISO 306
Absorpce vlhkosti [%]	0,3	ISO 62

Materiály jsou dodávány společností PTS ve formě černých granulí v polyethylenových pytlích o hmotnosti 25 kg. Každý z dodávaných pytlů je opatřený proti zamezení vzdušné vlhkosti, neboť jak je známo, že polyamidy patří mezi hydrofilní materiály. Oba tyto polymerní materiály obsahují polyfunkční monomer TAIC.

## 12 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Následující kapitoly popisují samotné vyhotovení zkušebních těles. Tělesa byla připravena vstřikováním a následně ozářena pro další účely této diplomové práce.

### 12.1 Vstřikování zkušebních těles

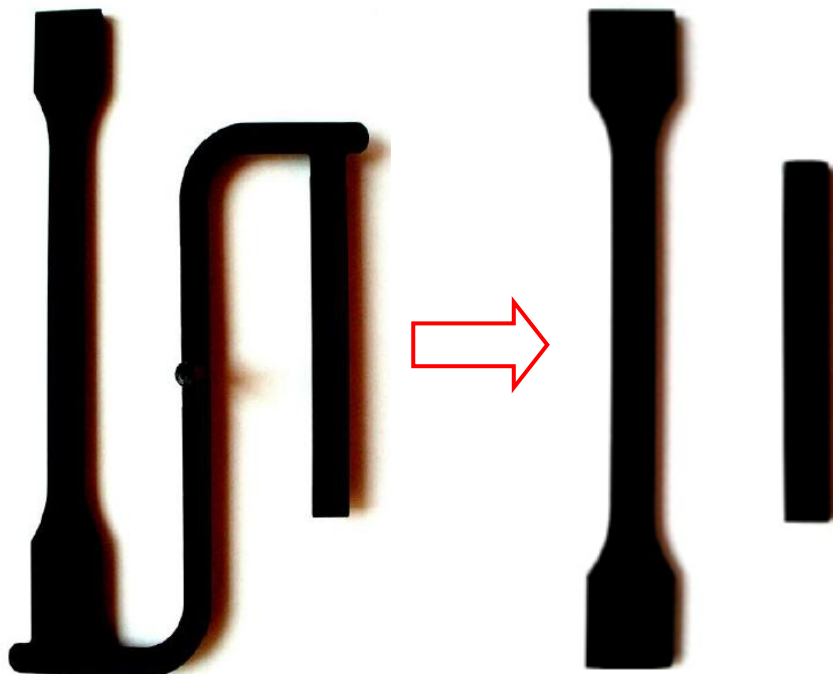
Před vstřikováním bylo zapotřebí vybrané polyamidy vysušit a zbavit dané vlhkosti. Granule obou materiálů byly sušeny v zařízení ARBURG THERMOLIFT 100 – 2 při teplotě 80 °C. PA 66 GF 30 byl sušen 2 hodiny a PA 7T GF 56 v časovém intervalu 2 ÷ 2,5 hodiny.

Po řádném vysušení byly granule polyamidů jednotlivě dopravovány skrz hadici do plastikační jednotky, odkud byly vstřikovány do jednonásobné formy. Vstřikování probíhalo na vstřikovací stroji ARBURG ALLROUNDER 470H 1000 – 400, který je dostupný v dílnách na Ústavu výrobního inženýrství. Byla zhotovena zkušební tělesa ve tvaru “lopatky” a “tyčinky” (viz Obrázek 32).

*Tabulka 10: Procesní parametry vstřikovacího stroje pro jednotlivé polyamidy*

Vstřikovací parametr	PA 66 GF 30	PA 7T GF 56
Vstřikovací tlak [MPa]	88	88
Vstřikovací rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	60	60
Dotlak [MPa]	70	70
Doba dotlaku [s]	25	25
Rychlost dotlaku [mm.s <sup>-1</sup> ]	20	20
Doba chlazení [s]	15	15
Délka vstřikovacího cyklu [s]	48	48
Teplota formy [°C]	75	100
Teplotní pásma plastikační jednotky		
Teplota pod násypkou [°C]	40	40
Teplotní pásmo 1 [°C]	265	260
Teplotní pásmo 2 [°C]	280	260
Teplotní pásmo 3 [°C]	285	280
Teplotní pásmo 4 [°C]	290	285
Teplotní pásmo 5 [°C]	280	290
Teplota na trysce [°C]	275	275

Procesní parametry na vstřikovacím stroji, vynesené v tabulce 10, byly nastaveny dle doporučených hodnot, uvedených v příslušných materiálových listech. Všechna vyhotovená tělesa byla poté pomocí pákových nůžek oddělena od vtokového systému.



Obrázek 32: Vstřikovaná zkušební tělesa

Tvar a rozměry vyhotovených zkušebních těles ve tvaru “lopatky” korespondují s příslušnou normou ISO 527. Tyto rozměry jsou popsány v kapitole 7.1.1 v tabulce 7. Tělesa ve tvaru “tyčinky” byla ponechána pro budoucí výzkumy.

## 12.2 Ozařování zkušebních těles

Ozařování zkušebních těles u vybraných polyamidů bylo provedeno pod záštitou německé společnosti BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG., v pobočce sídlící v lokalitě Saal an der Donau. K ozáření bylo využito účinku urychlených elektronů, resp. beta záření. Jako zdroj záření byl použit toroidní elektronový urychlovač typu Rhodotron 10 MeV – 200 kW. Dávky záření byly zvoleny 66 a 132 kGy. Jednotlivých dávek bylo dosaženo vícero průjezdy ozařovacím scannerem. To proto, aby se předešlo značnému tepelnému namáhání ozařovaných těles. Jeden průjezd zařízením tedy činil 33 kGy. Uvedené dávky záření byly voleny na základě zkušeností z praxe.

Pro dosažení co rovnoměrnější a kvalitnější distribuce dávek záření byla zkušební tělesa vyskládána do jednotlivých palet. Tyto palety byly poté naloženy na válečkový do-

pravník a postupně projížděly ozařovacím zařízením. Ozáření zkušebních těles probíhalo za normální atmosféry při pokojové teplotě.



Obrázek 33: Připravená paleta se zkušebními tělesy určená pro dávku záření 132 kGy

Mimo jiné byl do každé palety se zkušebními tělesy umístěn jeden dozimetr se speciálním vytisknutým čárovým kódem. Dále byl k příslušnému dozimetru vždy přidělen identifikátor, který po průjezdu ozařovacím zařízením zčervenal, což signalizovalo, že došlo k ozáření zkušebních těles na paletě. Toho si lze povšimnout na obrázku 35.



Obrázek 34: Pohled na dozimetr s identifikátorem (1 – před ozářením; 2 – po ozáření)

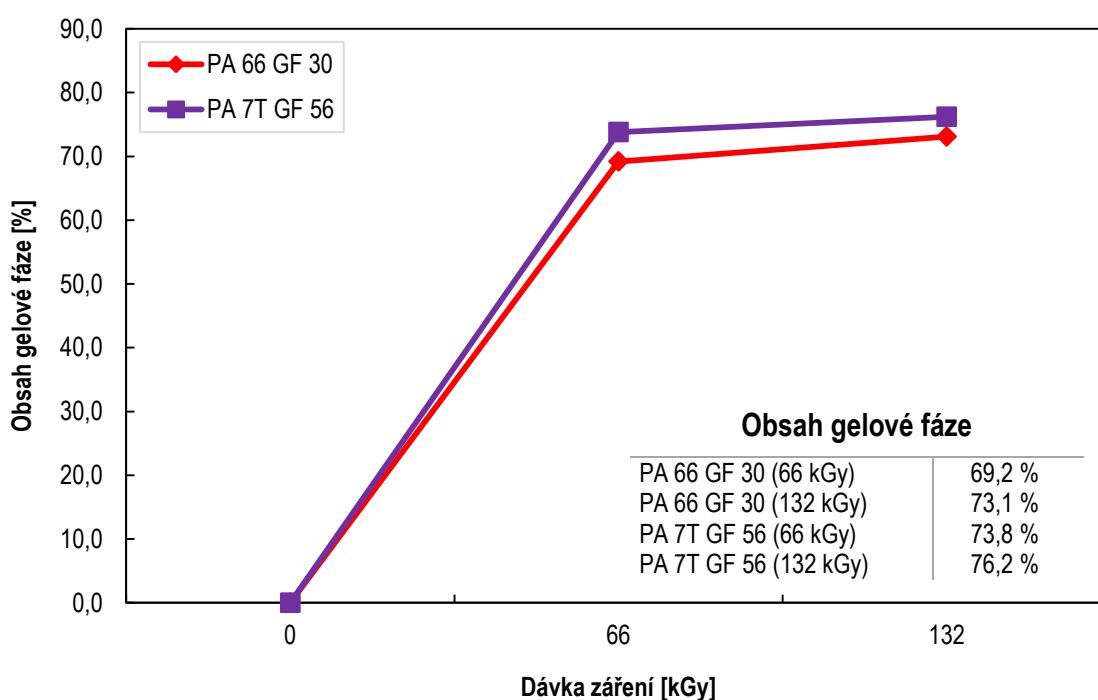
Z dozimetru lze poté po ozáření jednotlivých palet na zkušebním přístroji Spectronic Genesys 5 odečíst skutečná hodnota dávky záření, kterou absorbovala zkušební tělesa.



### 12.2.1 Gelová zkouška

Gelová zkouška se provádí za účelem stanovení stupně obsahu gelové, tedy zesíťované fáze v materiálu. Tudiž se sleduje, do jaké míry daný polymerní materiál zesíťoval. Samotné testování spadá pod normu ČSN EN ISO 579. Testování probíhalo ve společnosti BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG. Jako rozpouštědlo byla použita kyselina mravenčí (HCOOH).

Stupeň obsahu gelové fáze v závislosti na aplikované dávce záření je vyobrazen pro oba typy polyamidů na následujícím obrázku.



Obrázek 35: Naměřené výsledky z gelové zkoušky pro oba polyamidy

Z obrázku 35 je zřejmé, že největšího obsahu gelové fáze bylo dosaženo u PA 7T GF 56 ozářený dávkou 132 kGy. Dále nutno k danému obrázku dodat, že vytvořená spojnice mezi naměřenými hodnotami zastává pouze trend, nikoliv lineární chování.

## 13 TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

V této kapitole je popsáno testování zkušebních těles, dále kapitola zobrazuje naměřené výsledky experimentu diplomové práce. Zkušební tělesa byla podrobena tahové zkoušce. Teoretické podklady pro tuto metodu testování uvádí kapitola 7.

### 13.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška při testování zkušebních těles byla uskutečněna na zkušebním stroji ZWICK ROELL 1456 v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 527-2. Naměřená data byla zpracována do počítače za pomoci softwaru TextXpert v2.1. Byl zde stanoven modul pružnosti v tahu  $E$  [MPa], mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa] a poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\varepsilon_{\sigma M}$  [%]. Pro měření modulu pružnosti v tahu bylo využito přídavného extenzometru, který zaznamenával příslušný modul rychlostí  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Po změření modulu byla následně rychlost testování navýšena na  $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Měření probíhalo celkem v 8 teplotních režimech. Za pokojové teploty  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  a za zvýšených teplot  $50, 80, 110, 140, 170, 200$  a  $230 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pro každou teplotu byla provedena série minimálně 10 měření.

#### 13.1.1 Interpretace naměřených dat

Naměřená data z tahové zkoušky byla zpracována a vyhodnocena za pomoci softwarů MS EXCEL 07 a Minitab 16. Při statistickém zpracování naměřených dat byly vyhodnoceny následující veličiny:

**Aritmetický průměr  $\bar{x}$**  - je definován jako podíl jednotlivých hodnot proměnné  $x_i$  a rozsahu výběrového souboru  $n$  (počet hodnot proměnné). [50]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (23)$$

**Směrodatná odchylka  $s$**  - je definována jako kladná odmocnina výběrového rozptylu. [50]

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (24)$$

**Standardní nejistota typu A**  $u_A$  – je způsobována náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují všeobecně za neznámé. Stanovuje se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek. [51]

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (25)$$

**Variační koeficient**  $V_x$  – vyjadřuje relativní míru variability proměnné  $x$ . Podle níže uvedeného vztahu jej lze stanovit pouze pro proměnné, které nabývají výhradně kladných hodnot. Variační koeficient je bezrozměrný, uvádí se v [%]. Hodnota získaná z definičního vzorce se vynásobí 100 %. [50]

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}} \quad (26)$$

**První (dolní) kvartil**  $Q_1$  – rozděluje datový soubor tak, že 25 % hodnot je menších než tento kvartil a zbytek, tj. 75 % větších (nebo rovných). [50]

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

**Třetí (horní) kvartil**  $Q_3$  – rozděluje datový soubor tak, že 75 % hodnot je menších než tento kvartil a zbytek, tj. 25 % větších (nebo rovných). [50]

**Interkvartilové rozpětí**  $IQR$  – je mírou variability souboru a je definováno jako vzdálenost mezi prvním a třetím kvantilem. [50]

Při statistickém vyhodnocování naměřených výsledků bylo taktéž využito boxplotových grafů, které slouží zejména k odhalení vychýlených hodnot pro danou sérii měření. Na závěr v diskuzi naměřených výsledků byla provedena regresní analýza pro poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\varepsilon_{\sigma M}$  [%].

**Pozn.:** Veškeré konkrétní naměřené hodnoty při tahové zkoušce pro jednotlivé polyamidy (neozářené i ozářené) jsou uvedeny v přílohách P1 ÷ P6. Dále byla také tato data zpracována do příslušného souboru v softwaru EXCEL 07, který je obsažen v příloze P7 na příslušném nosiči CD-ROM.

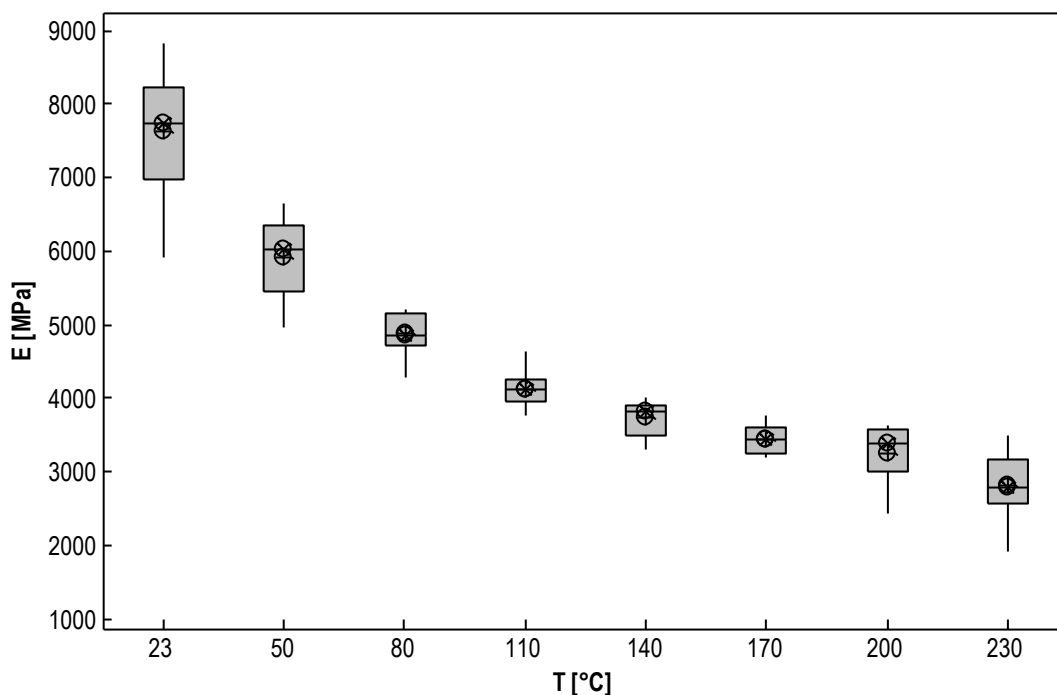
### 13.1.2 Naměřené výsledky pro neozářené polyamidy

#### *PA 66 GF 30:*

Tabulka 11: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu  $E$  [MPa] u neozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_x$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	7640,8	865,1	273,6	11,3	6988,0	7742,2	8236,0	1248,0
50	5914,5	558,6	176,6	9,4	5471,0	6027,1	6350,0	879,0
80	4879,2	288,8	91,3	5,9	4716,7	4867,2	5163,0	446,3
110	4139,2	240,5	76,1	5,8	3974,7	4130,7	4266,2	291,5
140	3746,4	224,6	71,0	6,0	3512,8	3822,9	3895,4	382,6
170	3452,9	206,8	65,4	6,0	3256,8	3453,3	3614,5	357,7
200	3264,3	376,0	118,9	11,5	3003,0	3384,3	3576,0	573,0
230	2817,1	448,7	141,9	15,9	2565,0	2792,3	3185,0	620,0

Je možné si povšimnout, že naměřená data, konkrétně při teplotě 110 °C, jsou nejméně rozptýlena, jak dle interpretovaného box-plotového diagramu tak i nízkého IQR v tabulce 11. Dále je na obrázku 36 vidět, že všechna měření neobsahují žádné vychýlené hodnoty, které by mohly znehodnocovat aritmetický průměr.

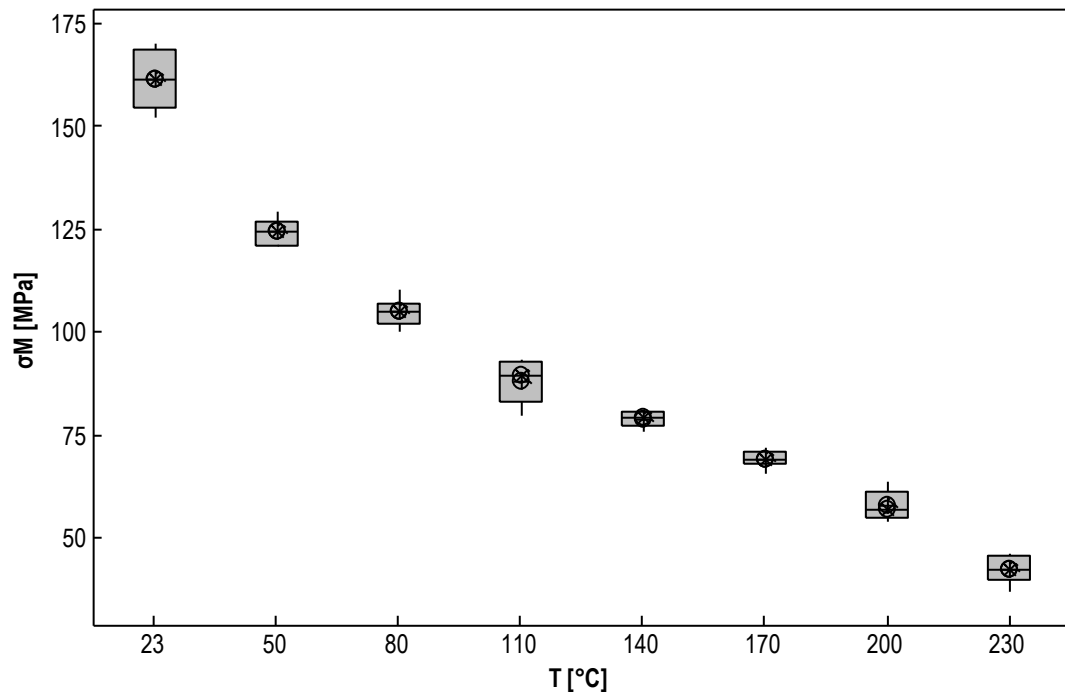


Obrázek 36: Box-plotový diagram pro neozářený PA 66 GF 30 – modul pružnosti v tahu  $E$

Tabulka 12: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa] u neozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	161,69	6,44	2,04	3,98	154,90	161,66	168,64	13,74
50	124,53	3,19	1,01	2,56	121,29	124,51	127,15	5,86
80	104,90	3,06	0,97	2,92	102,22	104,87	107,12	4,89
110	88,16	4,79	1,51	5,43	83,20	89,45	92,84	9,64
140	78,90	1,72	0,54	2,18	77,31	79,15	80,51	3,20
170	69,28	2,00	0,63	2,89	67,90	69,10	71,12	3,21
200	58,02	3,69	1,17	6,36	54,81	56,95	61,37	6,56
230	42,39	3,25	1,03	7,66	40,04	42,48	45,68	5,64

Jak lze z přiložené tabulky (Tabulka 12) vidět, tak u všech měřených teplot nabývají aritmetické průměry a mediány téměř stejných hodnot, což svědčí o dobré kvalitě naměřených výsledků. Nejvíce rozptýlené hodnoty se vyskytují u pokojové teploty 23 °C a poté u teploty 110 °C. Taktéž při měření meze pevnosti v tahu bylo zjištěno, že se zde nevyskytovaly žádné odlehlé hodnoty (viz Obrázek 37).

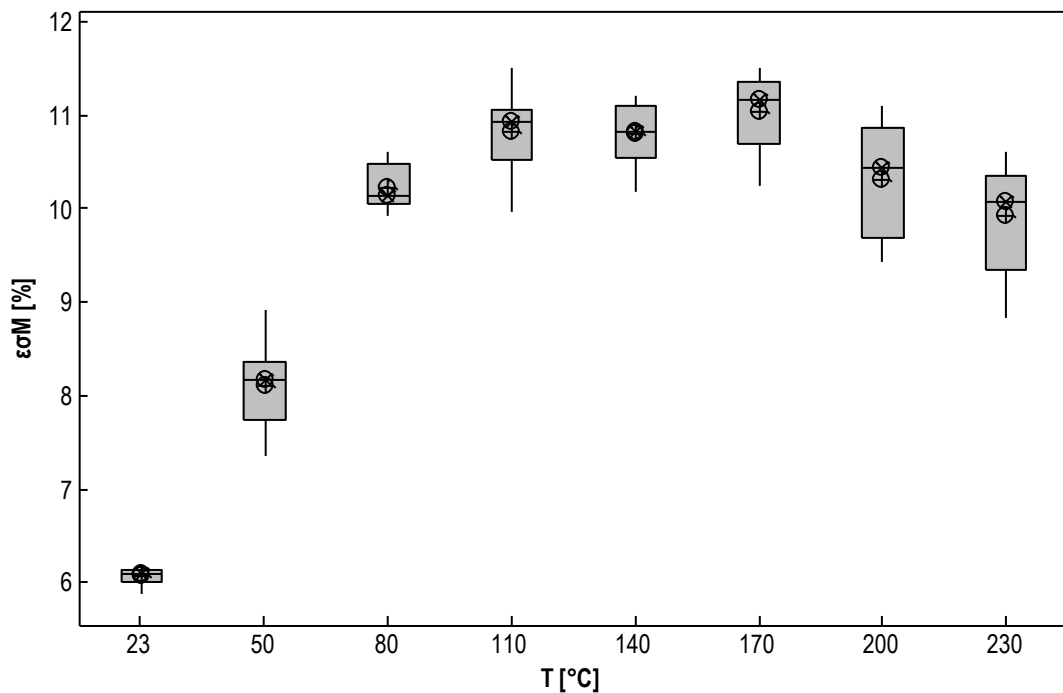


Obrázek 37: Box-plotový diagram pro neozářený PA 66 GF 30 – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$

Tabulka 13: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\varepsilon_{\sigma M}$  [%] u neozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	6,07	0,09	0,03	1,55	6,01	6,10	6,14	0,13
50	8,11	0,45	0,14	5,51	7,74	8,17	8,36	0,62
80	10,23	0,23	0,07	2,25	10,07	10,15	10,48	0,41
110	10,83	0,41	0,13	3,82	10,53	10,94	11,06	0,53
140	10,80	0,35	0,11	3,20	10,56	10,84	11,11	0,55
170	11,04	0,42	0,13	3,79	10,69	11,17	11,36	0,67
200	10,31	0,60	0,19	5,82	9,70	10,45	10,87	0,17
230	9,94	0,59	0,19	5,93	9,35	10,09	10,35	1,00

Při pozorování naměřených výsledků poměrného prodloužení při mezi pevnosti je vidět, že největší kvalitu mají data naměřená za pokojové teploty 23 °C. Nejvíce rozptýlená měření jsou u teplot 200 a 230 °C, u kterých se medián vyskytuje nejdále od aritmetického průměru oproti ostatním teplotám. Variační koeficienty u všech měření nabývají nízkých hodnot, všechny měření jsou zde tedy reprezentativní (Tabulka 13). U box-plotového digramu je vidět, že se zde nevyskytují žádné vychýlené hodnoty (viz Obrázek 38).



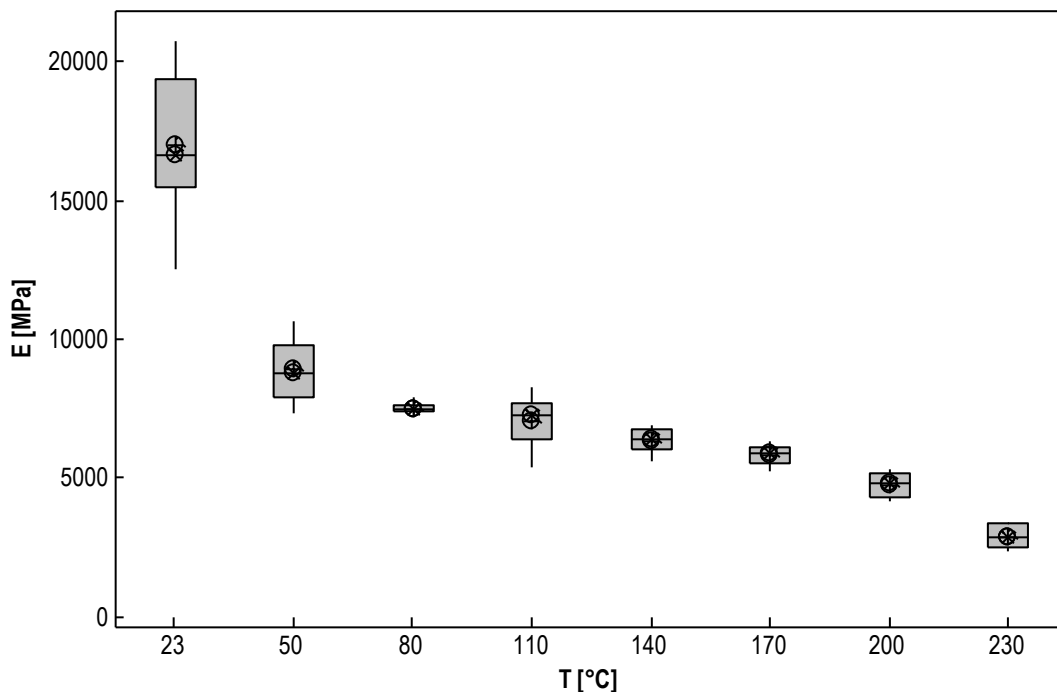
Obrázek 38: Box-plotový diagram pro neozářený PA 66 GF 30 – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\varepsilon_{\sigma M}$

PA 7T GF 56:

Tabulka 14: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu  $E$  [MPa] u neozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	17013,1	2569,5	812,5	15,1	15467,0	16653,1	19375,0	3908,0
50	8953,7	1084,6	343,0	12,1	7936,0	8812,6	9789,0	1853,0
80	7523,2	187,1	59,2	2,5	7410,5	7466,6	7653,8	243,3
110	7060,1	879,2	278,0	12,5	6414,0	7309,6	7688,0	1274,0
140	6347,8	400,8	126,7	6,3	6058,0	6390,2	6767,0	709,0
170	5848,2	373,9	118,2	6,4	5508,0	5886,4	6148,0	640,0
200	4768,3	418,1	132,2	8,8	4332,0	4831,4	5161,0	829,0
230	2903,3	421,0	133,1	14,5	2485,0	2879,9	3357,0	872,0

Jak lze pozorovat na obrázku 39 u box-plotového diagramu, nejvíce rozptýlené hodnoty jsou za pokojové teploty a nejméně rozptýlené při zvýšené teplotě 80 °C, které ukazují nejvyšší kvalitu naměřeného souboru. Jak je zde z diagramu rovněž patrné, tak žádné měření neobsahuje odlehlé hodnoty.

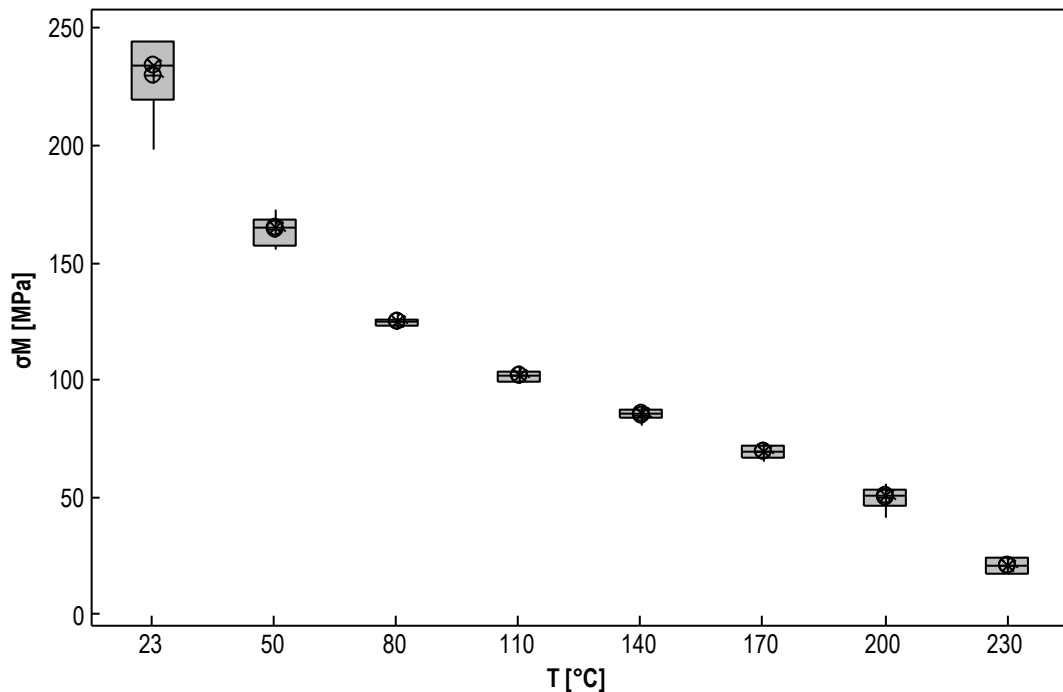


Obrázek 39: Box-plotový diagram pro neozářený PA 7T GF 56 – modul pružnosti v tahu  $E$

Tabulka 15: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa] u neozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	229,66	16,23	5,13	7,07	219,41	234,59	244,13	24,72
50	163,89	5,57	1,86	3,58	157,42	165,26	168,30	10,88
80	124,76	1,52	0,48	1,21	123,63	125,18	125,85	2,23
110	102,10	2,37	0,75	2,32	99,56	102,20	104,06	4,50
140	85,40	2,17	0,69	2,54	84,36	85,51	87,40	3,04
170	69,78	2,67	0,84	3,82	67,11	69,51	72,45	5,35
200	50,22	4,44	1,40	8,84	46,29	51,08	53,66	7,37
230	21,23	2,86	0,91	13,48	17,96	21,30	24,07	6,11

Při pohledu na tabulku 15 je vidět, že nejvíce rozptýlená naměřená data jsou při pokojové teplotě, což ovšem také vyplývá z box-plotového diagramu na obrázku 40, který byl proveden při testech na vychýlené hodnoty. Medián je zde nejvíce vzdálený od aritmetického průměru na rozdíl od ostatních měření. Z výsledného box-plotového diagramu vyplývá, že se zde nevyskytovaly žádné vychýlené hodnoty.



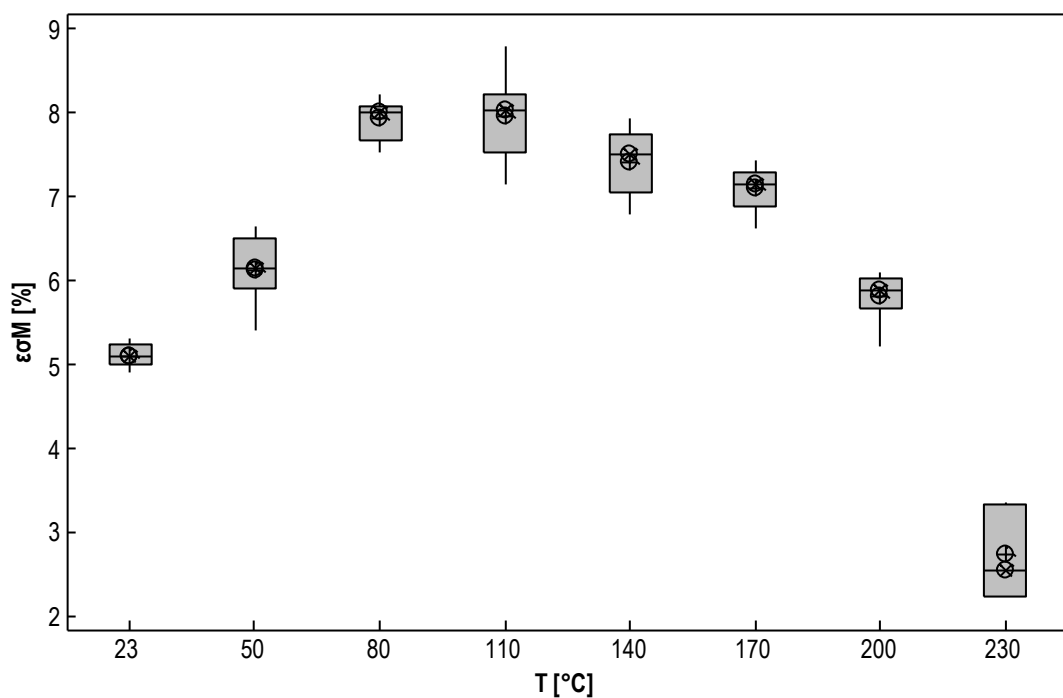
Obrázek 40: Box-plotový diagram pro neozářený PA 7T GF 56 – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$



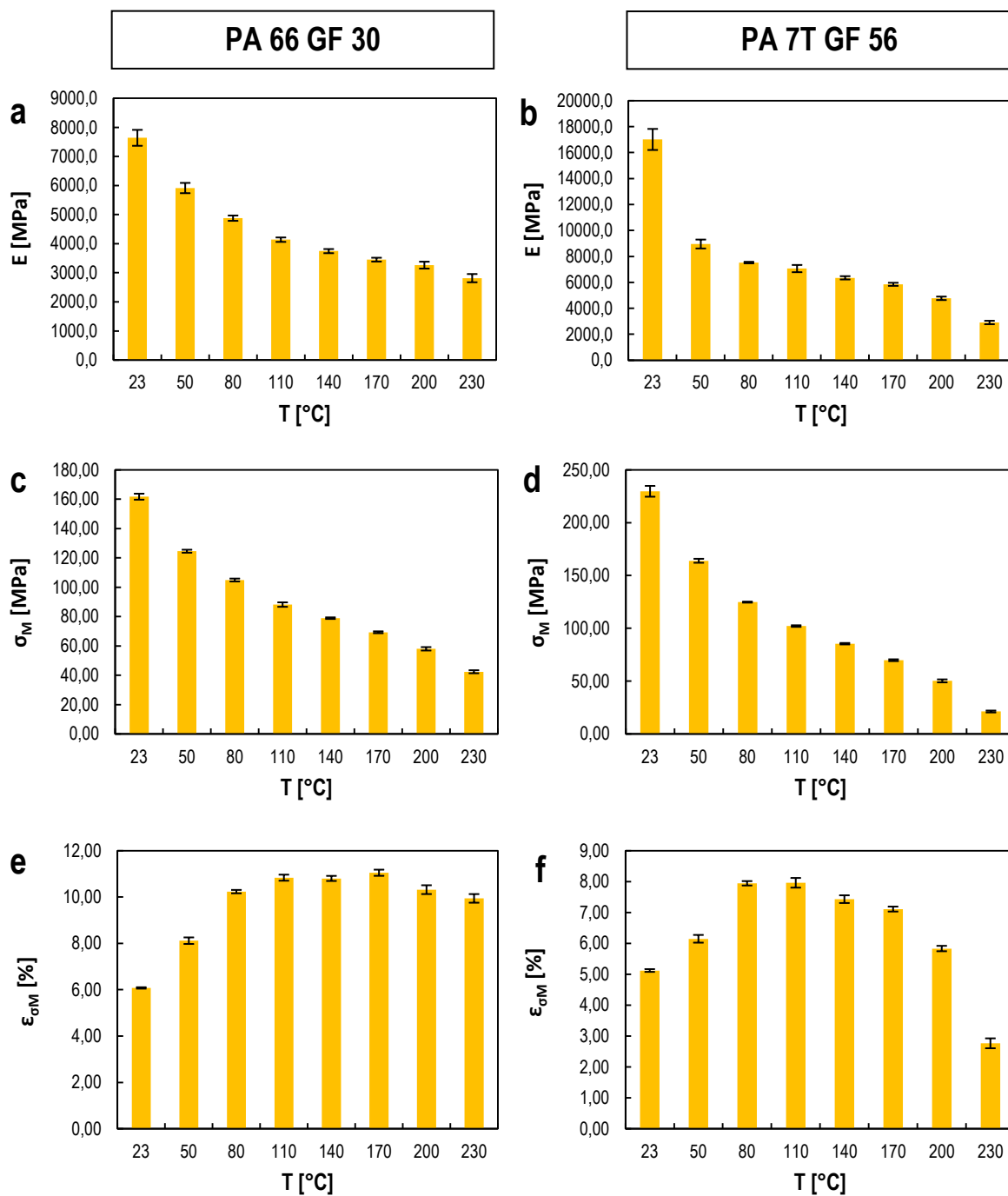
Tabulka 16: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  [%] u neozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	5,12	0,14	0,04	2,73	5,01	5,12	5,25	0,24
50	6,15	0,40	0,13	6,43	5,91	6,16	6,51	0,60
80	7,94	0,23	0,07	2,84	7,69	8,03	8,09	0,41
110	7,96	0,50	0,16	6,23	7,54	8,04	8,22	0,68
140	7,43	0,39	0,13	5,30	7,06	7,51	7,76	0,70
170	7,11	0,25	0,08	3,56	6,90	7,17	7,31	0,41
200	5,83	0,28	0,09	4,75	5,69	5,90	6,04	0,35
230	2,76	0,51	0,16	18,34	2,26	2,56	3,34	1,08

U naměřených výsledků poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu je možné vidět, že největší kvalitu mají data za pokojové teploty. Nejvíce rozptýlené měření je u teploty a 230 °C. Z interpretovaného box-plotového diagramu bylo zjištěno, že se zde neobjevují žádné odlehlé naměřené hodnoty.



Obrázek 41: Box-plotový diagram pro neozářený PA 7T GF 56 - poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$



Obrázek 42: Sumarizace naměřených výsledků z tahové zkoušky pro neozářené polyamidy (a, b – modul pružnosti v tahu  $E$ ; c, d – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$ ; e, f – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{0M}$ )

Jak je patrné na obrázku 42, u obou neozářených polyamidů jak modul pružnosti, tak i mez pevnosti v tahu s rostoucí teplotou klesá. U poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu mají oba typy polyamidů nejprve rostoucí trend a poté již s rostoucí teplotou dochází k poklesu.

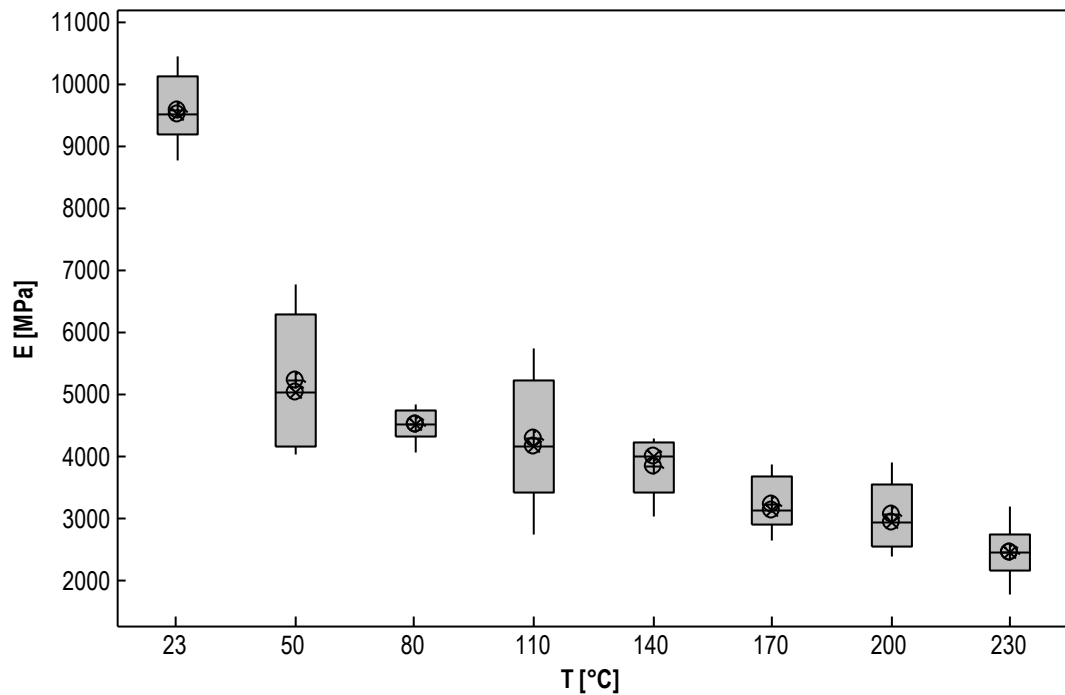
### 13.1.3 Naměřené výsledky pro polyamidy ozářené 66 kGy

#### *PA 66 GF 30:*

Tabulka 17: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu  $E$  [MPa] u PA 66 GF 30 ozářeného 66 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	Q <sub>1</sub>	Medián	Q <sub>3</sub>	IQR
23	9600,4	538,6	170,3	5,6	9192,0	9515,5	10140,0	948,0
50	5229,5	1098,2	347,3	21,0	4171,0	5022,8	6309,0	2138,0
80	4515,9	244,3	77,3	5,4	4331,4	4522,1	4741,1	409,7
110	4289,4	952,6	301,2	22,2	3410,0	4163,5	5219,0	1808,0
140	3827,5	470,2	148,7	12,3	3406,0	4017,8	4224,0	818,0
170	3215,0	412,4	130,4	12,8	2909,0	3115,8	3695,0	786,0
200	3070,4	546,5	172,8	17,8	2556,0	2946,8	3558,0	1002,0
230	2449,6	413,2	130,7	16,9	2148,0	2455,4	2731,0	584,0

Z měření modulu pružnosti v tahu  $E$  je možno vidět, že variační koeficienty  $V_X$  nastíněné v tabulce 17 vykazují až na dvě výjimky (23 a 80 °C) hodnoty vyšší než 10 %. Pro ostatní teploty by bylo nutné provést více měření pro přesnější stanovení výsledků měřené veličiny.

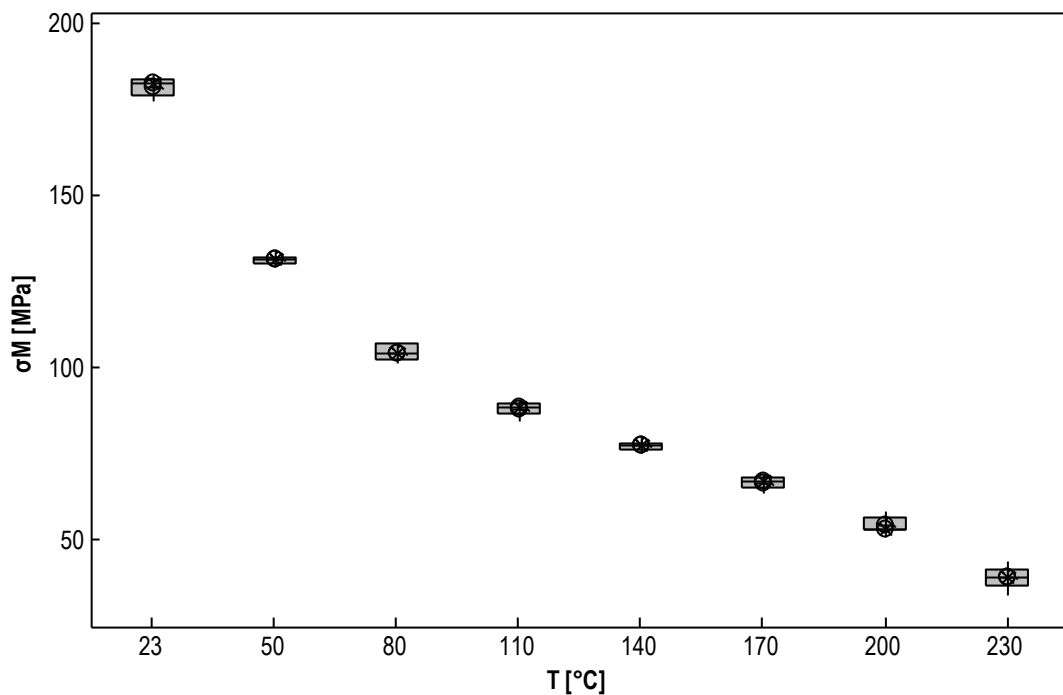


Obrázek 43: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy – modul pružnosti v tahu  $E$

Tabulka 18: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa] u PA 66 GF 30 ozářeného 66 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	181,80	2,59	0,82	1,43	179,45	182,77	183,91	4,45
50	131,32	0,95	0,30	0,72	130,58	131,41	132,19	1,62
80	104,50	2,13	0,67	2,04	102,42	104,24	106,90	4,48
110	88,17	1,92	0,61	2,18	86,87	88,52	89,71	2,84
140	77,41	1,28	0,40	1,65	76,18	77,62	78,27	2,09
170	66,69	1,73	0,55	2,59	65,08	67,12	67,93	2,85
200	54,35	2,38	0,75	4,38	52,87	53,29	56,32	3,45
230	38,91	3,06	0,97	7,85	36,85	38,88	41,39	4,54

Z naměřených výsledků meze pevnosti v tahu pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy lze na základě malých rozptylů naměřených dat, hodnot  $V_X$ , IQR atd., konstatovat, že mají vysokou vypovídající hodnotu. Rovněž box-plotový diagram (Obrázek 44), který nezaznamenal žádnou vychýlenou hodnotu, poukazuje na tuto skutečnost.

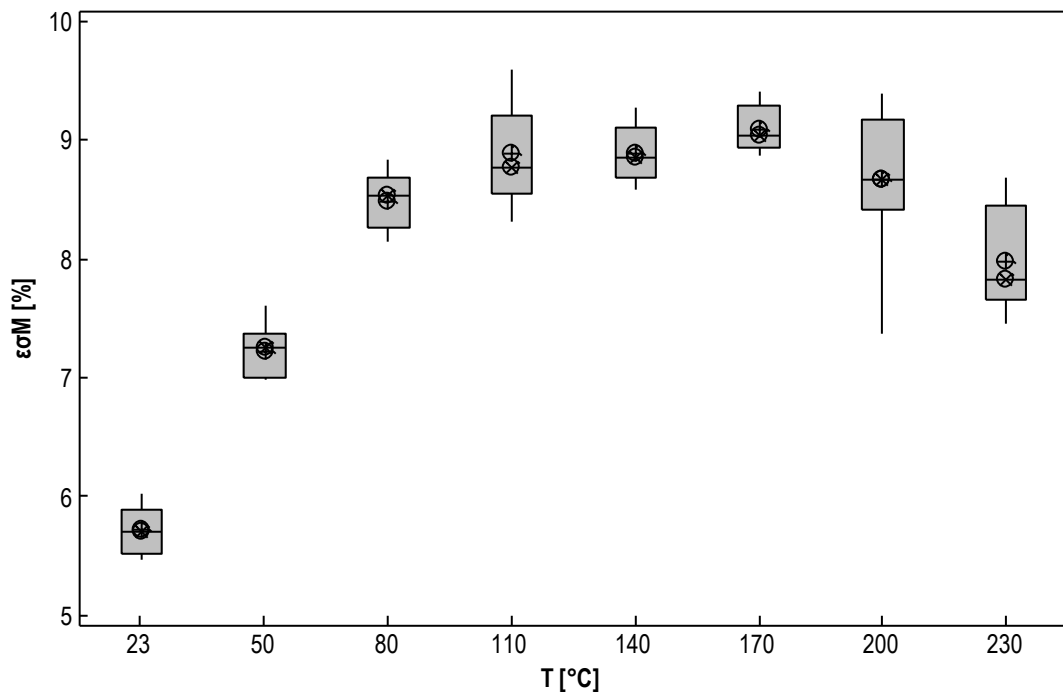


Obrázek 44: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$

Tabulka 19: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  [%] u PA 66 GF 30 ozářeného 66 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	5,72	0,19	0,06	3,38	5,52	5,71	5,90	0,38
50	7,22	0,22	0,07	3,00	7,00	7,26	7,37	0,37
80	8,49	0,24	0,08	2,82	8,27	8,53	8,68	0,42
110	8,88	0,42	0,13	4,74	8,56	8,78	9,21	0,65
140	8,89	0,23	0,07	2,57	8,69	8,86	9,11	0,42
170	9,09	0,18	0,06	2,02	8,94	9,04	9,29	0,35
200	8,68	0,58	0,18	6,68	8,41	8,67	9,18	0,77
230	7,99	0,44	0,14	5,49	7,66	7,84	8,44	0,79

Při pozorování výsledků poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu jsou zaznamenány v tabulce nízké hodnoty nejistoty typu  $u_A$ , interkvartilového rozpětí IQR a také variační koeficienty jsou zde nižší než 10 %. Mediány se s aritmetickým průměrem od sebe téměř neliší až na teploty 110 a 230 °C. Ani tady se nevyskytují odlehlé hodnoty (viz Obrázek 45).



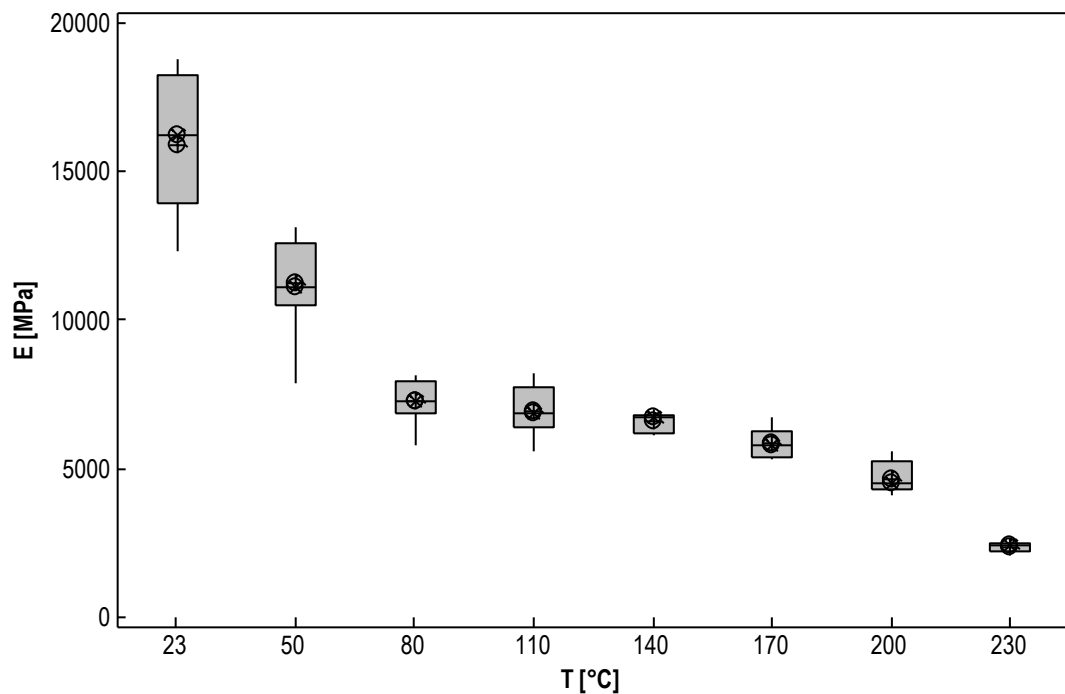
Obrázek 45: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$

PA 7T GF 56:

Tabulka 20: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu  $E$  [MPa] u PA 7T GF 56 ozářeného 66 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	15888,1	2305,0	728,9	14,51	13910,0	16255,1	18268,0	4357,0
50	11234,0	1568,3	495,9	13,96	10479,0	11079,6	12562,0	2083,0
80	7256,8	709,3	224,3	9,77	6899,0	7289,2	7915,0	1016,0
110	6954,2	793,5	250,9	11,41	6428,0	6873,6	7765,0	1337,0
140	6569,1	324,3	102,5	4,94	6211,0	6716,6	6804,0	593,0
170	5851,8	476,6	150,7	8,14	5375,0	5790,3	6263,0	889,0
200	7467,8	497,4	157,3	10,65	4306,0	4486,1	5231,0	927,0
230	2372,1	185,7	58,7	7,83	2204,5	2425,2	2514,9	310,3

Z tabulky 20 je patrné, že nejmenším variačním koeficientem disponuje měření modulu pružnosti v tahu  $E$  při teplotě 140 °C. Při testu na vychýlené hodnoty (Obrázek 46), interpretovaném příslušným box-plotovým diagramem je jasné, že ani zde se nevyskytují žádné vychýlené hodnoty.

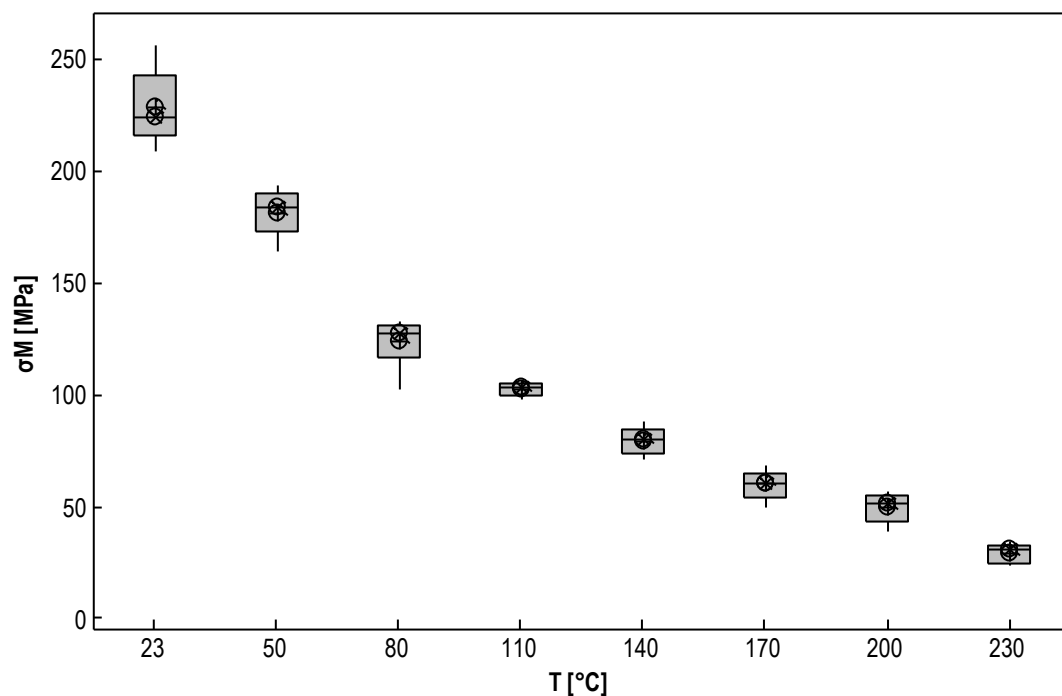


Obrázek 46: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy – modul pružnosti v tahu  $E$

Tabulka 21: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa] u PA 7T GF 56 ozářeného 66 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	228,72	15,84	5,01	6,92	216,22	224,08	242,65	26,43
50	181,11	9,67	3,06	5,34	173,41	183,73	190,18	16,76
80	123,99	9,55	3,02	7,70	116,48	127,13	130,88	14,40
110	102,72	2,93	0,93	2,85	99,94	103,44	105,53	5,59
140	79,61	5,55	1,76	6,98	73,83	79,81	84,26	10,43
170	60,18	6,13	1,94	10,19	54,76	60,35	65,42	10,65
200	49,70	6,23	1,97	12,54	43,87	51,90	54,84	10,97
230	29,43	4,31	1,36	14,64	24,70	30,94	33,32	8,62

Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu zde ukazují dobrou kvalitu a vypovídající hodnotu. Z tabulky 21 i box-plotového diagramu na obrázku 47 lze konstatovat, že nejvíce jsou rozptýleny hodnoty za pokojové teploty. Žádná odlehlá hodnota také v tomto případě nebyla nalezena.

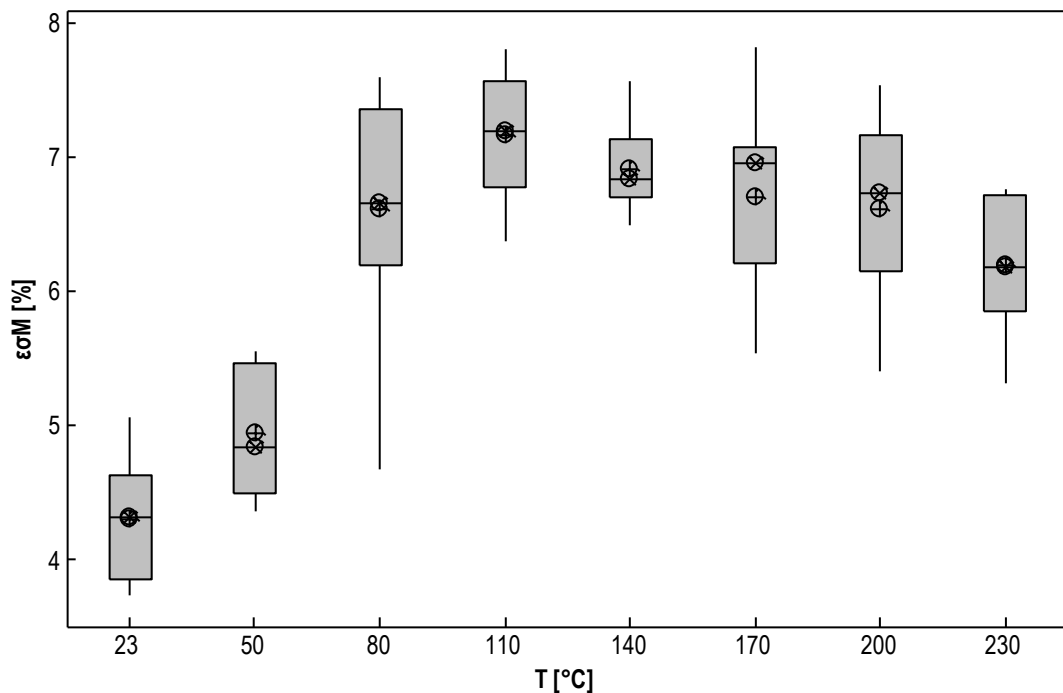


Obrázek 47: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$

Tabulka 22: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  [%] u PA 7T GF 56 ozářeného 66 kGy při různých teplotách

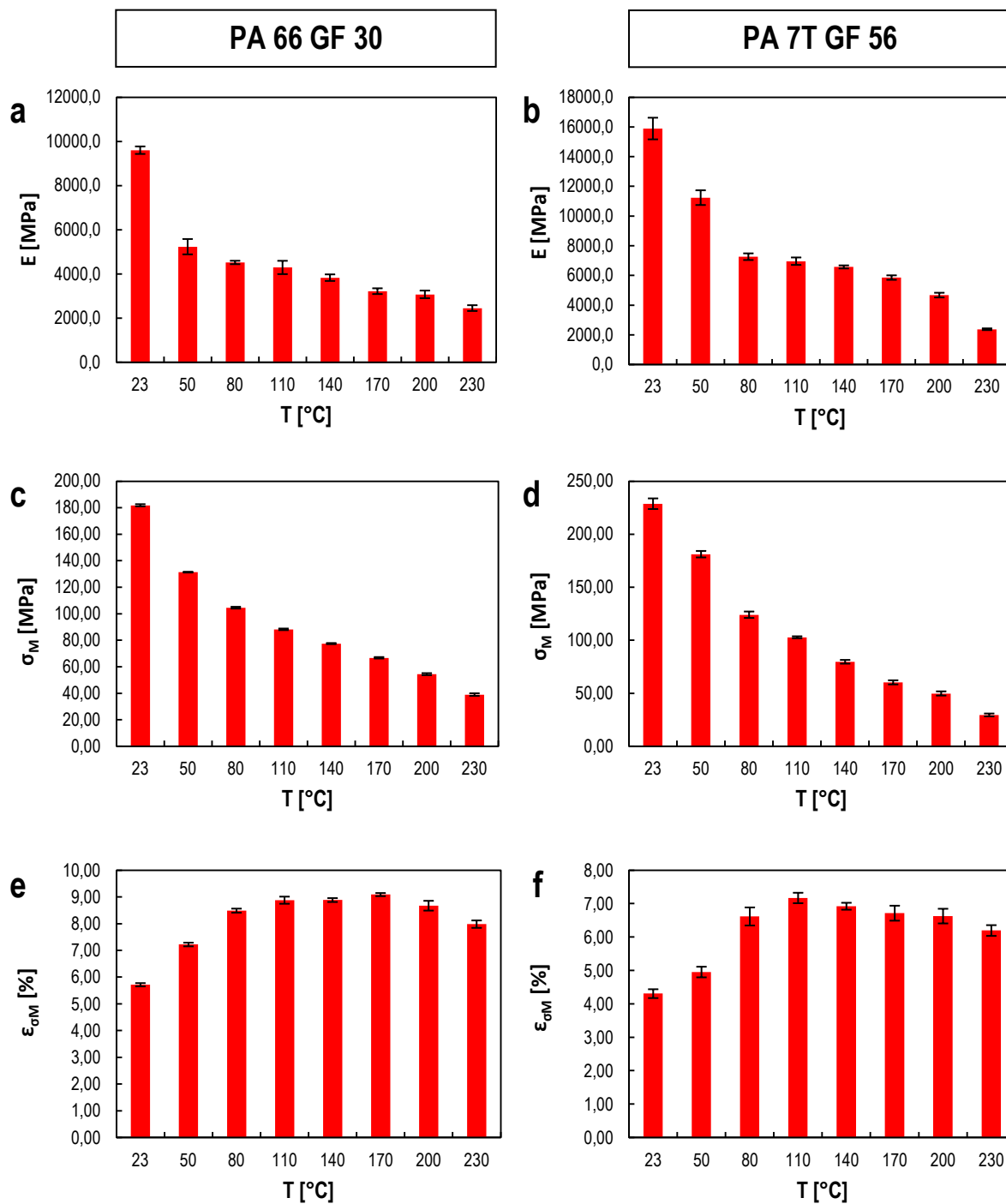
T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	4,31	0,42	0,13	9,70	3,86	4,32	4,64	0,77
50	4,96	0,50	0,16	10,15	4,51	4,85	5,48	0,97
80	6,62	0,85	0,27	12,91	6,20	6,66	7,36	1,16
110	7,17	0,49	0,16	6,90	6,79	7,20	7,57	0,78
140	6,92	0,33	0,10	4,73	6,71	6,85	7,14	0,43
170	6,72	0,71	0,22	10,54	6,22	6,97	7,08	0,86
200	6,63	0,69	0,22	10,44	6,17	6,75	7,18	1,01
230	6,20	0,51	0,16	8,20	5,87	6,20	6,72	0,85

Nejméně rozptýlené hodnoty se nachází u teploty 140 °C a u pokojové teploty 23 °C. Naopak nejvíce rozptýlené jsou za teploty 80 °C. Nejdále leží aritmetický průměr od mediánu u teploty 170 °C při porovnání s ostatními soubory měření. Žádné vychýlené hodnoty zde nebyly zaznamenány, jak je možné pozorovat na obrázku 48. Dle rozptýlených hodnot by bylo vhodné pro zkoumání  $\epsilon_{\sigma M}$  provést většího počtu měření za všech příslušných teplot.



Obrázek 48: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$





Obrázek 49: Sumarizace naměřených výsledků z tahové zkoušky pro polyamidy ozářené 66 kGy (a, b – modul pružnosti v tahu  $E$ ; c, d – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$ ; e, f – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{0M}$ )

Jak je patrné na obrázku 49, u obou typů polyamidů, ozářených dávkou 66 kGy, jak modul pružnosti, tak i mez pevnosti v tahu s rostoucí teplotou klesá. Poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu u PA 66 GF 30 roste až po teplotu 170 °C, poté již klesá. Za to u PA 7T GF 56 rostlo do teploty 110 °C a poté mělo klesající trend.

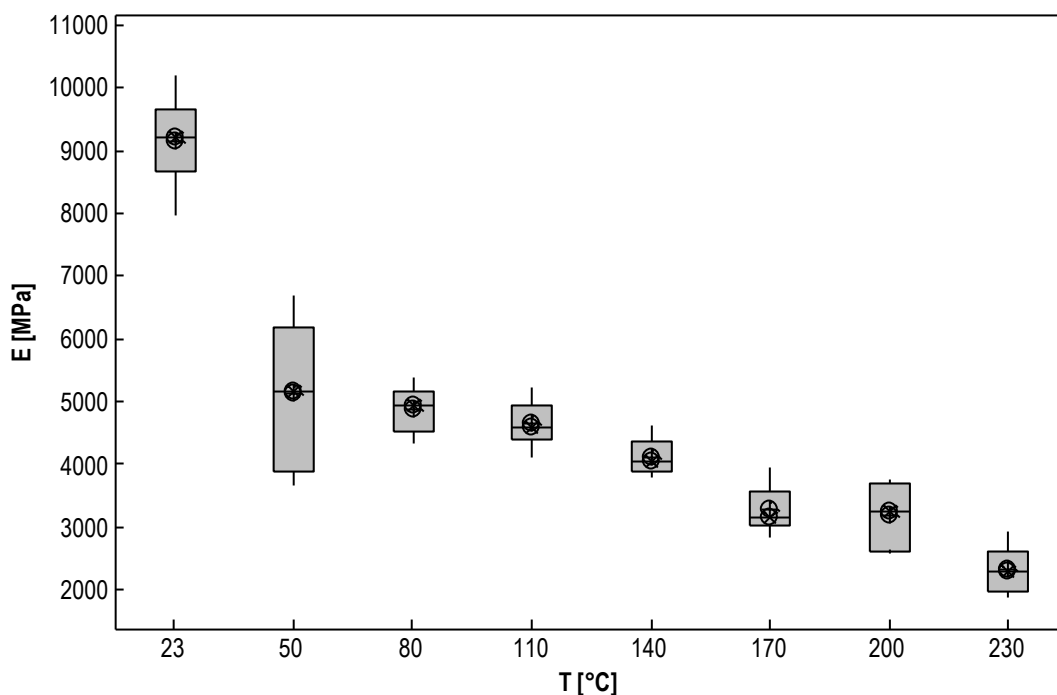
### 13.1.4 Naměřené výsledky pro polyamidy ozářené 132 kGy

*PA 66 GF 30:*

Tabulka 23: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu  $E$  [MPa] u PA 66 GF 30 ozářeného 132 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_x$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	9155,2	691,9	218,8	7,56	8677,0	9219,3	9660,0	984,0
50	5148,1	1106,4	349,9	21,49	3879,0	5156,3	6183,0	2304,0
80	4887,3	351,4	111,1	7,19	4529,0	4947,2	5168,0	639,0
110	4656,0	341,7	108,0	7,34	4405,0	4590,6	4950,0	545,0
140	4127,2	278,9	88,2	6,76	3891,2	4060,2	4375,6	484,5
170	3286,3	360,8	114,1	10,98	3049,0	3162,8	3566,0	517,0
200	3203,0	505,8	160,0	15,79	2634,0	3254,8	3703,0	1068,0
230	2329,3	382,5	121,0	16,42	1993,0	2293,9	2615,0	621,0

Při testu na odlehlé hodnoty bylo zjištěno, že se u žádné teploty taková hodnota neobjevovala. Jak je dále z obrázku 50 patrné, nejvíce jsou rozptýlené hodnoty u teploty 50 °C. Této teplotě rovněž odpovídá fakt, že nabývá vysokého variačního koeficientu a také interkvartilového rozpětí. Bylo by proto nezbytně nutné provést zde více měření.

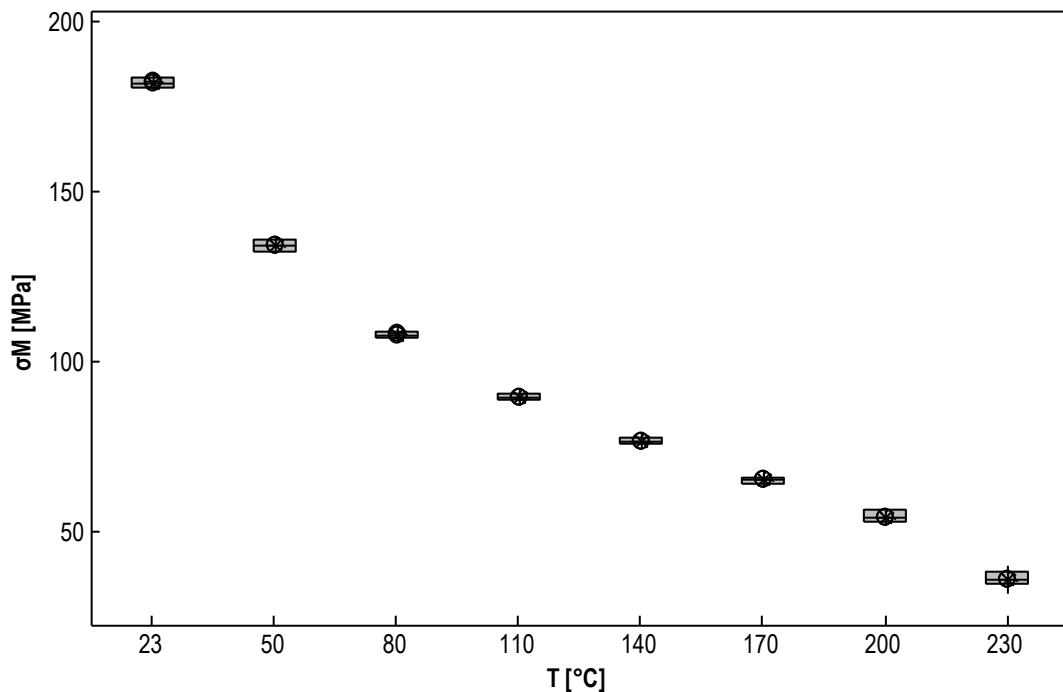


Obrázek 50: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 132 kGy – modul pružnosti v tahu  $E$

Tabulka 24: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa] u PA 66 GF 30 ozářeného 132 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	182,22	1,49	0,47	0,82	180,78	182,13	183,59	2,81
50	134,15	1,64	0,52	1,23	132,65	134,27	135,75	3,10
80	108,03	1,13	0,36	1,04	107,31	107,95	109,09	1,78
110	89,48	1,15	0,36	1,29	88,64	89,56	90,48	1,84
140	76,66	1,06	0,34	1,38	75,79	76,38	77,61	1,82
170	65,10	1,02	0,32	1,57	64,15	65,12	65,98	1,83
200	54,13	1,74	0,55	3,22	52,74	53,93	56,26	3,52
230	36,14	2,41	0,76	6,66	34,76	36,10	38,02	3,26

Data uvedená v tabulce 24 mají dobrou reprezentativní hodnotu. Aritmetický průměr má klesající charakter s rostoucí teplotou (Tabulka 24, Obrázek 51) a zaujímá téměř stejnou hodnotu jako medián ve všech případech měření. Taktéž variační koeficienty zde vycházejí nízké. Jak je na obrázku 51 uvedeno, žádné vychýlené hodnoty se zde i v tomto případě nevyskytují.

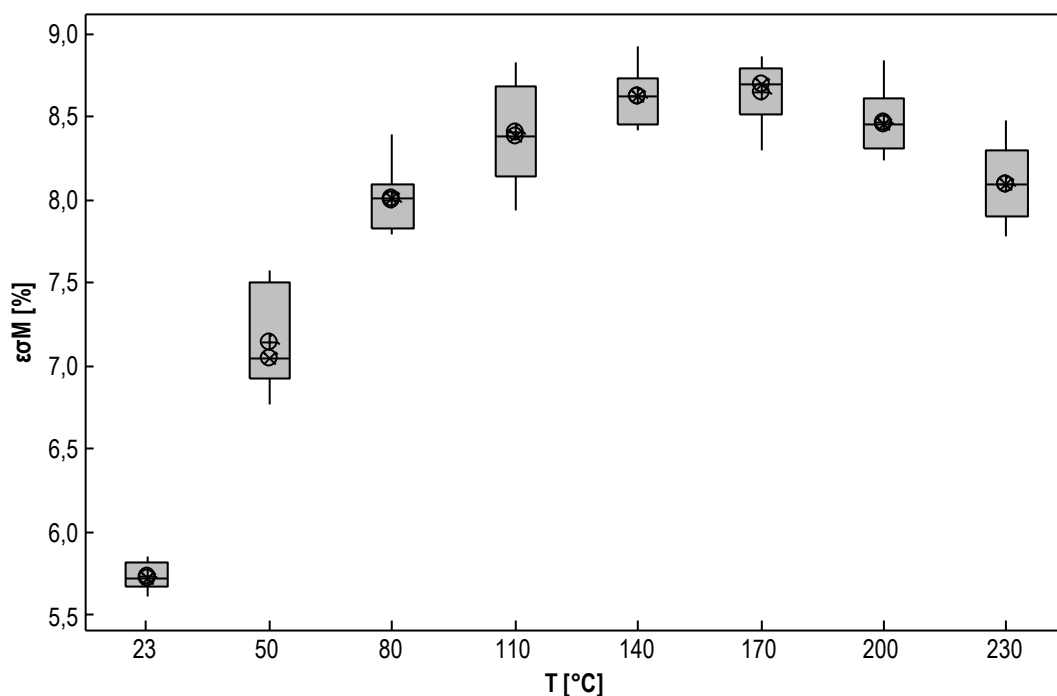


Obrázek 51: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 132 kGy – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$

Tabulka 25: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  [%] u PA 66 GF 30 ozářeného 132 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	5,74	0,08	0,03	1,40	5,68	5,73	5,82	0,14
50	7,15	0,29	0,09	4,03	6,93	7,05	7,51	0,58
80	8,00	0,20	0,06	2,46	7,83	8,01	8,10	0,27
110	8,40	0,30	0,09	3,52	8,15	8,39	8,68	0,53
140	8,63	0,17	0,05	1,99	8,45	8,63	8,73	0,28
170	8,65	0,19	0,06	2,17	8,51	8,70	8,79	0,28
200	8,47	0,19	0,06	2,19	8,31	8,46	8,61	0,30
230	8,10	0,23	0,07	2,82	7,91	8,10	8,30	0,39

Při vyhodnocování poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu je zde vidět, že naměřené výsledky  $\epsilon_{\sigma M}$  mají dobrou vypovídající hodnotu (viz Tabulka 25). Na obrázku 52 je vidět, že nejvíce je od sebe vzdálený aritmetický průměr od mediánu za zvýšené teploty 50 °C. Dále při pohledu na obrázek 52 s box-plotovým diagramem je zřejmé, že při testu na vychýlené hodnoty u  $\epsilon_{\sigma M}$  se žádné tyto hodnoty neobjevily.

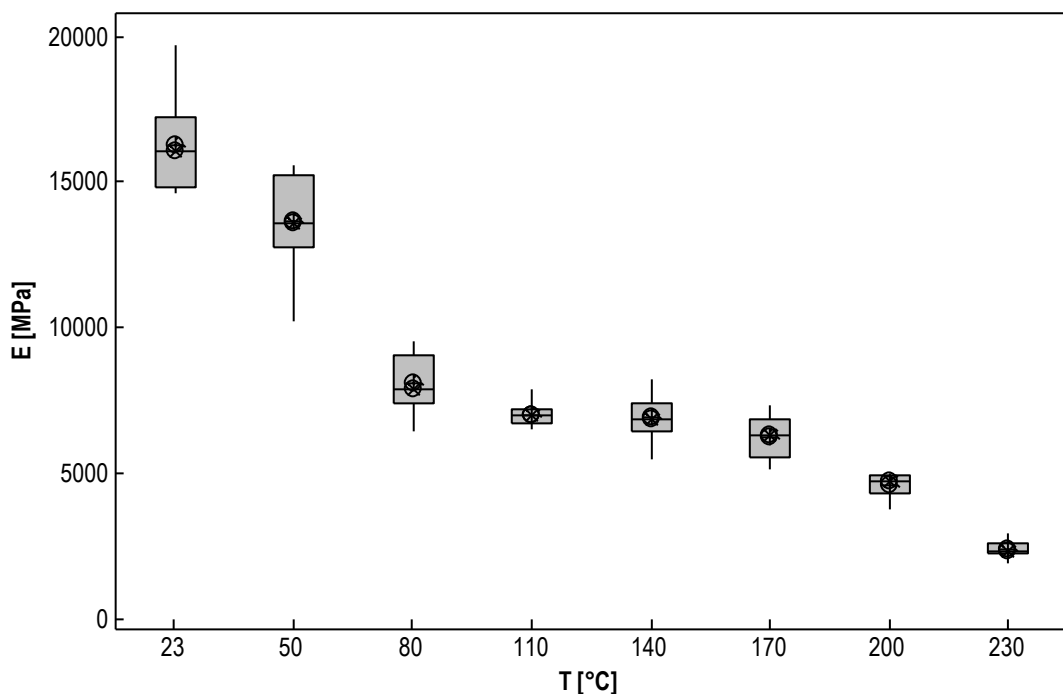


Obrázek 52: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 132 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$

PA 7T GF 56:Tabulka 26: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu  $E$  [MPa] u PA 7T GF 56 ozářeného 132 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	16309,3	1655,7	523,6	10,15	14860,0	16086,4	17227,0	2367,0
50	13635,6	1643,8	519,8	12,06	12769,0	13617,3	15226,0	2457,0
80	8088,8	995,8	314,9	12,31	7376,0	7918,9	9090,0	1714,0
110	7015,5	396,0	125,2	5,64	6703,0	7023,3	7188,0	485,0
140	6916,1	799,2	252,7	11,56	6477,0	6851,8	7432,0	955,0
170	6244,1	755,4	238,9	12,10	5580,0	6331,4	6845,0	1265,0
200	4591,9	421,5	133,3	9,18	4330,0	4711,9	4939,0	609,0
230	2403,3	290,3	91,8	12,08	2237,8	2336,7	2581,3	343,5

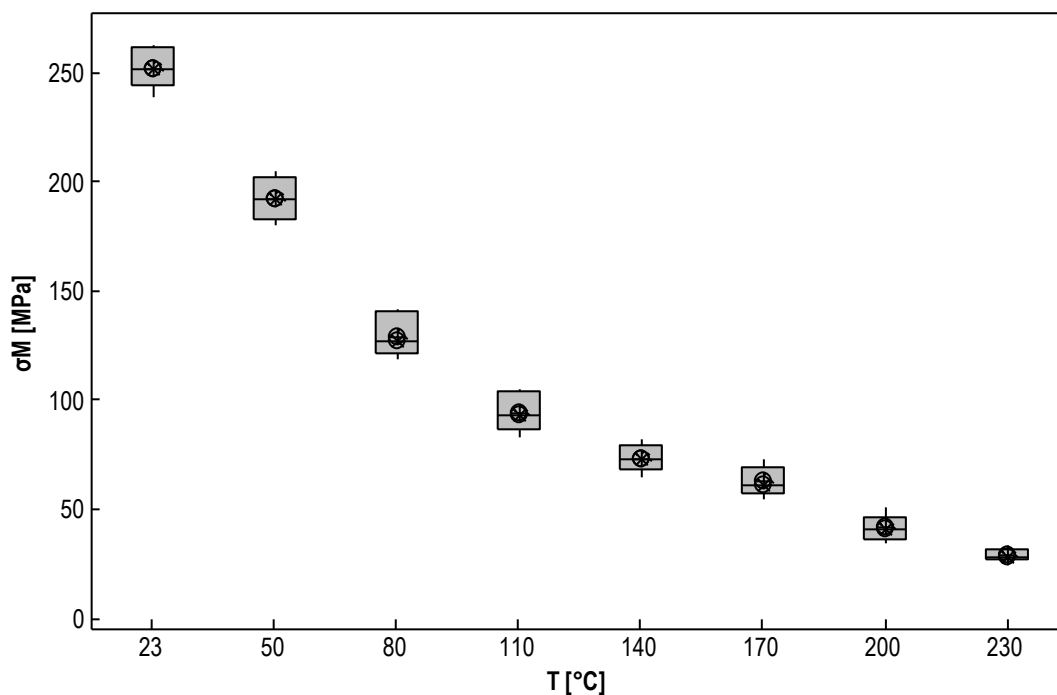
Z tabulky 26 je jasné, že nejvíce rozptýlená data jsou za teploty 50 °C, poté za pokojové teploty a na třetím místě figuruje teplota 80 °C. Nejlepší vypovídající hodnotu vykazují výsledky při teplotě 110 °C, kde je možno zaregistrovat nízký  $V_X$  a IQR. Dále je možné vidět, že se zde žádné vychýlené hodnoty nevyskytují (Obrázek 53).

Obrázek 53: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy – modul pružnosti v tahu  $E$

Tabulka 27: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa] u PA 7T GF 56 ozářeného 132 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	252,09	8,90	2,81	3,53	244,25	251,84	262,42	18,17
50	192,55	9,80	3,10	5,09	182,94	191,92	202,54	19,60
80	129,41	9,00	2,85	6,96	121,34	127,66	140,93	19,59
110	94,53	8,09	2,56	8,56	87,19	93,19	103,96	16,76
140	73,59	6,10	1,93	8,29	68,84	73,47	79,31	10,47
170	62,90	6,31	2,00	10,03	57,51	60,88	69,30	11,79
200	41,63	5,65	1,79	13,58	36,86	40,91	46,29	9,43
230	29,25	2,96	0,94	10,11	27,06	28,37	32,14	5,08

Z tabulky 27 je patrné, že u naměřených výsledků  $\sigma_M$  za příslušných teplot disponuje nejnižším rozptylem řada měření za nejvyšší teploty a to 230 °C. Dále dle druhého nejmenšího IQR má malý rozptyl měření u teploty 200 °C, zde se naopak nejvíce podílí směrodatná odchylka na  $\bar{x}$  při porovnání s ostatními řadami měření, jak je vidět u variačního koeficientu 13,58 %. Žádná vychýlená hodnota se i tady neobjevila, jak je možné shlédnout na obrázku 54.

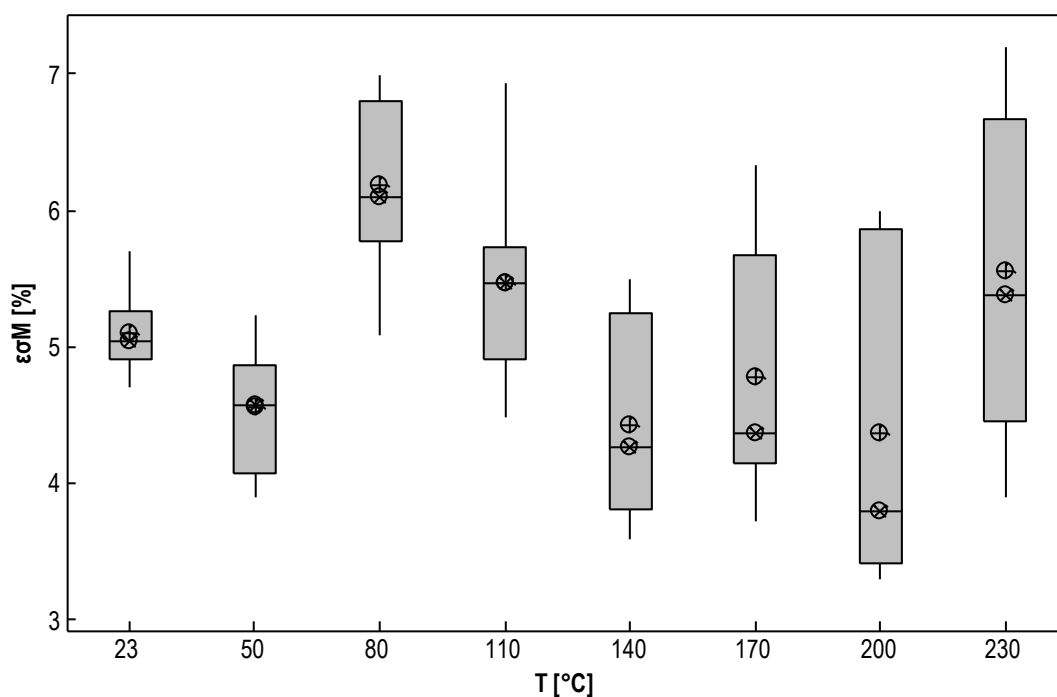


Obrázek 54: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$

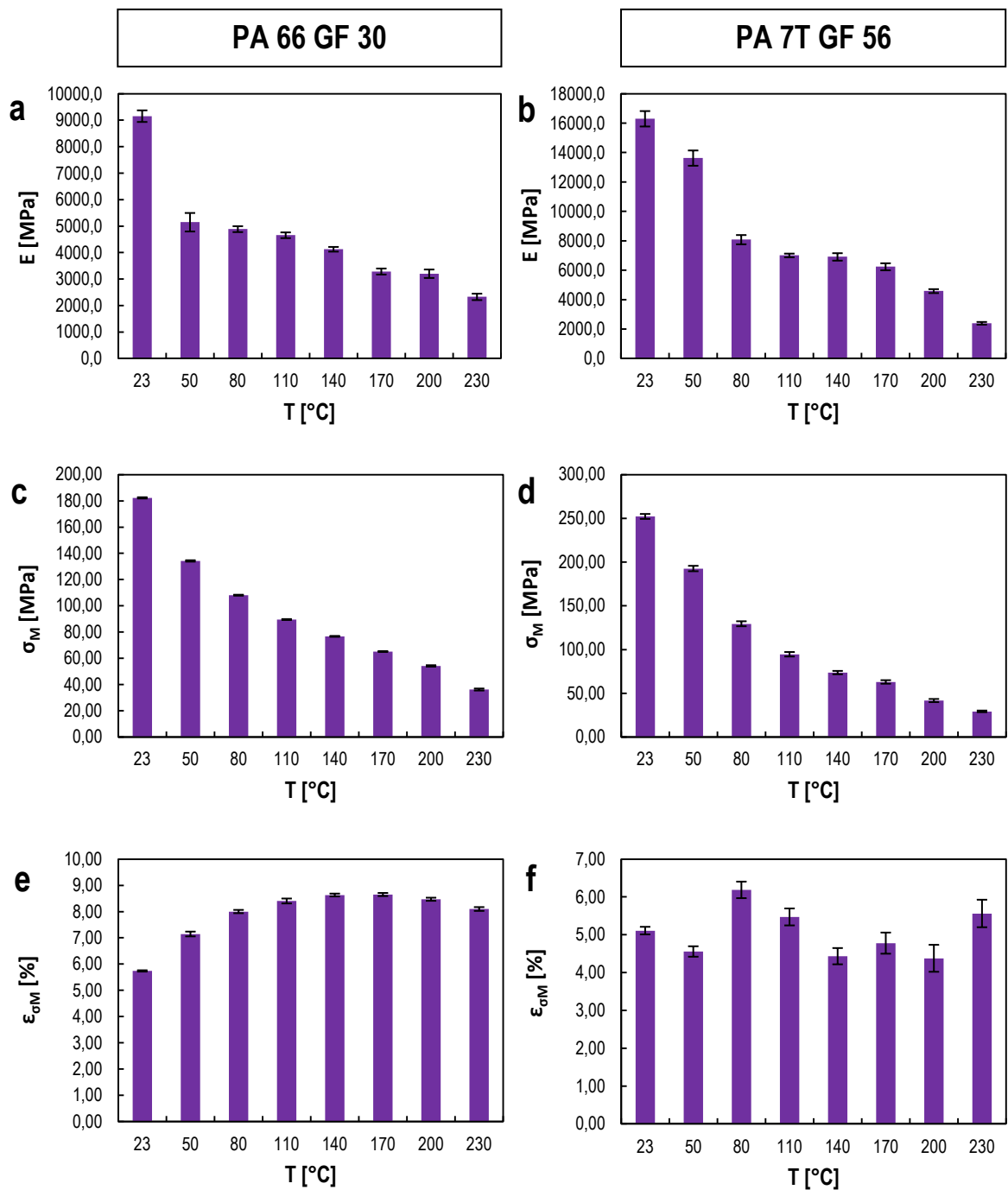
Tabulka 28: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  [%] u PA 7T GF 56 ozářeného 132 kGy při různých teplotách

T [°C]	$\bar{x}$	s	$u_A$	$V_X$	$Q_1$	Medián	$Q_3$	IQR
23	5,11	0,32	0,10	6,21	4,92	5,04	5,27	0,35
50	4,56	0,44	0,14	9,57	4,08	4,57	4,87	0,79
80	6,19	0,69	0,22	11,16	5,78	6,10	6,81	1,03
110	5,47	0,71	0,22	12,95	4,92	5,48	5,74	0,82
140	4,43	0,68	0,22	15,33	3,81	4,27	5,25	1,44
170	4,78	0,88	0,28	18,49	4,16	4,37	5,68	1,52
200	4,38	1,13	0,36	25,77	3,42	3,80	5,86	2,44
230	5,56	1,15	0,36	20,67	4,46	5,39	6,67	2,21

Jak už bylo uvedeno u předchozích výsledků, tak i zde v tomto případě by u všech teplot prospělo provést větší kvantitu měření. Při pohledu na tabulku 28 i obrázek 55 je možné vidět, že za pokojové teploty jsou hodnoty nejméně rozptýleny. Naopak nejvíce rozptýleny jsou při teplotě 200 °C a 230 °C. Jak uvádí box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy, který byl použit při vyhodnocování  $\epsilon_{\sigma M}$ , žádné vychýlené hodnoty zde nejsou.



Obrázek 55: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$



Obrázek 56: Sumarizace naměřených výsledků z tahové zkoušky pro polyamidy ozářené 132 kGy (a, b – modul pružnosti v tahu  $E$ ; c, d – mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$ ; e, f – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$ )

Jak je z obrázku 56 zřejmé, u obou typů polyamidů, ozářených dávkou 132 kGy modul pružnosti i mez pevnosti v tahu s rostoucí teplotou klesají. Poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu u PA 66 GF 30 roste až po teplotu 170 °C a poté klesá. Pro PA 7T GF 56 má chování  $\epsilon_{\sigma M}$  nepravidelný charakter, jak je možno vidět na obrázku 56f.



## 14 DISKUZE VÝSLEDKŮ

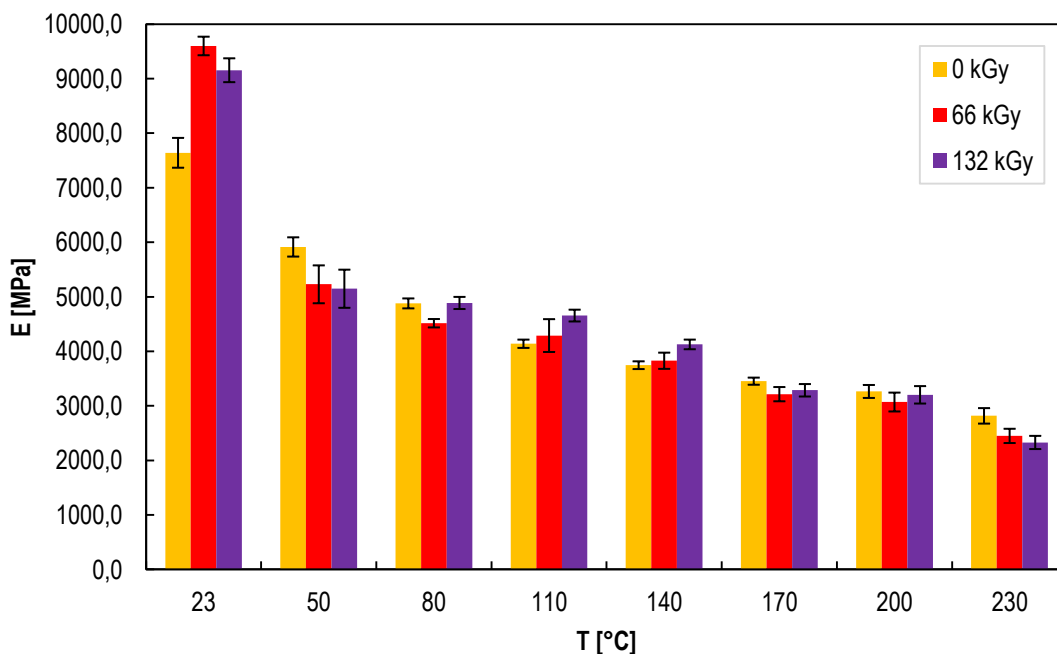
### 14.1 Tahová zkouška

Jak už bylo dříve poznamenáno, v experimentální části této diplomové práce byl u vybrané mechanické zkoušky, ergo tahové zkoušky, zkoumán modul pružnosti v tahu  $E$  [MPa], mez pevnosti v tahu  $\sigma_M$  [MPa] a poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\varepsilon_{\sigma M}$  [%] za různých teplot.

#### 14.1.1 Modul pružnosti v tahu $E$

##### PA 66 GF 30:

Na obrázku 57 je znázorněná změna modulu pružnosti v tahu u neozářeného i ozářeného PA 66 GF 30. Jak je z obrázku patrné, s rostoucí teplotou docházelo k jeho poklesu jak u neozářeného tak i ozářeného polyamidu. U původního neozářeného polymeru došlo v celém spektru teplot k poklesu modulu pružnosti ze 7600,4 MPa na 2817,1 MPa. Pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy poklesl z 9600,4 MPa na 2449,6 MPa u maximální teploty. V případě materiálu ozářeného dávkou 132 kGy se jednalo v celém rozsahu měření o pokles z původní hodnoty 9155,2 MPa na 2329,3 MPa při teplotě 230 °C.

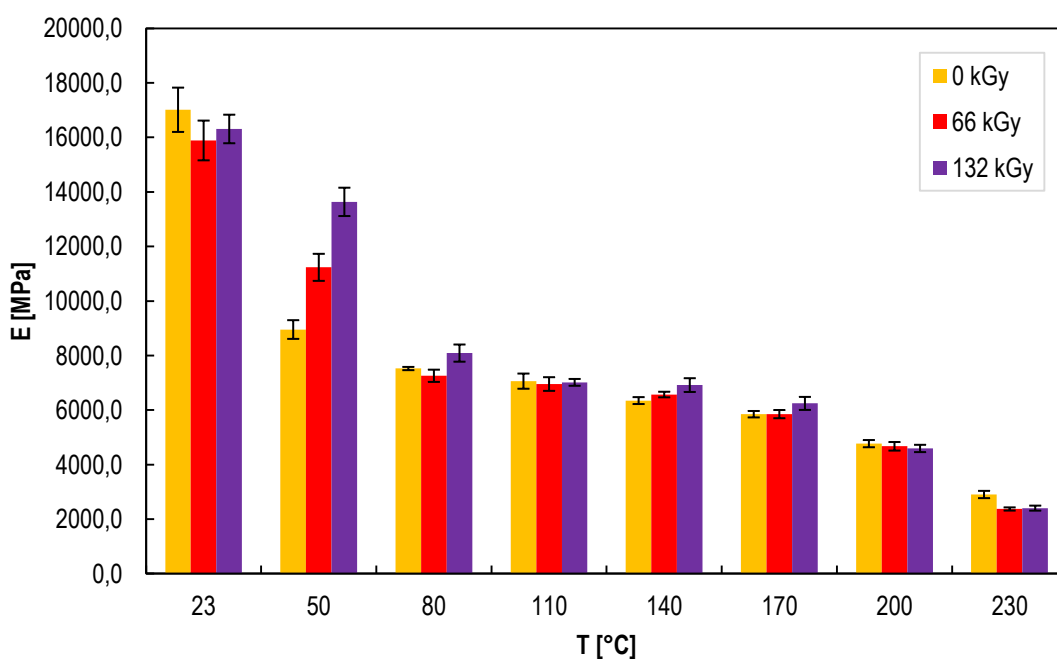


Obrázek 57: Porovnání modulu pružnosti v tahu  $E$  u neozářeného a ozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách

Při porovnání naměřených výsledků je nejvíce znatelná diference za pokojové teploty. Při této teplotě dochází u PA 66 GF 30 ke zvýšení modulu pružnosti o 25,6 % při ozáření dávkou 66 kGy. Druhá nejvyšší změna je patrná při téže teplotě u dávky záření 132 kGy, kde se jedná o nárůst 19,8 %. Dále si lze povšimnout, že s rostoucí teplotou dochází ke zhoršení modulu pružnosti u daného materiálu. Obě dávky záření přináší zlepšení za teplot 110 a 140 °C. Dávka 132 kGy nepatrně vylepšuje modul při teplotě 80 °C o zanedbatelné 0,1 %. Nejhuře si vedl ozářený PA 66 GF 30 při teplotě 230 °C.

#### PA 7T GF 56:

Obrázek 58 znázorňuje změnu pro modulu pružnosti v tahu u neozářeného i ozářeného PA 7T GF 56 dávkami 66 a 132 kGy. Jak už bylo možné si všimnout, na obrázcích 42b, 49b a 56b, docházelo k poklesu při rostoucí teplotě. U neozářeného materiálu došlo k poklesu modulu pružnosti z 17013,1 MPa na 2903,3 MPa. Pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy poklesl modul z 15888,1 MPa na 2372,1 MPa u konečné teploty. V případě polymeru ozářeného 132 kGy se jednalo v celém rozsahu zkoumaných teplot o pokles z 16309,3 MPa na 2403,3 MPa při teplotě 230 °C.



Obrázek 58: Porovnání modulu pružnosti v tahu  $E$  u neozářeného a ozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách

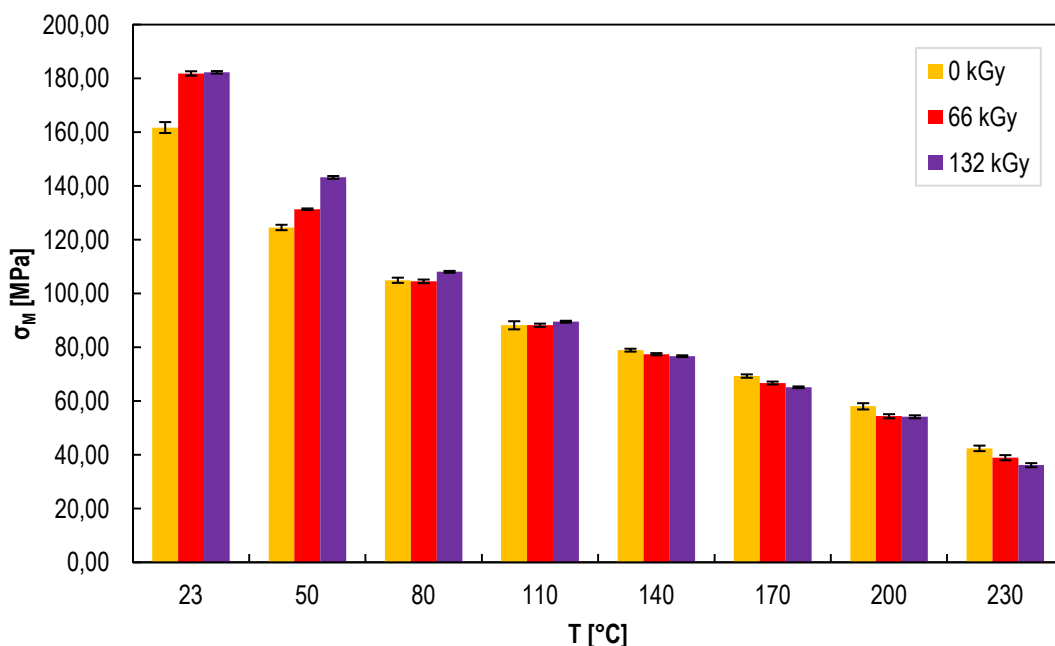
Při porovnání naměřených výsledků lze zaznamenat největší změny  $E$  u zvýšené teploty 50 °C. Největší nárůst je u dávky 132 kGy, která zde přináší zlepšení o 52,3 %, tedy o

polovinu při porovnání s původním materiálem. Dávka 66 kGy v tomto případě taktéž zlepšuje modul pružnosti a to o 25,5 % pro daný materiál. Ke zlepšení modulu pružnosti dále docházelo při teplotách 80 (pouze 132 kGy), 140 a 170 °C. Naopak za pokojové teploty má beta záření zhoršení měřeného modulu při vzájemné konfrontaci neozařeného a ozařeného PA 7T GF 56. Tento fakt je rovněž možné shlédnout na obrázku 58.

#### 14.1.2 Mez pevnosti v tahu $\sigma_M$

##### PA 66 GF 30:

Na obrázku 59 je znázorněná změna meze pevnosti u neozařeného i ozařeného PA 66 GF 30. Jak je z obrázku patrné, stejně jako v případě modulu pružnosti s rostoucí teplotou docházelo k poklesu jak u neozařeného tak i ozařeného polymeru. U původního neozařeného PA 66 GF 30 došlo k poklesu meze pevnosti z původní hodnoty 161,69 MPa na 42,39 MPa. Pro polyamid ozařený 66 kGy poklesla z hodnoty 181,80 MPa na 38,91 MPa v celém spektru měření. Mez pevnosti v případě materiálu modifikovaného 132 kGy klesla z 182,22 MPa až na 36,14 MPa při maximální teplotě.



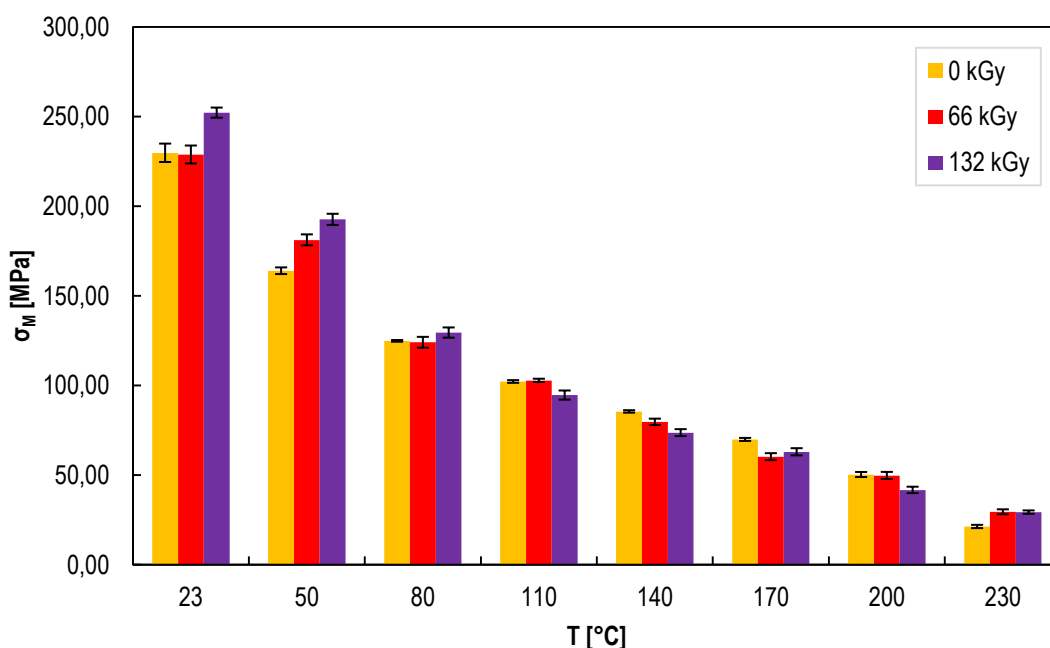
Obrázek 59: Porovnání meze pevnosti v tahu  $\sigma_M$  u neozařeného a ozařeného PA 66 GF 30 při různých teplotách

Z příslušného obrázku lze vypočítat zlepšení meze pevnosti ionizujícím zářením již u pokojové teploty a posléze i zvýšené teploty 50 °C. Následují pak nepatrná zlepšení u následujících dvou teplot 80 a 110 °C při ozaření 132 kGy, konkrétně u teploty 80 °C je

nárůst o zhruba 3 % v porovnání s neozářeným PA 66 GF 30. Při ostatních teplotách již dochází ke zhoršení. Jak už bylo napsáno, při pokojové teplotě, mělo záření pozitivní účinek na mez pevnosti. Po ozáření materiálu 66 kGy dochází ke zvýšení o 12,4 % z původní hodnoty (neozářený materiál) 161,69 MPa na 181,80 MPa. Po vystavení polyamidu dávce 132 kGy se jedná o zlepšení 12,7 %.

#### PA 7T GF 56:

Obrázek 60 znázorňuje změnu pro meze pevnosti v tahu u neozářeného i ozářeného PA 7T GF 56 dávkami 66 a 132 kGy. Stejně jako zatím v předešlých případech docházelo k poklesu měřené veličiny s rostoucí teplotou. U neozářeného PA 7T GF 56 z 229,66 MPa na 21,23 MPa. Pro polyamid ozářený dávkou 66 kGy poklesla mez pevnosti z 228,72 MPa na 29,43 MPa ve zkoumaném spektru použitých teplot. V případě polymeru vystaveného 132 kGy se jedná o pokles z 252,09 MPa na 29,25 MPa.



Obrázek 60: Porovnání meze pevnosti v tahu  $\sigma_M$  u neozářeného a ozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách

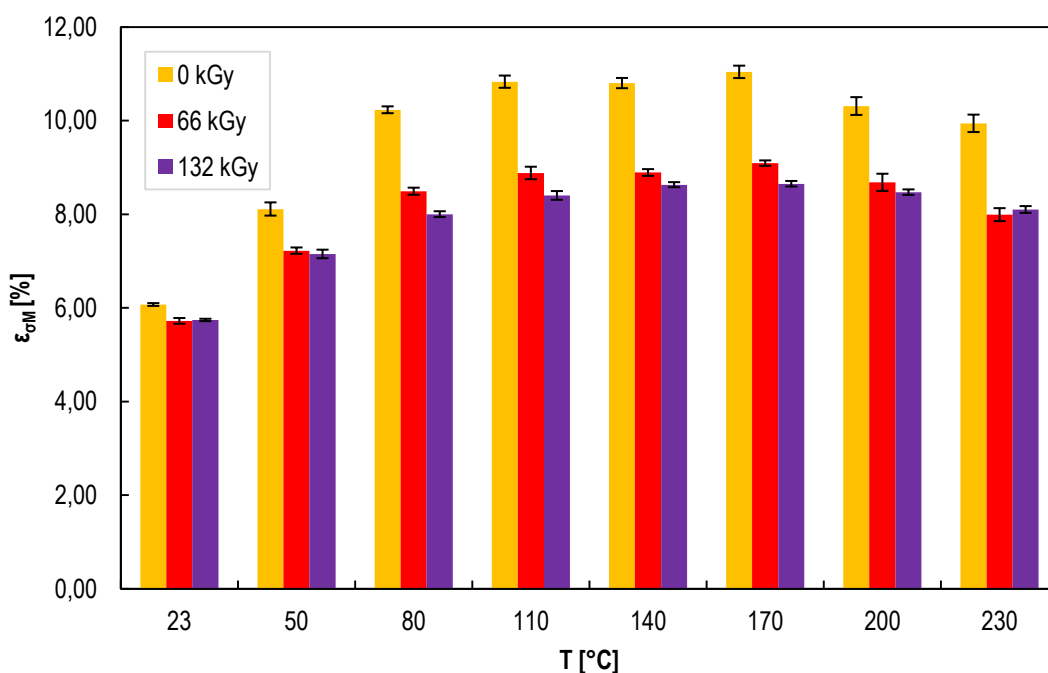
Nejllepšími naměřenými výsledky disponuje beta záření u zvýšené teploty 50 °C. Po záření polyamidu 66 kGy dochází zde ke zlepšení o 10,5% a při 132 kGy k nárůstu o 17,5 %. Dále je na příslušném grafu u ostatních měření vidět poměrně vyrovnané hodnoty, kde se nejedná o žádné markantní změny. Měření při maximální teplotě 230 °C vykazuje dobré

výsledky ve prospěch záření. Nárůst oproti neozářenému PA 7T GF 56 se zde pohybuje okolo 38.0 % při obou dávkách záření.

### 14.1.3 Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$

#### PA 66 GF 30:

Zatímco na předešlých grafech (Obrázek 57 ÷ 60) měly příslušné mechanické vlastnosti podobný průběh, u poměrného prodloužení při mezi pevnosti bylo jeho chování při rostoucí teplotě zcela opačného charakteru. Na následujícím obrázku 61 je jasně vidět, že všechny tři typy PA 66 GF 30 dosáhli svého maxima u teploty 170 °C, následně pak docházelo k poklesu. Průměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu za uvedené teploty je pro neozářený polymer 11,04 %, pro tentýž materiál ozářený dávkou 66 kGy 9,09 % a při 132 kGy 8,65 %.



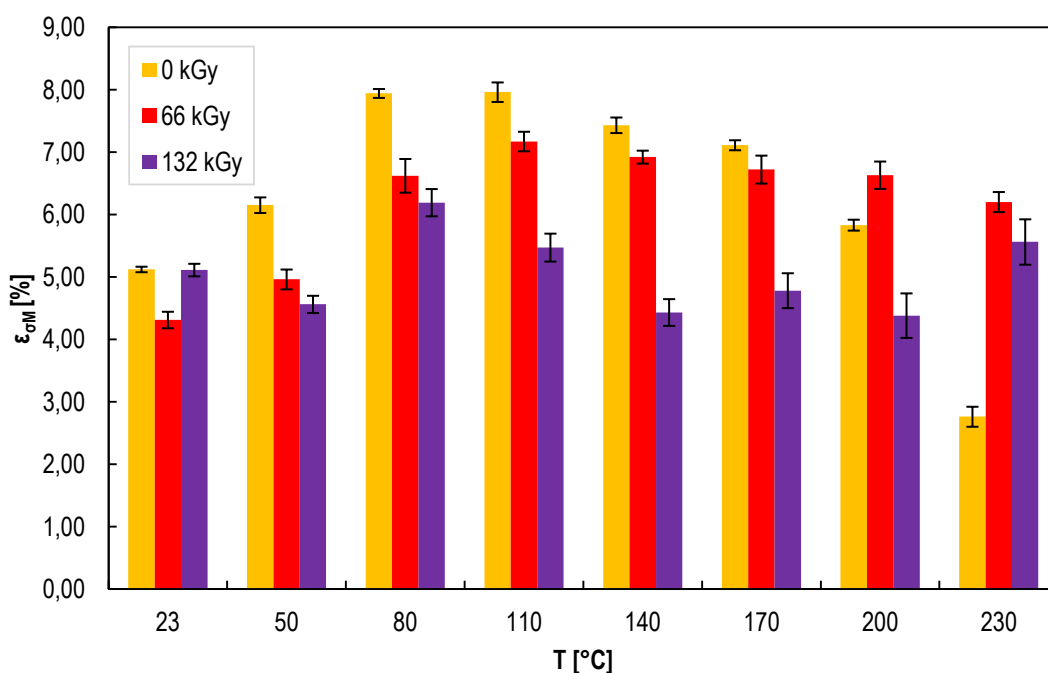
Obrázek 61: Porovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  u neozářeného a ozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách

Na obrázku 61 je znázorněn vliv záření na poměrné prodloužení při mezi pevnosti. Z obrázku 61 je zřejmé, že modifikace daného typu polymeru nepřináší zlepšení u žádné teploty. Nejblíže se ozářené polyamidy přibližují neozářenému právě při již dříve zmiňované teplotě 170 °C. U polyamidu ozářeného 66 kGy se zjistilo, že dosahuje pouze 82,3 % poměrného prodloužení u normálního materiálu, tedy jedná se zde pokles o 17,7 %. Rozdíl

mezi neozářeným PA 66 GF 30 a PA 66 GF 30 ozářeným 132 kGy činí 21,6 % ve prospěch neozářovaného polymeru. S ohledem na tuto skutečnost je nutno konstatovat, že záření má negativní vliv na poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu. Důležité je zde brát v potaz vztah mezi polymerní maticí a skleněnými vlákny.

#### PA 7T GF 56:

Z naměřených výsledků na obrázku 62 je patrné, že neozářený polyamid i ozářený 66 kGy mají podobné chování jako předešlý materiál. Naproti tomu PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy zde vykazuje zcela nepravidelné chování. Dalším zajímavým jevem zde je, že u vysokých teplot 200 a 230 °C dochází ke zlepšení  $\epsilon_{\sigma M}$ . První dva uvedené typy polyamidu (0, 66 kGy) dosáhly svého maxima u  $\epsilon_{\sigma M}$  při teplotě 110 °C, konkrétně 7,96 a 7,17 %. Při 132 kGy bylo docíleno nejvyšší hodnoty 6,19 % při teplotě 80 °C.



Obrázek 62: Porovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  u neozářeného a ozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách

Jak je z obrázku 62 zřejmé, nejlepší výsledky u ozářených polyamidů při porovnání s neozářeným PA 7T GF 56 mají měření u zvýšené teploty 230 °C. Bylo zjištěno, že ozářením 66 kGy došlo k vylepšení o 124,6 % ve srovnání s neupravovaným materiálem. Při dávce 132 kGy došlo k nárůstu o 101,5 %. Zde ale nutno nahlížet na vysoký variační koeficient 20,67% (viz Tabulka 28). Jak je jinak vidět, u obou materiálu se jedná o obrovské

rozdíly. Taktéž zde bude hrát vysokou roli adheze mezi vlákny a matricí. V následující kapitole byla pro příslušné výsledky  $\epsilon_{\sigma M}$  provedena regresní analýza.

## 14.2 Regresní analýza

Princip regresní analýzy je založen na určení nejlepšího regresního modelu, respektive určení vhodné matematické rovnice, která by nejlépe popisovala danou zkoumanou závislost. Konkrétně se jedná o závislost poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  [%] na teplotě  $T$  [°C]. Pro zjištění nejvhodnějšího modelu pro popis dané závislosti lze využít následující parametry:

- ***Střední kvadratická chyba predikce  $S$***
- ***Koeficient determinace  $R - Sq$***

Čím menší hodnotu nabývá střední kvadratická chyba predikce, tím je poté lepší predikční schopnost daného regresního modelu.

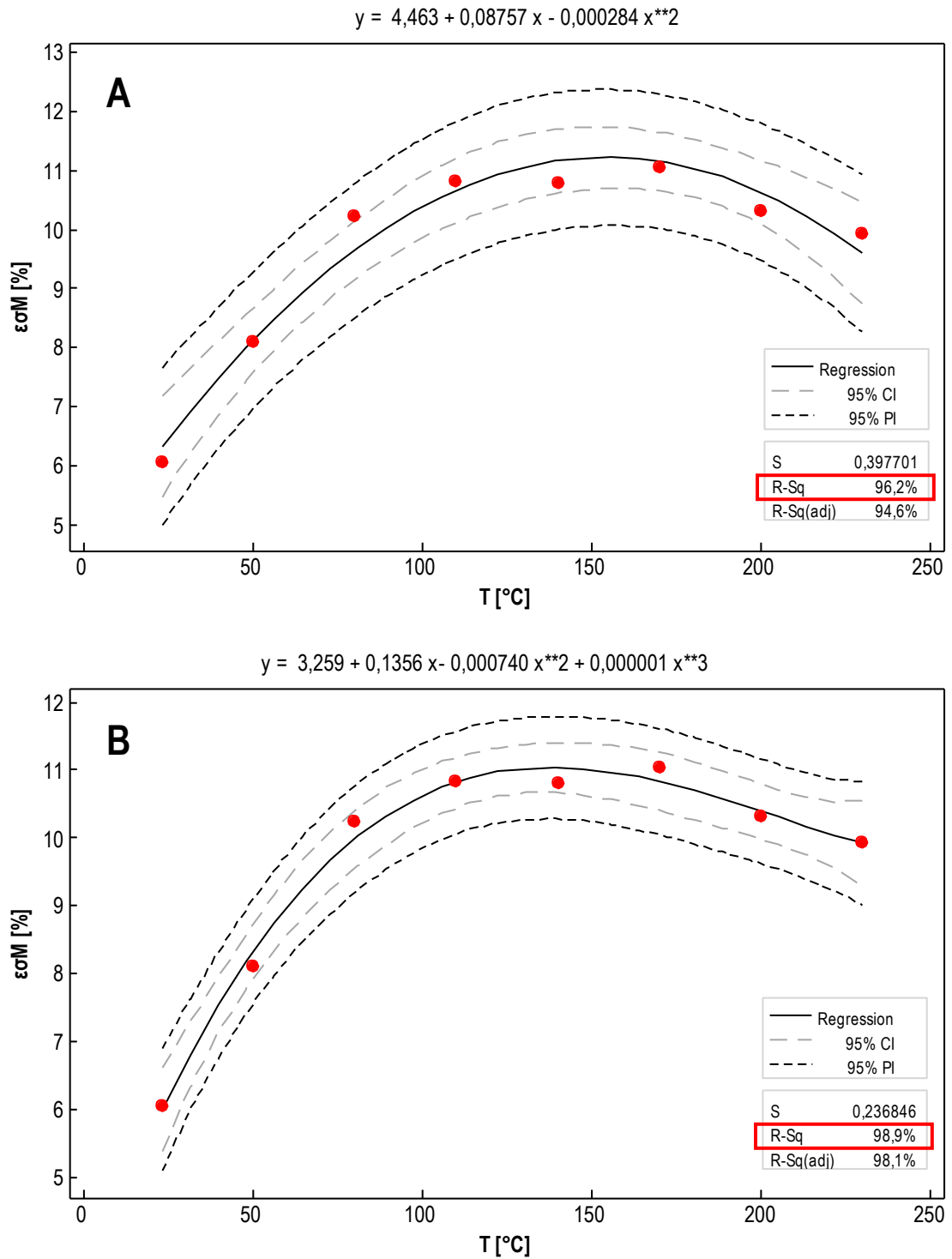
Koeficient determinace leží v intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ . V praktické části je tento koeficient vyjádřen v procentech. Pokud by regresní křivka přesně procházela všemi souřadnicovými body  $[x_i, y_i]$ , bylo by  $R - Sq$  rovno jedné. Nabývá-li koeficient determinace hodnoty vyšší než 0,75, tedy pohybuje se v horní čtvrtině intervalu  $\langle 0;1 \rangle$ , je poté považován za dostatečně vysoký.

Po proložení příslušných bodů danou křivkou, lze následně za pomoci derivace z výsledné funkce teoreticky určit lokální maximum nebo minimum měřeného parametru, v tomto případě teploty  $T$  [°C], která bude odpovídat maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  [%]. V následující sérii grafů jsou na ose  $y$  vyneseny aritmetické průměry  $\epsilon_{\sigma M}$  a na ose  $x$  teploty  $T$ , při kterých byla prováděna tahová zkouška v této diplomové práci.

### 14.2.1 Regresní analýza pro neozářené polyamidy

#### PA 66 GF 30:

Na obrázku 63 je zřetelně vidět, že pro hledání vhodného modelu pro tento polymerní materiál je dostačující jak kvadratický, tak i kubický regresivní model. Oba tyto modely vykazují dobré výsledky  $S$  i  $R - Sq$ . Lze si povšimnout rozdílu pouze 2,7 % u  $R - Sq$  mezi použitými modely, což je při této okolnosti zanedbatelné. Pro následný výpočet byl tedy použit kvadratický model.



Obrázek 63: Kvadratický (A) a kubický (B) regresivní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  na teplotě  $T$  pro neozářený PA 66 GF 30



Vytvořením kvadratické spojnice trendu (viz Obrázek 63A) zde byla získána tato rovnice regrese:

$$y = 4,463 + 0,08757 \cdot x - 0,000284 \cdot x^2 \quad (27)$$

Dále dle parciální derivace

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (28)$$

bylo vypočteno

$$x_{opt} = \frac{0,08757}{2 \cdot 0,000284} = 154,2 \quad (29)$$

Lze tedy potom konstatovat, že teoretická maximální teplota  $T$ , která bude odpovídat maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{oM}$ , bude 154,2 °C. Dosažením této hodnoty do původní regresní rovnice (27) se zjistí, že teoretické maximální poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu při dané teplotě bude 11,21 %.

$$y = 4,463 + 0,08757 \cdot 154,2 - 0,000284 \cdot 154,2^2 = 11,21 \quad (30)$$

#### PA 7T GF 56:

Závislost poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu, jak se lze přesvědčit na obrázku 64, nejlépe odpovídá regresnímu modelu kvadratického typu. Střední kvadratická chyba predikce vychází kolem 0,40 a koeficient determinace nabývá 96,2 %.

Vytvořením kvadratické spojnice trendu zde byla získána tato rovnice regrese:

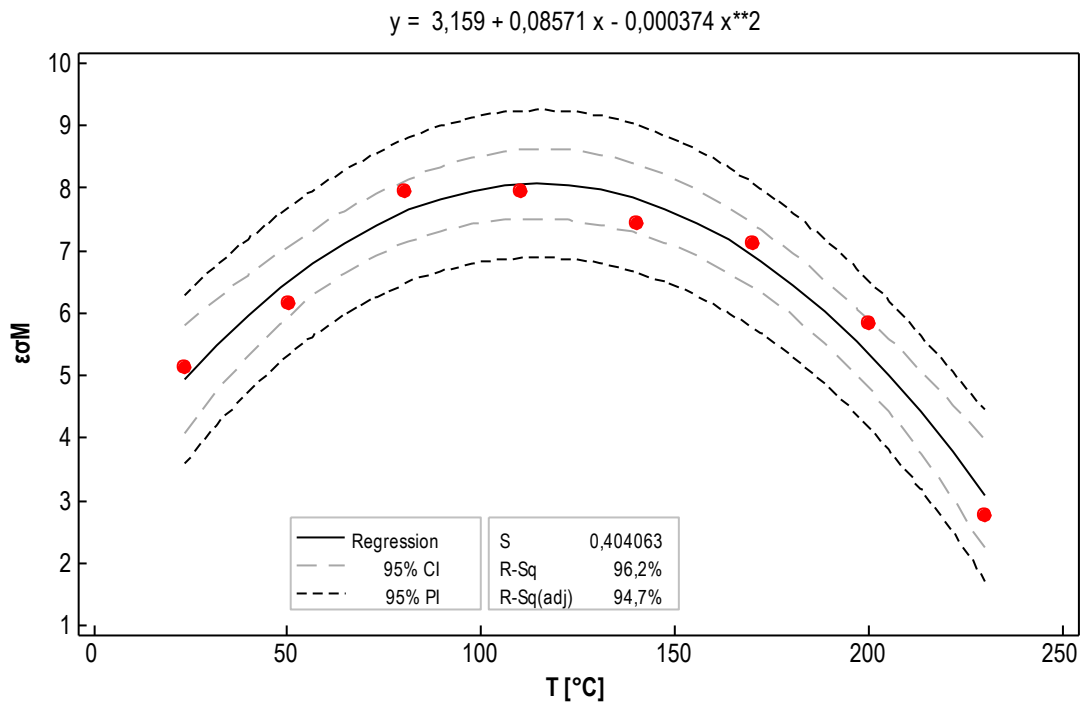
$$y = 3,159 + 0,08571 \cdot x - 0,000374 \cdot x^2 \quad (31)$$

Po výpočtu parciální derivace se dostane:

$$x_{opt} = \frac{0,08571}{2 \cdot 0,000374} = 114,6 \quad (32)$$

Na základě vypočteného  $x_{opt}$  je možné říci, že teoretická maximální teplota, která bude odpovídat maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu, bude činit 114,6 °C. Po dosažení  $x_{opt}$  do regresní rovnice (31) vychází teoretické maximální poměrné prodloužení při mezi pevnosti 8,07 % (viz rovnice 33).

$$y = 3,159 + 0,08571 \cdot 114,6 - 0,000374 \cdot 114,6^2 = 8,07 \quad (33)$$



Obrázek 64: Kvadratický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  na teplotě  $T$  pro neozářený PA 7T GF 56

#### 14.2.2 Regresní analýza pro polyamidy ozářené 66 kGy

##### PA 66 GF 30:

Nejlépe závislost poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě popisuje kvadratický regresní model. Obě hodnoty  $S$  i  $R - Sq$  nabývají příznivých hodnot, jak zobrazuje obrázek 65. Vytvořením kvadratické spojnice trendu byla získána tato rovnice:

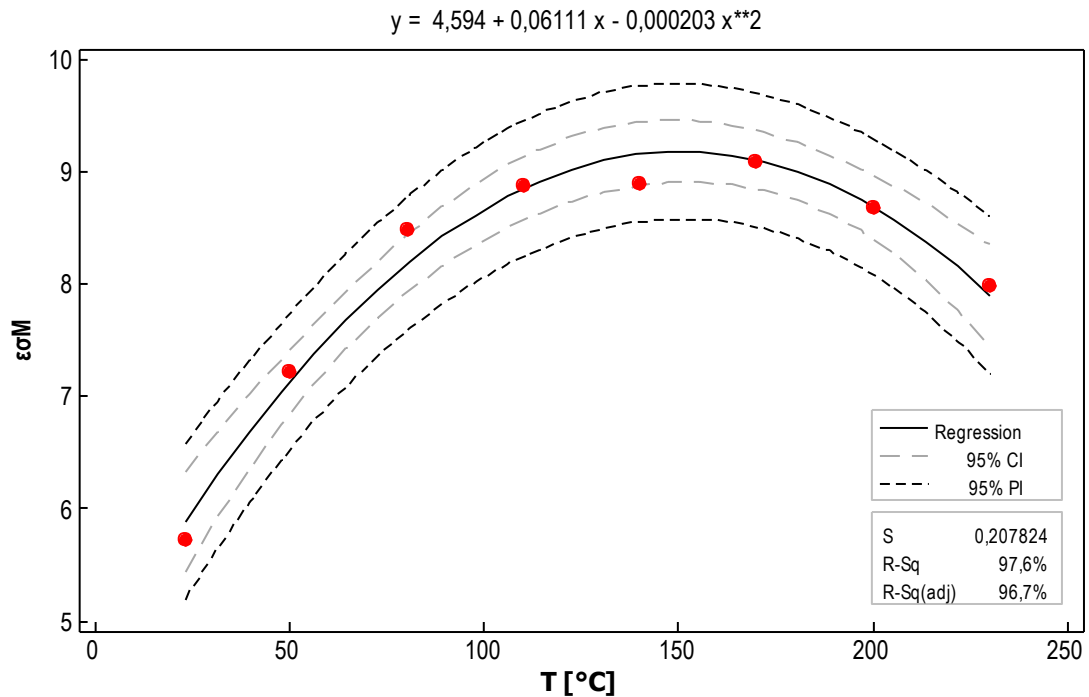
$$y = 4,594 + 0,06111 \cdot x - 0,000203 \cdot x^2 \quad (34)$$

Po parciální derivaci regresní rovnice se dojde k:

$$x_{opt} = \frac{0,06111}{2 \cdot 0,000203} = 150,5 \quad (35)$$

Je tedy možné říci, že teoretická maximální teplota bude 150,5 °C. Po dosazení této teploty do rovnice (34) vychází maximální  $\epsilon_{\sigma M}$  9,19 %.

$$y = 4,594 + 0,06111 \cdot 150,5 - 0,000203 \cdot 150,5^2 = 9,19 \quad (36)$$



Obrázek 65: Kvadratický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  na teplotě  $T$  pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy

#### PA 7T GF 56:

Pro matematický popis závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě u PA 7T GF 56 ozářeného 66 kGy byl rovněž vybrán kvadratický regresní model. Jelikož rozdíl v koeficientu determinace oproti kubickému modelu je pouze 2,1 %, postačí tento model. Konkrétně  $R - Sq$  vychází 91,8 % a  $S$  0,34. Byla získána tato regresní rovnice:

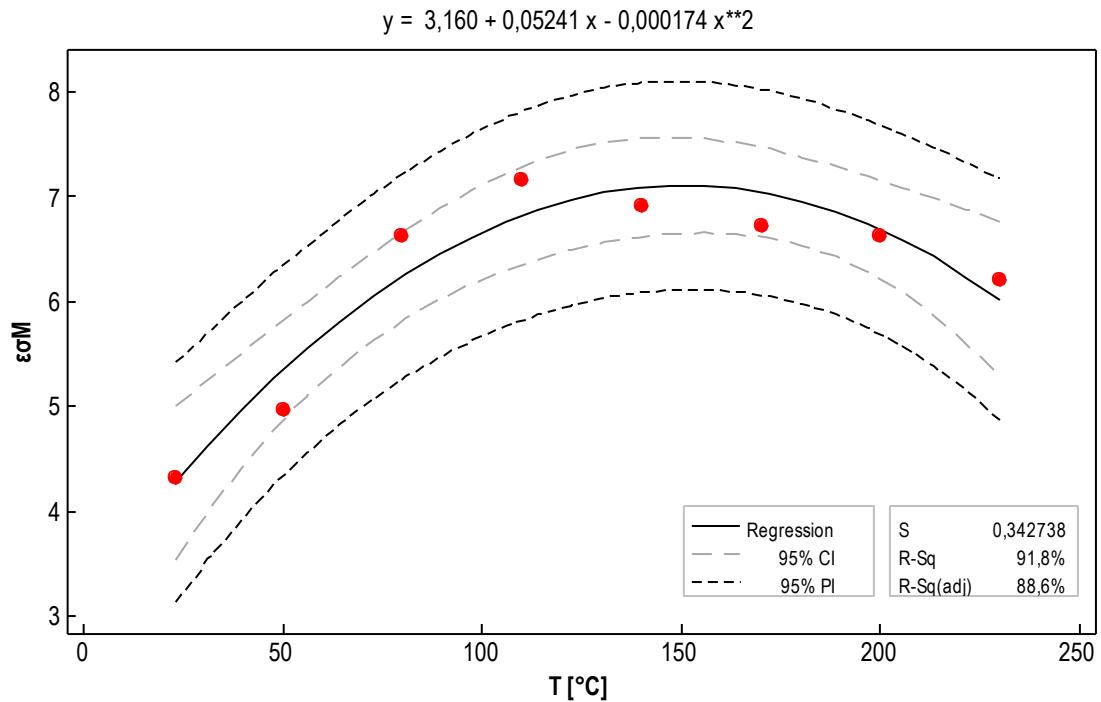
$$y = 3,160 + 0,05241 \cdot x - 0,000174 \cdot x^2 \quad (37)$$

Parciální derivací  $y$  podle  $x$  se dostane:

$$x_{opt} = \frac{0,05241}{2 \cdot 0,000174} = 150,6 \quad (38)$$

Na základě  $x_{opt}$  lze říct, že teoreticky maximální teplota, která odpovídá teoretickému maximálnímu poměrnému prodloužení při mezi pevnosti v tahu, je 150,6 °C. Po dosazení  $x_{opt}$  do rovnice (37) vychází teoretické maximální  $\epsilon_{\sigma M}$  7,11 %

$$y = 3,160 + 0,05241 \cdot 150,6 - 0,000174 \cdot 150,6^2 = 7,11 \quad (39)$$



Obrázek 66: Kvadratický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  na teplotě  $T$  pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy

### 14.2.3 Regresní analýza pro polyamidy ozářené 132 kGy

#### PA 66 GF 30:

Nejlépe pro PA 66 GF 30 ozářený dávkou 132 kGy se jeví opět kvadratický regresní model, jenž se od kubického modelu liší o 1,6 %. Oba regresní modely dostatečně popisují danou závislost. Takže jako v předešlých situacích byl opět vybrán kvadratický model, kde koeficient determinace vychází 98,0 % a střední kvadratická chyba predikce 0,17. Vytvořením kvadratické spojnice trendu zde byla získána tato rovnice regrese:

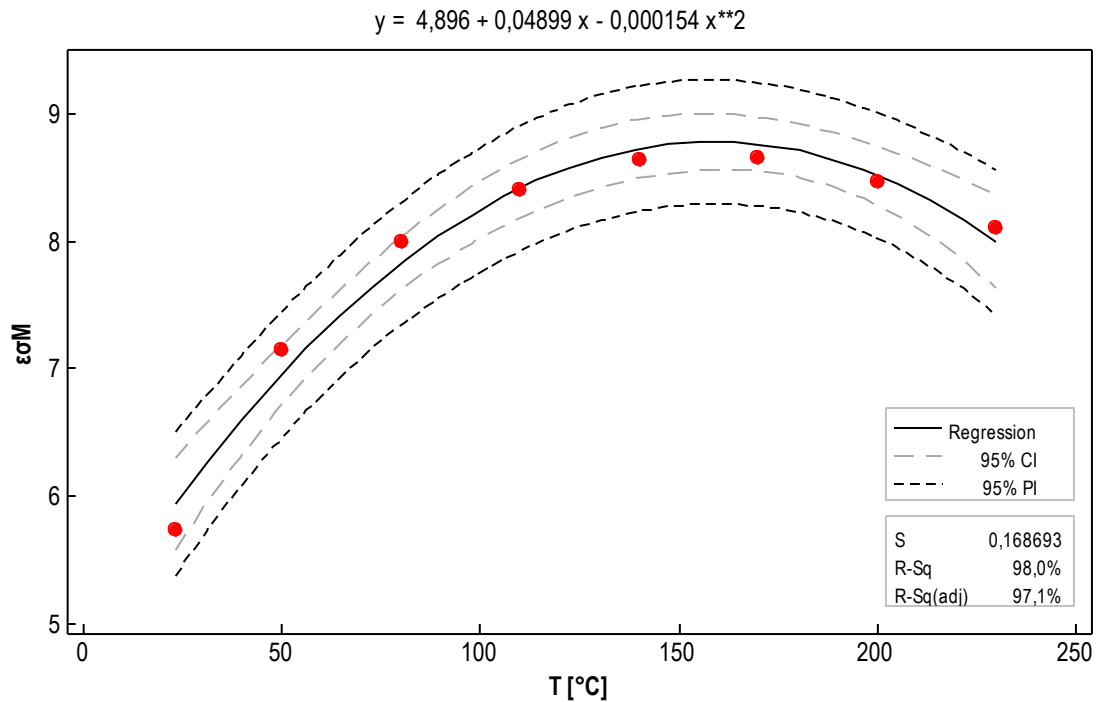
$$y = 4,896 + 0,04899 \cdot x - 0,000154 \cdot x^2 \quad (40)$$

Po parciálním derivování tedy

$$x_{opt} = \frac{0,04899}{2 \cdot 0,000154} = 159,1 \quad (41)$$

Teoretická hodnota teploty, činí 159,1 °C. Po jejím dosazení do rovnice (40) vyjde teoretické maximální poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu 8,79 %.

$$y = 4,896 + 0,04899 \cdot 159,1 - 0,000154 \cdot 159,1^2 = 8,79 \quad (42)$$



Obrázek 67: Kvadratický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  na teplotě  $T$  pro PA 66 GF 30 ozářený 132 kGy

PA 7T GF 56:

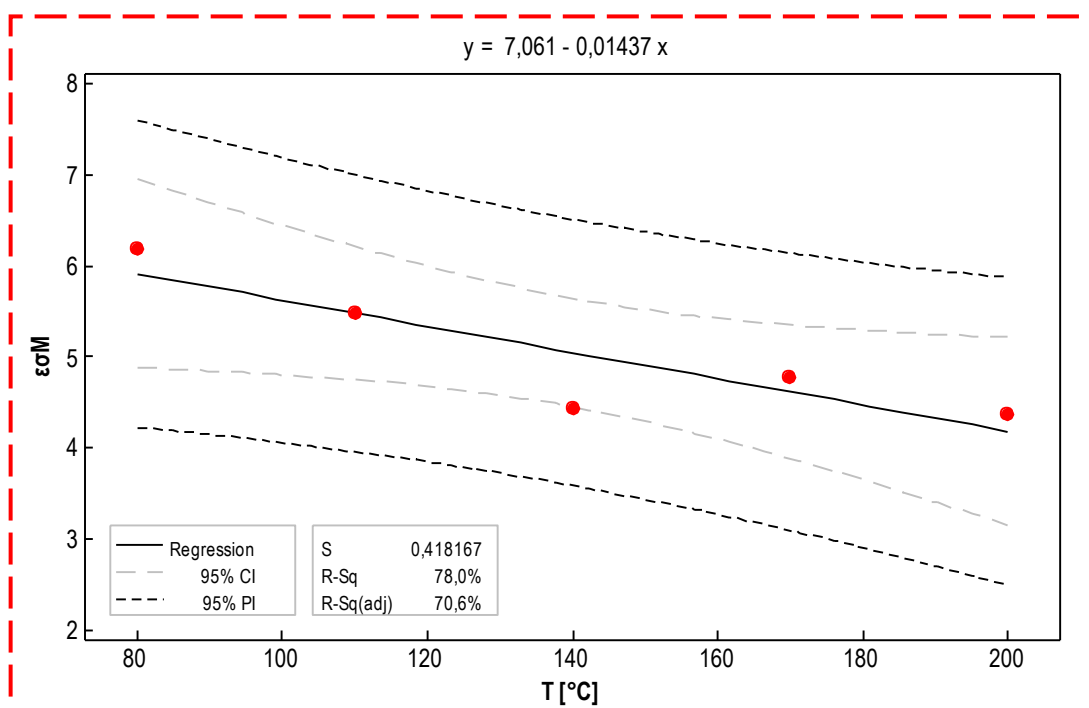
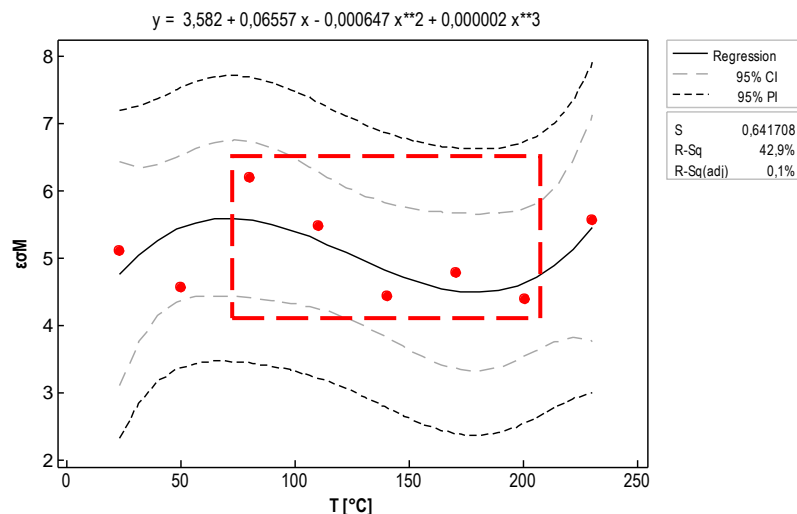
Závislost poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě nejlépe zde odpovídala kubickému regresnímu modelu, ale koeficient nabýval hodnoty pouze 42,9 %. R – Sq u kvadratického modelu vycházel dokonce jen 2,3 %, což je nepřijatelné. Taktéž u kubického modelu je nedostačující. Z toho důvodu byla provedena regresní analýza pouze u vybraných naměřených dat pro zjištění lokálního maxima.

Z naměřených řad byla odstraněna měření za teplot 23, 50 a 230 °C, neboť tyto soubory měření znehodnocují danou regresní analýzu. U zmiňovaných teplot lze doporučit více měření, aby měly lepší vypovídající hodnotu nejen data, ale i samotný regresní model.

Pro matematický popis u ostatních dat bylo, jak je možné se přesvědčit na obrázku 68, využito lineárního regresního modelu. Zde již koeficient determinace nabýval již o poznání lepší hodnoty a to 78 %. Střední kvadratická chyba predikce je potom 0,42. Vytvoření spojnice trendu byla vytvořena tato lineární rovnice (43):

$$y = 7,061 - 0,01437x \quad (43)$$

Z uvedené rovnice je znát, že teoretické maximální poměrné prodloužení při mezi pevnosti bude 7,06 %. Důležité ale dodat, že tato hodnota odpovídá teoretické teplotě 0 °C.



Obrázek 68: Lineární regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu  $\epsilon_{\sigma M}$  na teplotě  $T$  ve vybrané oblasti kubického regresního modelu pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy

Nicméně lokální maximum bylo tedy hledáno při teplotě 80 °C. Pomocí metody nejmenších čtverců byla sestrojena soustava dvou lineárních rovnic, ze kterých byla na základě vypočtených kořenů sestrojena rovnice regrese (44), podle které vychází teoretické maximální  $\epsilon_{\sigma M}$  5,91 % při teoretické teplotě 80 °C.

$$y = 5,912 - 0,014x \tag{44}$$

## ZÁVĚR

Cílem experimentálního výzkumu v této práci bylo popsat vliv ionizujícího beta záření na změnu tahových vlastností u dvou typů radiačně sítovatelných polyamidů při různých teplotách. Na samém počátku byla zpracována literární rešerže, která pojednává o dané oblasti problematiky, jejíž teze jsou primárním zájmem v této práci. Posléze už bylo přistoupeno k samotnému experimentu. Ze zkoumaných materiálů byl použit polyamid 66 s obchodním názvem V-PTS-CREAMID-A3H7.2G6\*M0129A schwarz, plněný 30 % skleněných vláken, a polyamid 7T, nesoucí název V-DURAMID-TH7G12.0SZB\*9207, s 56 % skleněných vláken. Před samotnou přípravou těles, byly nejprve granule těchto polymerů sušeny potřebnou dobu pro odstranění vlhkosti. Následná výroba zkušebních těles byla realizována na příslušném vstřikovacím stroji. Takto připravené materiály byly převezeny do německé společnosti BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG. do střediska v Saal an der Donau. Zkušební tělesa zde byla pod elektronovým urychlovačem ozářena dávkami 66 a 132 kGy. V další části experimentu byla poté v technické laboratoři takto vyhotovená zkušební tělesa (neozářená i ozářená) podrobena testování na tah, dle příslušné normy při různých teplotách s opakovatelností minimálně 10 měření. Rozsah měřených teplot byl volen s ohledem na teoretické poznatky z literatur [3, 6, 10] a respektoval fakt, že při teplotách 250 ÷ 260 °C dochází k tavení polymerních materiálů, jakými jsou zde polyamidy. Diplomová práce tedy obsahuje širokou škálu naměřených dat.

Všechny naměřené výsledky byly zpracovány do tabulek a grafů, statisticky vyhodnoceny a podrobeny testu na vychýlené hodnoty při interpretaci box-plotových diagramů s 1,5 násobkem interkvartilového rozpětí. Na závěr byla uskutečněna analýza, kde hlavní snahou bylo popsat závislost poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu na teplotě vhodným matematickým modelem při dané regresi.

Z naměřených výsledků je jasné, že modul pružnosti a mez pevnosti v tahu u obou polyamidů, ozářených i neozářených, má klesající trend při rostoucí teplotě. Naopak poměrné prodloužení při mezi pevnosti vykazuje opačné chování za rostoucích teplot, kde dokonce lze vidět u PA 7T GF 56 ozářeného 132 kGy nepravidelný charakter změny této mechanické charakteristiky. Porovnáním změn tahových vlastností ( $E$ ,  $\sigma_M$  a  $\epsilon_{\sigma M}$ ) lze u těchto plněných polyamidů vidět určitý vliv ionizujícího záření. Jak je možné v diskuzi naměřených výsledků vyzorovat na příslušných grafických porovnáních jisté rozdíly mezi neozářenými a ozářenými tělesy polymerních materiálů. Nutno ale dodat, že se jedná

o velice individuální změny, co se týče provedených měření. De facto největší změny modulu pružnosti a meze pevnosti po ozáření vykazují polyamidy za pokojové teploty 23 °C a u zvýšené teploty 50 °C. Dále při dalších teplot lze sice pozorovat jisté změny, ale v celkovém součtu se nejedná o žádné výrazné rozdíly. Naopak při poměrném prodloužení při mezi pevnosti, už jsou vidět znatelnější difference mezi neozářenými a ozářenými tělesy. Je zřejmé, že při změně struktury polymeru po ozáření a za přítomnosti plniva (skleněných vláken) dochází k nárůstu křehkosti, což se v konečném důsledku projevilo na horší bilanci výsledků ozářených těles oproti neozářeným. Disertační práce [8] od Dr. Daňka tento fakt potvrzuje. Je tedy nutné brát ve velký potaz vztah mezi polymerní matricí a skleněnými vlákny a změnu jejich vzájemné adheze po radiaci. Taktéž je ale dobré nahlížet na statisticky vyhodnocená data, kde se například pro PA 7T GF 56 u poměrného prodloužení pohybují variační koeficienty v intervalu cirká  $6 \div 25$  %. Vysoké hodnoty variačních koeficientů mohou být způsobeny mnoha faktory. Například nesprávným upnutím zkušebních těles do samosvorných čelistí u testovacího stroje, nedostatečnou dobou vytemperování teplotní komory anebo proudícím vzduchem přes jisté malé otvory v temperační komoře. To se pouze netýká poměrného prodloužení, i u modulu pružnosti a meze pevnosti lze pozorovat u některých teplot vyšší  $V_x$ . Jak už bylo několikrát v praktické části uvedeno, přesnější stanovení zkoumaných vlastností by vyžadovalo mnohem více měření, což by bylo nejen z časového, ale také i ekonomického úhlu pohledu mnohem náročnější.

S ohledem na výše uvedené informace lze konstatovat, že polyamidy je možno modifikovat při vystavení účinku ionizujícího beta záření. Naměřené výsledky sice ukázaly, že dávka 66 kGy se nejví pro oba použité typy polyamidů jako optimální volba. Zato naopak u zkušebních těles ozářených 132 kGy lze vidět převažující změny k lepšímu. Do budoucna se proto doporučuje provést výzkum u totožných polyamidů při vyšších dávkách záření, např. 165 a 198 kGy a sledovat zde vliv záření na materiály. Dále by bylo vhodné brát v úvahu, že parametry zde zkoumané, jsou jedny z mnoha dalších mechanických vlastností, kterými jsou polymerní materiály charakteristické. O teplotních a chemických vlastnostech nevyjímaje. Výsledky práce mohou přispět pro detailnější studium a porozumění spolu s prohloubením poznatků v dané problematice. Jak už bylo poznamenáno výše, pro přesnější měření je zapotřebí vyšší opakovatelnosti měření, kde je nutné nahlížet na časově a finančně náročnější stupeň výzkumu.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**Monografie:

- [1] DROBNY, J. G.: *Radiation technology for polymers*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2003, 206 s. ISBN 1-58716-108-7.
- [2] MEISSNER, B., ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s. ISBN 04-634-87.
- [3] MLEZIVA, K., ŠŇUPÁREK, J.: *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepracované vydání, Praha: Sobotáles, 2000, 544 s. ISBN 80-85920-72-7.
- [4] ZYBALL, A., GEHRING, J.: *Radiation crosslinking of polymers – status, current issues, trends and challenges*. Radiation Physics and Chemistry, 1995, vol 7, iss. 4–6, 931 – 936.
- [5] MAKUUCHI, K., CHENG, S.: *Radiation processing of polymer materials and its industrial applications*. Hoboken, N. J.: Wiley, 2012, 415 s. ISBN 978-0-470-58769-0.
- [6] DUCHÁČEK, V.: *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vydání, přeprac. Praha: vydavatelství VŠCHT, 2006, 280 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [7] ZEMAN, L.: *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování plastů*. 1. vydání Praha: BEN – technická literatura, 2009, 248 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [8] DANĚK, M.: *Vliv záření na vlastnosti polymerů: Změny mechanických vlastností radiačně zesíťovaných konstrukčních polymerů v závislosti na absorbované dávce*. Zlín: Univerzita Tomáš Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2013, 118 s. Disertační práce, školitel: doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
- [9] IVANOV, S. V.: *Radiation chemistry of polymers*. Tokyo: VSP, 1992, 320 s. ISBN 90-6764-137-5.
- [10] SOVA, M., KREBS, J.: *Termoplasty v praxi*. Praha: Verlag Dashöfer, 2001. ISBN 80-86229-15-7.
- [11] DROBNY, J. G.: *Ionizing radiation and polymers: principles, technology and applications*. 1. pub. Oxford: Elsevier/William Andrew, 2013, 298 s. ISBN 978-1-4557-7881-2.

- [12] DROBNY, J. G.: *Radiation technology for polymers*. 2. edition. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010, 307 s. ISBN 978-1-4200-9404-6.
- [13] SVOBODA, E a kol.: *Přehled středoškolské fyziky*. Dotisk 3. vydání, Praha: nakladatelství Prometheus, 1996, 500 s. ISBN 80-7196-116-7.
- [14] FUKÁTKO, T.: *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vydání, Praha: nakladatelství BEN – technická literatura, 2007, 192 s. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [15] JARUŠEK, J.: *Metody zkoumání polymerů*. 2. vydání, Pardubice: VŠCHT, 1984, 105 s. ISBN 80-85113-01-5.
- [16] NAVRÁTIL, L., ROSINA, J. a kol.: *Medicínská biofyzika*. 1. vydání, Praha: Grada Publishing a. s., 2005, 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
- [17] BEDNAŘÍK, M., MAŇAS D., MAŇAS M., STANĚK M., MIZERA A., OVSÍK M., KRÁTKÝ P.: *Strength of bonded joints at elevated temperatures after radiation cross-linking*. International Journal of Mechanics, 2014, vol. 8, iss. 1, s. 10-17. ISSN 1998-4448.
- [18] DAVIS, J.: *Tensile testing*. 2. edition, Ohio: ASM international, 2004, 283 s. ISBN 0-87170-806-X.
- [19] ŠVEC, J.: *Radioaktivita a ionizující záření*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, 2005, 36 s. ISBN 80-86634-62-0.
- [20] HOLÍK, Z.: *Vliv záření na vlastnosti polymerů – Změna vybraných mechanických vlastností v závislosti na absorbované dávce záření*. Zlín: Univerzita Tomáš Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2013, 97 s. Disertační práce, školitel: doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
- [21] HOLÍK, Z., DANĚK, M., MAŇAS, M., ČERNÝ, J.: *Influence of the amount of cross-linking agent on properties of irradiated polyamide 6*. International journal of mechanics, 2011, vol 5, 218–225. ISSN 1998-4448.
- [22] GEHRING, J.: *With radiation crosslinking of engineering plastics into the next millennium*. Radiation Physics and Chemistry, 2000, vol 57, iss. 3–6, 361–365.
- [23] BROCKA, Z.: *Werkstoff und Einsatzpotential strahlenvernetzter Thermoplaste*. Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT), Nürnberg, 2008.
- [24] BGS Beta-Gamma-Service GmbH & Co. KG.: *Radiační síťování plastů*, 40 s.

- [25] ČSN EN ISO 527-1: *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 28 s.
- [26] ČSN EN ISO 527-2: *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 16 s.

Internetové zdroje:

- [27] BGS: *Beta – Gamma – Service* [online]. [cit. 2014-11-12]. Dostupné z WWW: <[http://bgs.eu/homepage.html?&no\\_cache=1&L=1](http://bgs.eu/homepage.html?&no_cache=1&L=1)>
- [28] Kabex: *Zušlechťování izolačních materiálů solárních kabelů – Radiační, nebo silanové síťování?* [online]. [cit. 2014-11-24]. Dostupné z WWW: <[http://data.kabex.quonia.cz/Onas/fotovoltaika\\_ES-4-09.pdf](http://data.kabex.quonia.cz/Onas/fotovoltaika_ES-4-09.pdf)>
- [29] PARKS, A. L.: *Radiation Crosslinking of Polymers*. [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.sterigenics.com/crosslinking/crosslinking.htm>>
- [30] LENFELD, P.: *Zpracování plastů: plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti*. [online]. [cit. 2014-10-02]. Dostupné z WWW: <[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm)>
- [31] KOTEK, J., RAAB, M.: *Quo vaditis, polymery? Materiály z velkých molekul*. [online]. [cit. 2014-09-26]. Dostupné z WWW: <<http://casopis.vesmir.cz/clanek/quo-vaditis-polymery>>
- [32] Technický deník: *Vliv radiačního síťování na vlastnosti*. [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z WWW: <[http://www.technickydenik.cz/rubriky/archiv/vliv-radiacniho-sitovani-na-vlastnosti\\_12165.html](http://www.technickydenik.cz/rubriky/archiv/vliv-radiacniho-sitovani-na-vlastnosti_12165.html)>
- [33] Chemical Book: *Nylon 6/6*. [online]. [cit. 2014-10-14]. Dostupné z WWW: <[http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB6189048.htm](http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB6189048.htm)>
- [34] Cyberphysics: *Young modulus*. [online]. [cit. 2014-11-22]. Dostupné z WWW: <[http://www.cyberphysics.co.uk/topics/forces/young\\_modulus.htm](http://www.cyberphysics.co.uk/topics/forces/young_modulus.htm)>

- [35] Ateam.zcu.cz: *Plasty*. [online]. [cit. 2014-09-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.ateam.zcu.cz/download/plasty.pdf>>
- [36] IAEA - International Atomic Energy Agency: *Industrial radiation processing with electron beams and X-rays*. [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.cirms.org/pdf/Industrial%20Radiation%20Processing%20-%20May%202011%20-%20Revision%206.pdf>>
- [37] Ateam.zcu.cz: *Polymery*. [online]. [cit. 2014-09-14]. Dostupné z WWW: <[http://www.ateam.zcu.cz/download/Polymery\\_2010.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/Polymery_2010.pdf)>
- [38] FyzVlast 3: Pedagogická fakulta: *Fyzikální základy vědy o materiálu*. [online]. [cit. 2014-09-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet3.htm>>
- [39] POSPÍCHAL, J.: *Polymerní materiály*. [online]. [cit. 2014-10-17]. Dostupné z WWW: <[www.jan.pospichal.biz](http://www.jan.pospichal.biz)>
- [40] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.: *Statické zkoušky krátkodobé*. [online]. [cit. 2014-11-22]. Dostupné z WWW: <[http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_09.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf)>
- [41] VEJRAŽKOVÁ, I.: *Plasty pro stavebnictví a architekturu 11 - Polyamidy*. [online]. [cit. 2014-10-22]. Dostupné z WWW: <[http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-11-polyamidy\\_41299.html](http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-11-polyamidy_41299.html)>
- [42] Sk.wikipedia.org: *Elektromagnetické žiarenie*. [online]. [cit. 2014-10-22]. Dostupné z WWW: <[http://sk.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9\\_%C5%BEiarenie](http://sk.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_%C5%BEiarenie)>
- [43] Principles of general chemistry: *Chapter 12: Solids*. [online]. [cit. 2014-10-18]. Dostupné z WWW: <<http://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0m/s16-solids.html>>
- [44] World Market: *High increase in consumptions - Polyamides*. [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z WWW: <<https://www.kunststoffe.de>>
- [45] ULLMANN, V.: *Jaderná a radiační fyzika: Ionizující záření*. [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z WWW:

<<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>>

- [46] KUSALA, J.: *Radioaktivita slouží*. [online]. [cit. 2014-9-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k23.htm>>
- [47] IBA Industrial: *Rhodotron® E – Beam Accelerator*. [online]. [cit. 2015-2-11]. Dostupné z WWW: <[http://www.iba-industrial.com/sites/default/files/ressources/Brochure%20Rhodotron%20August%202010\\_0.pdf](http://www.iba-industrial.com/sites/default/files/ressources/Brochure%20Rhodotron%20August%202010_0.pdf)>

Materiálové listy:

- [48] PTS: *Polyamid 66 GF 30 – V-PTS-CREAMID-A3H7.2G6\*M0129A schwarz*. Materiálový list, 4 s.
- [49] PTS: *Polyamid 7T GF 56 – V-DURAMID-TH7G12.0SZB\*9207*. Materiálový list, 4 s.

Studijní materiály:

- [50] PATA, V.: *Počítačová podpora zpracování dat*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2013.
- [51] PATA, V.: *Jakost a metrologie*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2013.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

%	[-]	Procento
°C	[-]	Stupeň Celsiův
1A	[-]	Typ zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku
1B	[-]	Typ zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku
$\alpha$	[-]	Alfa záření
$\beta$	[-]	Beta záření
$\gamma$	[-]	Gama záření
$\delta$	[%]	Tažnost
$\varepsilon$	[-, %]	Prodloužení, protažení
$\varepsilon_{\sigma M}$	[%]	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu
$\varepsilon_b$	[-]	Poměrné zkrácení šířky zkušebního tělesa
$\varepsilon_h$	[-]	Poměrné zkrácení výšky zkušebního tělesa
$\varepsilon_L$	[-]	Poměrné prodloužení
$\lambda$	[m]	Vlnová délka
$\nu$	[-]	Poissonův poměr
$\sigma$	[Pa]	Napětí
$\sigma_E$	[Pa]	Mez pružnosti
$\sigma_K$	[Pa]	Mez kluzu
$\sigma_M$	[Pa]	Mez pevnosti v tahu
$\Sigma$	[-]	Součet
A	[-]	Ampér
AM	[-]	Amplitudová modulace
B	[-]	Monomer
$b_0$	[mm]	Původní šířka zkušebního tělesa

$b_1$	[mm]	Šířka zúžené části zkušebního tělesa
$b_2$	[mm]	Šířka konců zkušebního tělesa
Bq	[-]	Becquerel
BGS	[-]	Beta-Gamma-Service
C	[-]	Uhlík
cca	[-]	Cirka
Ci	[-]	Curie
CH <sub>2</sub>	[-]	Metylen
cm	[-]	Centimetr
Co	[-]	Kobalt
Cs	[-]	Cesium
ČSN	[-]	Česká technická norma
e <sup>-</sup>	[-]	Záporně nabitý elektron
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti v tahu
EN	[-]	Evropská norma
eV	[-]	Elektronvolt
f	[Hz]	Frekvence
F <sub>E</sub>	[N]	Síla působící na mezi pružnosti
F <sub>U</sub>	[N]	Síla působící na mezi úměrnosti
F <sub>K</sub>	[N]	Síla působící na mezi kluzu
F <sub>M</sub>	[N]	Síla působící na mezi pevnosti v tahu
FM	[-]	Frekvenční modulace
G(S)	[-]	Počet štěpení řetězců v polymeru na 100 eV absorbované energie při daných podmínkách ozařování
G(X)	[-]	Počet příčných vazeb a spojení zformovaných v polymeru na 100 eV absorbované energie při daných podmínkách ozařování

GF	[-]	Glass Fibred (plněný skleněnými vlákny)
GPa	[-]	Gigapascal
Gy	[-]	Gray
h	[mm]	Doporučená tloušťka zkušebního tělesa
H	[-]	Vodík
h <sub>0</sub>	[mm]	Původní výška zkušebního tělesa
H <sub>2</sub> O	[-]	Voda
HCOOH	[-]	Kyselina mravenčí
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
Ir	[-]	Iridium
IR	[-]	Infračervené záření
IQR	[-]	Interkvartilové rozpětí
J	[-]	Joule
k	[J.K <sup>-1</sup> ]	Boltzmanova konstanta $k = (1.3806488 \pm 0.0000013) \times 10^{-23}$
keV	[-]	Kiloelektronvolt
kg	[-]	Kilogram
kGy	[-]	Kilogray
l	[mm]	Okamžitá délka zkušebního tělesa
L	[mm]	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi
l <sub>0</sub>	[mm]	Původní délka zkušebního tělesa
L <sub>0</sub>	[mm]	Počáteční měřená délka zkušebního tělesa
l <sub>1</sub>	[mm]	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami
l <sub>2</sub>	[mm]	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami
l <sub>3</sub>	[mm]	Celková délka zkušebního tělesa
LCP	[-]	Liquid Crystal Polymer (Kapalný krystalický polymer)
m	[-]	Medián



---

m	[kg]	Hmotnost elektronu
M	[-]	Monomer
$M_n$	[-]	Číselně střední molekulová hmotnost
$M_w$	[kg.mol <sup>-1</sup> ]	Hmotnostně střední molekulová hmotnost
MeV	[-]	Megaelektronvolt
mm	[-]	Milimetr
MPa	[-]	Megapascal
n	[-]	Počet měření
n	[-]	Počet molů
N	[-]	Dusík
O	[-]	Kyslík
P	[-]	Polymer
Pa	[-]	Pascal
PA	[-]	Polyamid
PE	[-]	Polyetylen
PEI	[-]	Polyetylenimin
PI	[-]	Predikční interval
PP	[-]	Polypropylen
PPS	[-]	Polyfenylsulfid
PTFE	[-]	Polytetrafluoretylen
PTS	[-]	Plastic-Technologie-Service
PUR	[-]	Polyuretan
PVC	[-]	Polyvinylchlorid
r	[mm]	Poloměr
R	[-]	Radikál
R – Sq	[%]	Koeficient determinace

---

$Q_1$	[-]	První (dolní) kvartil
$Q_3$	[-]	Třetí (horní) kvartil
$s$	[-]	Směrodatná odchylka
$s$	[-]	Sekunda
$s^2$	[-]	Rozptyl
$S$	[-]	Střední kvadratická chyba predikce
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Původní průřez zkušebního tělesa
SI	[-]	Mezinárodní soustava jednotek fyzikálních veličin
$T$	[°C]	Teplota
$T_g$	[°C]	Teplota skelného přechodu
TAC	[-]	Triallylkyanurát
TAIC	[-]	Triallylisokyanurát
TMMTA	[-]	Tetrametylolmetantetraakrylát
TMPTA	[-]	Trimetylolpropantriakrylát
TMPTMA	[-]	Trimetylolpropantrimetakrylát
TPU	[-]	Termoplastický polyuretan
$u_A$	[-]	Standardní nejistota typu A
UV	[-]	Ultrafialové záření
$V_X$	[-, %]	Variační koeficient
$\bar{x}$	[-]	Aritmetický průměr
$x$	[-]	Osa x
$x_i$	[-]	Číslo měření
$y$	[-]	Osa y

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Základní klasifikace polymerů [37]</i> .....	15
<i>Obrázek 2: Rozdělení polymerů dle aplikace [24]</i> .....	16
<i>Obrázek 3: Struktura polymerů (a – lineární polymer; b – rozvětvený polymer; c – polymer se zkříženými články; d – síťovaný polymer) [35]</i> .....	17
<i>Obrázek 4: Struktura kopolymerů [39]</i> .....	18
<i>Obrázek 5: Příklad distribuční křivky [6]</i> .....	19
<i>Obrázek 6: Vzorec PA 66 obsahující skupinu – CO – NH – [33]</i> .....	20
<i>Obrázek 7: Rozdělení polyamidů [3, 41]</i> .....	20
<i>Obrázek 8: Schéma vzniku PA 66 [43]</i> .....	21
<i>Obrázek 9: Spotřeba polyamidů v západní Evropě v roce 2003 [44]</i> .....	24
<i>Obrázek 10: Schéma vzniku sítě [2]</i> .....	27
<i>Obrázek 11: Elektromagnetické spektrum záření [42]</i> .....	31
<i>Obrázek 12: Penetrace jednotlivých typů záření [36]</i> .....	33
<i>Obrázek 13: Schéma elektronového urychlovače [24]</i> .....	34
<i>Obrázek 14: Ionizace a excitace [5]</i> .....	35
<i>Obrázek 15: Schematické znázornění průchodu částic <math>\beta</math> látkou a mechanismu ionizace [20]</i> .....	36
<i>Obrázek 16: Distribuce dávky záření ve vodě v jednotkách cm [36]</i> .....	37
<i>Obrázek 17: Srovnání jednostranného a oboustranného způsobu ozáření [5]</i> .....	38
<i>Obrázek 18: Závislost molekulové hmotnosti na velikosti dávky záření [5]</i> .....	40
<i>Obrázek 19: Oblasti využití ionizujícího záření [25, 28, 46]</i> .....	42
<i>Obrázek 20: Princip radiačního síťování [21]</i> .....	43
<i>Obrázek 21: Ilustrační pohled na vliv záření na polymerní řetězce [5]</i> .....	44
<i>Obrázek 22: Radiační síťování beta zářením [24]</i> .....	45
<i>Obrázek 23: Vlastnosti polymerů v závislosti na dávce záření (1 – tažnost; 2 – pevnost v tahu; 3 – tvarová stálost za tepla; 4 – botnání) [24]</i> .....	46
<i>Obrázek 24: Struktura PA 6 GF 30 (a – neozářeného; b – ozářeného) [23]</i> .....	47
<i>Obrázek 25: Zkušební těleso typu 1A a 1B [17, 26]</i> .....	50
<i>Obrázek 26: Různé způsoby uchycení zkušebních těles [18]</i> .....	51
<i>Obrázek 27: Tahový diagram [34]</i> .....	52
<i>Obrázek 28: Sušící zařízení ARBURG THERMOLIFT 100 – 2</i> .....	57
<i>Obrázek 29: Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 470H 1000 – 400</i> .....	58

Obrázek 30: Univerzální zkušební stroj ZWICK ROELL 1456 .....	59
Obrázek 31: Elektronový urychlovač Rhodotron 10 MeV – 200 kW [47].....	60
Obrázek 32: Vstříkovaná zkušební tělesa .....	63
Obrázek 33: Připravená paleta se zkušebními tělesy určená pro dávku záření 132 kGy.....	64
Obrázek 34: Pohled na dozimetr s identifikátorem (1 – před ozářením; 2 – po ozáření).....	64
Obrázek 35: Naměřené výsledky z gelové zkoušky pro oba polyamidy .....	65
Obrázek 36: Box-plotový diagram pro neozářený PA 66 GF 30 – modul pružnosti v tahu $E$ .....	68
Obrázek 37: Box-plotový diagram pro neozářený PA 66 GF 30 – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ .....	69
Obrázek 38: Box-plotový diagram pro neozářený PA 66 GF 30 – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ .....	70
Obrázek 39: Box-plotový diagram pro neozářený PA 7T GF 56 – modul pružnosti v tahu $E$ .....	71
Obrázek 40: Box-plotový diagram pro neozářený PA 7T GF 56 – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ .....	72
Obrázek 41: Box-plotový diagram pro neozářený PA 7T GF 56 - poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ .....	73
Obrázek 42: Sumarizace naměřených výsledků z tahové zkoušky pro neozářené polyamidy (a, b – modul pružnosti v tahu $E$ ; c, d – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ ; e, f – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ ).....	74
Obrázek 43: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy – modul pružnosti v tahu $E$ .....	75
Obrázek 44: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ .....	76
Obrázek 45: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ .....	77
Obrázek 46: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy – modul pružnosti v tahu $E$ .....	78
Obrázek 47: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ .....	79

Obrázek 48: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ .....	80
Obrázek 49: Sumarizace naměřených výsledků z tahové zkoušky pro polyamidy ozářené 66 kGy (a, b – modul pružnosti v tahu E; c, d – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ ; e, f – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ ) .....	81
Obrázek 50: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 132 kGy – modul pružnosti v tahu E.....	82
Obrázek 51: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 132 kGy – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ .....	83
Obrázek 52: Box-plotový diagram pro PA 66 GF 30 ozářený 132 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ .....	84
Obrázek 53: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy – modul pružnosti v tahu E.....	85
Obrázek 54: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ .....	86
Obrázek 55: Box-plotový diagram pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ .....	87
Obrázek 56: Sumarizace naměřených výsledků z tahové zkoušky pro polyamidy ozářené 132 kGy (a, b – modul pružnosti v tahu E; c, d – mez pevnosti v tahu $\sigma_M$ ; e, f – poměrné prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ ) .....	88
Obrázek 57: Porovnání modulu pružnosti v tahu E u neozářeného a ozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách .....	89
Obrázek 58: Porovnání modulu pružnosti v tahu E u neozářeného a ozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách .....	90
Obrázek 59: Porovnání meze pevnosti v tahu $\sigma_M$ u neozářeného a ozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách .....	91
Obrázek 60: Porovnání meze pevnosti v tahu $\sigma_M$ u neozářeného a ozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách .....	92
Obrázek 61: Porovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ u neozářeného a ozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách .....	93
Obrázek 62: Porovnání poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu $\epsilon_{\sigma M}$ u neozářeného a ozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách .....	94

<i>Obrázek 63: Kvadratický (A) a kubický (B) regresivní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> na teplotě <math>T</math> pro neozářený PA 66 GF 30.....</i>	<i>96</i>
<i>Obrázek 64: Kvadratický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> na teplotě <math>T</math> pro neozářený PA 7T GF 56.....</i>	<i>98</i>
<i>Obrázek 65: Kvadratický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> na teplotě <math>T</math> pro PA 66 GF 30 ozářený 66 kGy.....</i>	<i>99</i>
<i>Obrázek 66: Kvadratický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> na teplotě <math>T</math> pro PA 7T GF 56 ozářený 66 kGy .....</i>	<i>100</i>
<i>Obrázek 67: Kvadratický regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> na teplotě <math>T</math> pro PA 66 GF 30 ozářený 132 kGy.....</i>	<i>101</i>
<i>Obrázek 68: Lineární regresní model závislosti poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> na teplotě <math>T</math> ve vybrané oblasti kubického regresního modelu pro PA 7T GF 56 ozářený 132 kGy .....</i>	<i>102</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1: Charakteristické vlastnosti PA 66 [3, 6, 10] .....</i>	21
<i>Tabulka 2: Navlhavost u jednotlivých polyamidů [3] .....</i>	23
<i>Tabulka 3: Technologické porovnání síťovacích metod u polymerů [5] .....</i>	29
<i>Tabulka 4: Porovnání jednotlivých ozařovacích technologií [5, 11] .....</i>	33
<i>Tabulka 5: Vybrané polymery a jejich reakce na ionizující záření [1] .....</i>	39
<i>Tabulka 6: Hodnoty G(X) a G(S) pro vybrané typy polyamidů [29] .....</i>	40
<i>Tabulka 7: Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B [26] .....</i>	50
<i>Tabulka 8: Vybrané vlastnosti PA 66 GF 30 [48] .....</i>	61
<i>Tabulka 9: Vybrané vlastnosti PA 7T GF 56 [49] .....</i>	61
<i>Tabulka 10: Procesní parametry vstřikovacího stroje pro jednotlivé polyamidy .....</i>	62
<i>Tabulka 11: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu E [MPa] u neozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách .....</i>	68
<i>Tabulka 12: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu <math>\sigma_M</math> [MPa] u neozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách .....</i>	69
<i>Tabulka 13: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> [%] u neozářeného PA 66 GF 30 při různých teplotách .....</i>	70
<i>Tabulka 14: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu E [MPa] u neozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách .....</i>	71
<i>Tabulka 15: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu <math>\sigma_M</math> [MPa] u neozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách .....</i>	72
<i>Tabulka 16: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> [%] u neozářeného PA 7T GF 56 při různých teplotách .....</i>	73
<i>Tabulka 17: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu E [MPa] u PA 66 GF 30 ozářeného 66 kGy při různých teplotách .....</i>	75
<i>Tabulka 18: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu <math>\sigma_M</math> [MPa] u PA 66 GF 30 ozářeného 66 kGy při různých teplotách .....</i>	76
<i>Tabulka 19: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> [%] u PA 66 GF 30 ozářeného 66 kGy při různých teplotách .....</i>	77
<i>Tabulka 20: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu E [MPa] u PA 7T GF 56 ozářeného 66 kGy při různých teplotách .....</i>	78
<i>Tabulka 21: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu <math>\sigma_M</math> [MPa] u PA 7T GF 56 ozářeného 66 kGy při různých teplotách .....</i>	79

<i>Tabulka 22: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> [%] u PA 7T GF 56 ozářeného 66 kGy při různých teplotách.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 23: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu E [MPa] u PA 66 GF 30 ozářeného 132 kGy při různých teplotách.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka 24: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu <math>\sigma_M</math> [MPa] u PA 66 GF 30 ozářeného 132 kGy při různých teplotách.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 25: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> [%] u PA 66 GF 30 ozářeného 132 kGy při různých teplotách.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 26: Naměřené výsledky modulu pružnosti v tahu E [MPa] u PA 7T GF 56 ozářeného 132 kGy při různých teplotách.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka 27: Naměřené výsledky meze pevnosti v tahu <math>\sigma_M</math> [MPa] u PA 7T GF 56 ozářeného 132 kGy při různých teplotách.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka 28: Naměřené výsledky poměrného prodloužení při mezi pevnosti v tahu <math>\epsilon_{\sigma M}</math> [%] u PA 7T GF 56 ozářeného 132 kGy při různých teplotách.....</i>	<i>87</i>



**SEZNAM PŘÍLOH**

*Příloha P1 Tahová zkouška – PA 66 GF 30 – Neozářený*

*Příloha P2 Tahová zkouška – PA 66 GF 30 – Ozářený 66 kGy*

*Příloha P3 Tahová zkouška – PA 66 GF 30 – Ozářený 132 kGy*

*Příloha P4 Tahová zkouška – PA 7T GF 56 – Neozářený*

*Příloha P5 Tahová zkouška – PA 7T GF 56 – Ozářený 66 kGy*

*Příloha P6 Tahová zkouška – PA 7T GF 56 – Ozářený 132 kGy*

*Příloha P7 CD – ROM*

**PŘÍLOHA P1: TAHOVÁ ZKOUŠKA – PA 66 GF 30 – NEOZÁŘENÝ**

Veličina	Teplota [°C]	Číslo měření									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E [MPa]	23	6942,4	5915,1	8064,1	8751,0	7734,3	8825,6	7002,7	7750,0	7802,4	7620,4
	50	5804,5	5903,9	5598,1	4969,4	5091,2	6414,8	6229,9	6328,3	6654,7	6150,4
	80	4293,5	4908,2	5066,9	4826,2	5152,9	4642,2	5193,5	4741,6	4762,1	5204,8
	110	4116,7	3994,6	3773,1	3915,0	4144,8	4302,3	4254,1	4640,6	4017,5	4233,5
	140	4015,0	3891,4	3502,3	3844,4	3313,4	3516,3	3891,0	3781,1	3801,3	3907,5
	170	3284,6	3206,2	3263,2	3349,8	3600,3	3590,0	3657,0	3556,7	3237,6	3783,9
	200	2433,7	3518,6	3416,0	3151,1	2976,2	3352,5	3573,9	3582,5	3625,9	3012,5
	230	2557,5	3171,1	1916,4	3503,1	3016,4	3227,1	2915,6	2669,0	2627,5	2567,5
	23	160,29	161,02	170,51	168,28	169,71	162,91	155,04	162,30	154,47	152,37
	50	121,94	121,36	123,87	126,61	129,49	125,14	121,06	126,10	128,76	120,97
$\sigma_{10}$ [MPa]	80	102,59	105,03	106,99	107,50	106,38	101,12	103,88	104,71	100,39	110,39
	110	89,72	89,71	83,43	79,52	82,52	92,83	89,19	93,38	88,37	92,88
	140	79,07	81,00	75,67	80,91	78,77	77,29	79,22	80,38	77,32	79,35
	170	68,21	67,97	65,71	70,31	69,63	68,57	71,76	72,00	67,70	70,90
	200	54,71	54,84	55,56	53,85	60,85	55,10	60,29	58,33	62,94	63,69
	230	36,70	40,57	38,44	45,65	41,18	41,42	44,63	45,76	43,54	45,97
	23	6,15	6,12	6,03	6,14	6,06	5,88	6,19	6,08	6,11	5,96
	50	8,92	8,21	8,32	8,31	7,96	7,66	8,12	7,77	7,36	8,49
	80	10,61	10,21	10,09	10,26	10,02	10,09	10,46	10,08	10,53	9,94
	110	11,05	10,91	10,84	10,47	9,98	10,55	11,51	10,96	10,97	11,07
$\epsilon_{0,10}$ [%]	140	10,64	10,19	10,81	10,68	11,14	10,32	10,86	11,10	11,04	11,21
	170	11,14	10,43	11,52	11,24	11,18	11,15	10,78	11,35	11,39	10,26
	200	10,54	9,74	9,92	10,71	9,58	9,44	11,10	10,87	10,36	10,88
	230	9,30	9,94	10,62	10,16	8,84	9,37	10,25	10,26	10,62	10,01

**PŘÍLOHA P2: TAHOVÁ ZKOUŠKA – PA 66 GF 30 – OZÁŘENÝ 66 KGY**

Veličina	Teplota [°C]	Číslo měření									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E [MPa]	23	9084,0	10459,6	9602,9	9649,9	8786,8	10298,1	9228,4	10087,2	9428,1	9378,6
	50	6358,5	4201,6	4080,9	6292,5	4815,4	5230,2	4023,1	6789,7	6254,3	4248,8
	80	4841,9	4428,1	4655,0	4448,0	4761,2	4596,3	4272,2	4734,4	4070,5	4351,1
	110	3413,9	5245,2	5748,3	2748,0	4036,9	3399,9	4267,5	4764,9	4059,5	5210,0
	140	3161,9	3487,3	4161,5	3633,0	4274,2	4292,1	4018,6	3021,8	4017,0	4207,8
	170	2966,3	3101,7	3874,0	2870,0	3234,6	3129,8	2641,7	2922,0	3685,8	3724,2
	200	3398,5	2739,2	2768,1	2560,2	2543,3	2394,6	3125,6	3904,0	3480,0	3790,6
	230	2064,7	2362,0	2625,8	3191,4	2175,3	1778,1	2548,7	2696,8	2217,9	2835,3
	23	177,62	184,01	183,37	183,46	185,03	178,40	179,80	183,87	180,24	182,17
	50	132,13	131,41	132,39	131,67	131,41	129,58	131,19	130,21	130,70	132,54
$\sigma_{10}$ [MPa]	80	103,70	104,25	102,00	102,56	106,89	101,42	407,10	105,96	106,94	104,22
	110	85,89	89,58	88,62	88,42	87,20	84,22	90,09	90,24	88,20	89,24
	140	75,22	77,39	77,67	78,03	76,25	79,23	78,98	77,80	77,56	75,96
	170	64,72	66,69	67,74	67,94	67,92	67,10	63,42	67,14	65,20	69,05
	200	52,88	50,90	52,84	53,17	53,40	55,82	55,30	53,05	58,29	57,82
	230	38,72	39,54	37,44	38,44	33,71	35,08	41,11	39,04	42,24	43,76
	23	5,76	5,97	5,50	5,76	5,48	5,64	5,52	5,65	5,87	6,02
	50	7,00	7,33	7,01	7,31	7,00	7,42	7,61	7,21	6,99	7,35
	80	8,84	8,65	8,78	8,14	8,17	8,57	8,39	8,30	8,49	8,57
	110	8,89	8,55	9,60	8,31	9,11	9,50	8,66	8,56	8,97	8,66
$\epsilon_{0,01}$ [%]	140	8,92	9,17	8,59	8,87	9,27	8,63	8,77	8,71	9,09	8,85
	170	9,05	9,28	8,88	9,12	9,30	8,96	9,41	9,01	9,03	8,87
	200	8,39	9,16	8,56	9,40	8,53	8,42	8,77	7,37	8,92	9,23
	230	8,63	7,84	8,06	7,83	7,55	7,69	7,45	8,68	8,38	7,74

PŘÍLOHA P3: TAHOVÁ ZKOUŠKA – PA 66 GF 30 – OZÁŘENÝ 132 KGY

Veličina	Teplota [°C]	Číslo měření									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E [MPa]	23	8951,4	7970,8	8207,4	9627,9	10203,0	9175,7	8833,1	9757,6	9263,0	9562,1
	50	3906,2	3684,8	6641,5	6030,0	3796,0	5022,0	6706,2	5381,9	5156,3	5156,2
	80	5388,8	5177,7	5002,4	5115,2	4892,0	5164,9	4566,2	4418,9	4811,4	4335,1
	110	4635,9	4544,9	4433,8	4132,4	5101,3	4318,1	5227,0	4722,3	4545,2	4899,5
	140	4028,7	4084,6	4035,7	4428,4	3782,9	4358,1	4635,8	3924,4	4201,4	3791,7
	170	3849,4	3089,0	3946,0	3104,0	3243,3	3030,4	3054,7	3471,7	2853,4	3221,6
	200	3453,3	3766,6	3056,2	2653,4	2574,8	3681,3	3597,5	3778,5	2577,2	2891,3
	230	2263,5	1874,3	2449,0	1989,9	2324,3	2017,7	1994,6	2939,6	2509,2	2930,8
	23	182,96	181,46	180,47	181,98	180,88	182,27	183,79	180,23	183,52	184,66
	50	13319	135,62	132,79	131,53	135,70	135,91	135,95	132,24	134,52	134,02
80	109,17	107,11	109,40	107,52	107,38	105,90	109,06	108,89	107,54	108,36	
$\sigma_{10}$ [MPa]	110	90,79	88,05	90,37	89,06	90,08	87,50	88,83	89,91	90,98	89,21
	140	75,82	76,24	75,70	77,15	78,13	76,01	77,46	76,52	78,36	75,26
	170	63,82	65,27	65,84	64,19	64,96	65,46	64,14	66,38	64,15	66,77
	200	52,85	53,27	52,41	53,69	51,57	56,23	56,56	54,17	56,34	54,24
	230	36,58	34,77	36,72	31,51	34,72	37,74	34,96	35,62	38,85	39,97
	23	5,83	5,68	5,86	5,69	5,67	5,81	5,75	5,70	5,61	5,77
	50	6,89	7,58	7,03	7,53	7,04	6,77	7,12	7,50	7,05	6,94
	80	7,85	8,02	8,23	7,79	7,84	8,02	8,05	8,00	7,80	8,40
	110	8,28	7,94	8,67	8,30	8,83	8,08	8,57	8,17	8,72	8,47
	140	8,92	8,46	8,43	8,57	8,42	8,62	8,64	8,87	8,69	8,68
$\epsilon_{0,10}$ [%]	170	8,30	8,54	8,77	8,86	8,56	8,66	8,43	8,74	8,77	8,86
	200	8,24	8,84	8,26	8,33	8,37	8,46	8,63	8,61	8,50	8,45
	230	8,14	8,20	8,32	7,84	7,78	7,93	8,29	7,93	8,06	8,48

**PŘÍLOHA P4: TAHOVÁ ZKOUŠKA – PA 7T GF 56 – NEOZÁŘENÝ**

Veličina	Teplota [°C]	Číslo měření									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E [MPa]	23	17462,9	15933,0	18956,0	20633,7	15309,4	12501,1	17373,2	15519,7	20733,7	15708,2
	50	7889,6	8607,1	7357,5	9438,9	9590,8	8939,0	8686,3	10693,4	10383,0	7951,2
	80	7444,3	7575,8	7345,5	7628,0	7448,0	7485,1	7254,5	7432,1	7887,4	7731,2
	110	7634,0	5370,4	6632,7	6195,2	8296,6	7513,8	6487,0	7425,2	7193,9	7851,9
	140	6816,6	6022,4	5637,3	6897,3	6410,2	6070,1	6751,1	6092,8	6371,4	6409,1
	170	6119,6	5754,8	6353,3	5252,6	6188,6	6134,4	6017,9	5560,7	5351,3	5748,5
	200	4794,0	4868,8	4191,7	4379,1	5299,2	4560,5	5073,6	5155,4	5178,3	4182,9
	230	2874,3	2504,5	2563,3	2372,7	2425,8	3387,9	3290,6	2885,4	3378,0	3350,4
	23	244,16	226,25	234,46	198,60	234,71	244,44	240,12	244,12	223,92	205,86
	50	164,64	156,53	169,75	167,82	172,49	155,67	165,87	167,55	160,88	157,72
$\sigma_{100}$ [MPa]	80	125,48	125,81	122,46	125,46	126,01	124,35	122,24	124,89	126,91	124,02
	110	101,86	100,56	99,62	104,02	106,31	99,37	102,54	104,18	103,19	99,38
	140	84,79	86,46	83,55	86,14	84,63	80,78	87,52	87,36	87,90	84,87
	170	67,09	68,69	69,49	72,37	69,53	72,69	71,76	73,33	65,71	67,11
	200	46,43	49,87	52,46	53,51	51,40	50,76	54,11	56,21	41,54	45,87
	230	17,25	21,71	20,34	18,09	24,38	24,17	24,03	23,89	20,89	17,57
	23	5,06	5,32	4,91	5,22	5,15	5,02	5,09	4,96	5,32	5,14
	50	5,43	6,61	6,00	6,47	6,06	5,64	6,65	6,27	6,25	6,07
	80	8,12	7,67	8,22	8,08	7,69	7,95	7,55	8,08	7,97	8,08
	110	7,72	8,09	8,79	8,59	8,09	7,48	7,17	7,56	7,99	8,10
$\epsilon_{0,10}$ [%]	140	7,63	7,63	7,95	7,38	7,22	6,97	7,72	6,81	7,09	7,88
	170	7,30	7,21	7,35	7,13	6,81	6,93	7,23	6,64	7,03	7,44
	200	6,02	5,72	5,84	5,22	6,00	5,75	6,12	6,10	5,58	5,95
	230	2,25	2,24	2,59	2,42	3,33	3,37	3,28	3,36	2,52	2,26

PŘÍLOHA P5: TAHOVÁ ZKOUŠKA – PA 7T GF 56 – OZÁŘENÝ 66 KGY

Veličina	Teplota [°C]	Číslo měření									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E [MPa]	23	18755,7	18314,0	12345,6	17032,1	14414,8	18252,5	14192,6	15559,3	13063,7	16950,8
	50	12523,2	12488,3	10682,3	7885,6	12677,0	10497,3	13127,4	11477,0	10422,8	10558,7
	80	7381,8	7837,6	7240,8	8147,2	7003,4	7337,6	6722,2	8147,3	5792,9	6957,4
	110	8196,4	7133,3	7050,1	6697,2	7764,1	6461,5	7768,0	6575,1	6326,4	5569,5
	140	6733,3	6160,5	6228,4	6848,9	6117,2	6699,8	6744,0	6345,1	7024,8	6789,1
	170	5391,5	5324,2	5309,9	6245,8	5578,5	5830,9	6044,1	6316,0	5749,7	6727,8
	200	4323,9	5255,3	4656,5	5566,6	4474,9	4309,6	4497,4	4111,6	4289,4	5223,1
	230	2130,6	2278,1	2531,7	2509,3	2467,9	2622,5	2229,2	2071,4	2382,4	2498,5
	23	233,72	240,29	249,71	256,57	224,62	216,72	214,71	218,39	208,94	223,54
	50	182,79	175,22	170,52	190,68	174,38	190,01	185,23	184,67	164,05	193,54
$\sigma_{10}$ [MPa]	80	116,90	125,79	130,15	128,87	115,21	133,07	128,48	102,98	125,31	133,10
	110	100,21	100,03	104,24	104,66	106,09	105,92	105,40	99,67	98,31	102,64
	140	71,29	82,26	83,75	85,78	78,43	80,02	79,56	72,88	87,94	74,14
	170	64,01	57,42	53,45	59,08	50,25	55,20	64,88	68,83	67,03	61,62
	200	45,15	52,00	48,27	53,77	39,52	56,78	54,90	54,82	40,03	51,80
	230	23,94	33,12	25,35	24,72	29,63	24,62	33,92	32,25	32,40	34,38
	23	4,27	3,75	4,42	5,07	4,65	3,88	4,22	4,37	3,81	4,63
	50	5,45	4,52	4,55	5,56	4,51	5,55	5,15	4,37	5,38	4,51
	80	6,07	6,66	6,99	7,31	6,45	4,69	7,51	7,60	6,24	6,66
	110	6,86	7,78	7,82	7,44	7,50	6,97	6,58	6,38	7,43	6,95
$\epsilon_{0,10}$ [%]	140	6,78	6,87	7,11	6,54	7,58	6,50	7,02	7,25	6,77	6,82
	170	7,05	7,02	6,58	5,55	7,06	7,14	5,59	6,43	7,83	6,91
	200	6,51	5,42	7,22	7,16	5,58	6,93	7,54	6,98	6,59	6,36
	230	6,16	6,77	5,99	6,54	5,33	6,73	6,72	6,00	5,50	6,23

PŘÍLOHA P6: TAHOVÁ ZKOUŠKA – PA 7T GF 56 – OZÁŘENÝ 132 KGY

Veličina	Teplota [°C]	Číslo měření									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E [MPa]	23	15483,1	14924,4	18373,6	16063,3	16109,4	16844,4	14667,0	19743,2	16288,1	14596,2
	50	14131,8	10216,1	13020,0	15328,9	12874,2	12453,4	14459,1	13102,8	15191,0	15578,2
	80	7957,2	8274,3	7330,3	7880,6	9493,3	9533,9	8956,0	7391,4	6428,8	7642,1
	110	6989,1	6619,9	7057,5	6505,1	7102,0	7285,0	7893,8	6816,4	6730,9	7155,5
	140	7566,0	7384,3	8234,6	7387,7	5481,6	6665,2	6851,5	6825,8	6852,1	5911,9
	170	6054,0	5616,8	5645,8	6608,8	5153,5	6749,4	5468,5	7338,2	6675,7	7310,4
	200	4950,6	3797,5	4935,4	3933,4	4462,5	4837,4	4788,9	4574,5	5003,7	4634,9
	230	2256,8	2180,7	2506,6	2348,6	1945,3	324,8	2930,3	2279,0	2805,5	2455,6
	23	239,50	245,09	263,26	256,15	263,04	241,73	251,73	246,21	251,95	262,21
	50	183,31	180,01	204,40	198,91	201,92	186,31	204,98	187,25	196,58	181,84
$\sigma_{10}$ [MPa]	80	121,91	124,91	140,92	141,63	130,54	118,65	124,56	140,97	130,40	119,63
	110	84,96	103,59	105,05	97,17	91,16	93,77	105,47	87,94	83,59	92,62
	140	64,72	69,72	81,05	69,78	82,76	76,00	66,21	73,26	78,73	73,67
	170	66,11	59,29	68,99	60,54	56,40	61,21	55,08	70,23	57,88	73,26
	200	45,57	38,67	34,64	48,43	37,14	36,02	51,35	37,66	43,14	43,69
	230	28,41	27,70	24,78	27,24	32,00	32,57	31,02	26,51	28,33	33,89
	23	4,78	5,14	5,02	4,96	4,96	5,59	5,70	4,71	5,16	5,06
	50	4,54	3,91	5,06	4,75	4,52	5,24	4,08	4,60	4,80	4,06
	80	6,02	5,13	7,00	6,05	5,09	6,74	7,00	6,69	5,99	6,14
	110	4,96	4,49	6,93	5,57	5,55	5,40	6,25	4,79	5,21	5,55
$\epsilon_{0,011}$ [%]	140	3,82	4,22	5,50	4,09	3,79	4,32	3,59	4,49	5,25	5,25
	170	5,83	4,28	6,33	4,43	4,23	4,30	3,73	5,07	3,94	5,63
	200	6,00	3,91	3,45	5,89	3,32	5,85	4,65	3,31	3,69	3,69
	230	6,44	6,78	4,26	5,24	5,09	7,20	6,63	3,91	4,53	5,53