

# **Mechanické vlastnosti tenkých vysoce plněných elastických polymerních fólií**

Bc. Eva Snášelová

---

Diplomová práce  
2015

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav inženýrství polymerů  
akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Eva Snášelová**  
Osobní číslo: **T13385**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Mechanické vlastnosti tenkých vysoce plněných elastických  
polymerních fólií**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na zadané téma.
2. Provedte měření registračních tisků na paropropustných fóliích v rolích vyrobených při různých podmínkách
3. Provedte laboratorní měření mechanických a viskoelastických vlastností na vzorcích paropropustných fólií připravených z vyrobených rolí
4. Zpracujte naměřené výsledky, proveďte jejich vyhodnocení a popis
5. Z naměřených výsledků vyberte směs s nejstabilnějšími registrovanými tisky a navrhnete další postupy pro proces stabilizace raportů.
6. Citujte veškerou použitou literaturu.
7. Zpracujte seznam zkratk, symbolů, tabulek, grafů a obrázků.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

L. H. SPERLING, Introduction to Physical Polymer Science (2005). ISBN-13: 978-047

B. MEISSNER, V. ZILVAR, Fyzika polymerů : struktura a vlastnosti polymerních materiálů (1987). ISBN 04-634-87

H. BARNES, J. HUTTON a K. WALTERS, An Introduction to Rheology (1989). ISBN 0-444-87140-3

Ch. W. MACOSKO, Rheology: Principles, Measurements, and Applications (1994). ISBN 0-471-18575-2

A. N. WILKINSON, A. J. RYAN, Polymer Processing and Structure Development (1998). ISBN 0-7514-0363-6

R. D. SMITH, Roll and Web Defect Terminology (2007). ISBN-10: 1595101381

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Daniel Sanétník**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**16. ledna 2015**


Termín odevzdání diplomové práce:

**15. května 2015**

Ve Zlíně dne 2. března 2015

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



  
Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ..... *ŠNAŠELOVÁ EVA* .....

Obor: ..... *Inženýrství polymerů* .....

## 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 užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně ..... *14.5.2015* .....

..... *Šnašlová* .....

<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 přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce bylo provést měření registrovaného tisku paropropustných fólií a laminátů a provést laboratorní zkoušky kríповé, relaxační a tahové. V teoretické části se práce zaměřuje na výklad viskoelastického chování a mechanických vlastností polymerních materiálů. Pro zjištění mechanických a viskoelastických vlastností fólií a laminátů byly provedeny laboratorní testy. Na základně zjištěných dat byly vyhodnoceny nejvhodnější receptury z hlediska registrovaných tisků.

Klíčová slova: paropropustná folie, paropropustný laminát, kríp, relaxace, registrovaný tisk

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis was to measure registered printing permeable films and laminates and perform laboratory tests creep, relaxation and tension. The theoretical part of the thesis focuses on the interpretation of the viscoelastic behavior and mechanical properties of polymeric materials. To determine the mechanical and viscoelastic properties of the films and laminates were performed by laboratory tests. Based on the obtained data were evaluated in terms of the best recipes of registered printing.

Keywords: Breathable films, breathable laminates, creep, relaxation, registered printing

Touto cestou bych na prvním místě chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Danielu Sanétrníkovi, díky němuž mohla tato práce vzniknout, za jeho vedení, věnovaný čas, rady a trpělivost. Poděkování také patří mé rodině, za poskytnutí zázemí a projevenou podporu po celou dobu studia. Děkuji i mému příteli, který mi byl velkou oporou během studia.

*„Když všichni mluví o nemožnostech, hledej možnosti.“*

(Tomáš Baťa, 1876 – 1932)

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POLYMERNÍ MATERIÁL</b> .....	<b>12</b>
1.1 STRUKTURA POLYMERŮ .....	13
1.1.1 Polyetylen.....	15
1.2 POLYMERNÍ SMĚSI.....	16
1.3 KOMPAUNDACE.....	17
1.4 VYSOCE PLNĚNÉ POLYMERNÍ FÓLIE .....	19
1.4.1 Uhlíčitán vápenatý .....	20
1.5 LAMINACE FÓLÍÍ.....	21
<b>2 VISKOELASTICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ</b> .....	<b>23</b>
2.1 VISKÓZNÍ MATERIÁLY .....	23
2.2 ELASTICKÉ MATERIÁLY .....	26
2.3 VISKOELASTICKÉ MATERIÁLY .....	28
<b>3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI</b> .....	<b>31</b>
3.1 KRÁTKODOBÉ ZKOUŠKY .....	31
3.1.1 Tahová zkouška.....	31
3.1.2 Odolnost proti trhání .....	33
3.2 DLOUHODOBÉ ZKOUŠKY .....	34
3.2.1 Kríповá zkouška.....	35
3.2.2 Relaxační zkouška.....	38
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>42</b>
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘADÁNÍ</b> .....	<b>43</b>
4.1 VZORKY .....	44
4.2 REGISTROVANÝ TISK.....	45
4.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	47
<b>5 VÝSLEDKY</b> .....	<b>49</b>
5.1 ROZPTYL RAPORTŮ .....	49
5.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	51
5.3 KRÍPOVÉ A RELAXAČNÍ ZKOUŠKY .....	56
5.3.1 Zkouškové směsi 1 až 4 .....	56
5.3.2 Zkouškové směsi 5 až 10 .....	62
5.3.3 Netkané textilie .....	65
5.4 ZKOUŠKA ODOLNOSTI PROTI TRHÁNÍ.....	67
<b>6 DISKUZE</b> .....	<b>70</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>72</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>73</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>73</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>79</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>80</b>



<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>81</b>
---------------------------	-----------

## ÚVOD

V dnešní době se staly polymerní materiály nedílnou součástí mnoha oblastí našeho každodenního života. Nejinak je tomu i v oblasti osobní hygieny. Aby mohly dětské pleny, dámské hygienické či inkontinenčních vložky nebo prostředky pro dlouhodobě nemocné poskytovat jistý komfort pro uživatele, jsou na výrobu sortimentu použity mikroporézní paropropustné fólie, které zabezpečují průchod tekutiny v podobě páry, ale tekutinu v kapalně formě zadržují. Díky těmto vlastnostem může pokožka lépe dýchat a tím může potlačovat vznik nepříjemných onemocnění kůže.

Paropropustné folie pro výrobu dětských plen jsou potisknuty dětskými motivy formou registrovaného tisku, což představuje tisk za pomoci registrovaných značek za sebou po celé délce role, na pravé i levé straně. Následně je fólie laminována s netkanou textilií a výrobek je distribuován jako paropropustný laminát. Vzdálenost registračních značek je výrobcem garantována, ovšem vlivem viskoelastického chování dochází k nedodržení stanovených vzdáleností značek. Posun způsobuje problémy na zpracovatelských linkách při laminaci dalších vrstev dětských plen. Tito odběratelé řeší problém s posunem vzdáleností značek reklamacemi, to je pro výrobce fólií a laminátů nejen ekonomickou ztrátou, ale také nemalou ekologickou zátěží.

Cílem diplomové práce je tedy provést laboratorní testy k vyhodnocení mechanických a viskoelastických vlastností vzorků fólií a laminátů a na základně experimentálních výsledků vyhodnotit nejvhodnější polymerní směs k výrobě paropropustné fólie s ohledem na stabilitu registrovaného tisku.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERNÍ MATERIÁL

V průmyslových laboratořích se zrodila věda, která byla až mnohem později přijata mezi akademické vědy, a to věda polymerní. Polymerní věda je vědou kombinující především chemii, nauku o materiálech, chemické inženýrství a mnoho dalších příbuzných oblastí. Výzkum v oblasti polymerních věd dále produkuje nepřeborné množství nových materiálů. Všechny nové informace a teorie se sjednocují a jsou výsledkem chování polymerních materiálů [1].

Polymerní věda je poměrně novým oborem, který se zabývá plasty, přírodními a syntetickými vlákny, pryžemi, nátěry, lepidly, tmely a mnoha dalšími materiály, jejichž produkce v současnosti stále vzrůstá [2]. Nicméně původ dnešních průmyslově vyráběných polymerních materiálů sahá až do devatenáctého století, kdy byly zaznamenány významné objevy modifikací některých přírodních polymerů. V roce 1839 Charles Goodyear zjistil, že elastické vlastnosti přírodního kaučuku se mohou zlepšit a jeho lepivost lze odstranit zahříváním s přídavkem síry. V roce 1851 si nechal bratr Charlese Goodyeara Nelson patentovat proces vulkanizace přírodního kaučuku [3]. Modifikace dalšího přírodního materiálu nitrocelulózy vedla k objevu prvního termoplastického materiálu – celuloиду. V roce 1897 byl v Německu vyroben galalit reakcí kaseinu s formaldehydem. První syntetický reaktoplast (fenol-formaldehyd) je známý jako Bakelit, který byl získán v roce 1907 polykondenzací fenolu s formaldehydem a následně v letech 1909 až 1910 uveden na trh [2].

Počátek a celá první polovina 20. století je v dnešní době označována jako etapa vývoje a výzkumu chemických látek a reakcí. I prvotní syntézy polyetyleny (PE) jsou přičítány mnoha pokusům. V roce 1898 jej Han von Pechmann připravil náhodou při zahřívání diazometanu. Jeho kolegové Eugen Bamberger a Friedrich Tschirner charakterizovali bílou pevnou látku obsahující metylenové jednotky a nazvali materiál polymetylenem. PE z etylenového monomeru byl původně syntetizován vysokoškolským studentem M. E. P. Friedrichem, zatímco pracoval pro Carla S. Marvela, a v roce 1930 došlo k tvorbě nežádoucího vedlejšího produktu z reakce etyleny s alkyllithiem [4]. Následně se Fawcett a Gibson se snažili připravit reakci etyleny a benzaldehydu za podmínek 1960 atm a 170 °C. Experiment bylo ale těžké aplikovat v praxi, a tak od svých pokusů ustoupili. V roce 1938 s využitím nových přístrojů dochází ke komerční produkci PE, o rok později byla zaznamenána výroba 10,5 tun a pouze o tři roky později představovala spotřeba polyetyleny 576

tun [5]. Knižní publikace z roku 2013 poukazuje na každoroční produkci přes 50 miliard tun polymerního materiálu jen v USA.

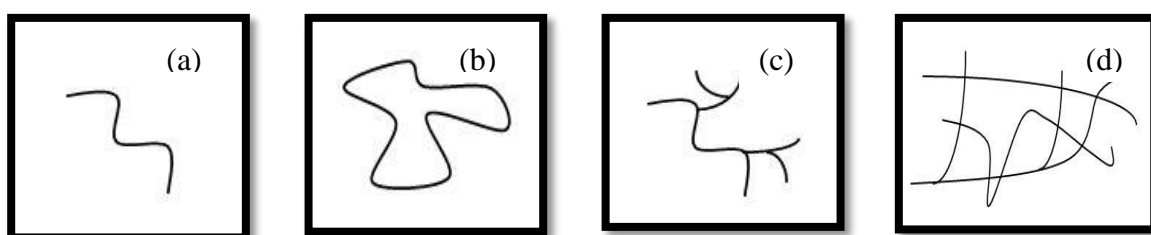
V 30. letech 20. století se také objevují materiály, které se staly strategickými během 2. světové války, a to nízkohustotní polyetylen a polyamid 66 známý jako nylon využívaný při výrobě vlečných lan a pláten pro padáky. Další etapa vývoje syntetických látek během 60. a 70. let 20. století je obdobím výzkumu vlastností již objevených plastů a jejich aplikačního uplatnění, přesto i v těchto letech vznikají nové skupiny polymerních materiálů jako polysulfony a polyimidy. Velkým objevem se stala vlákna aromatických polyamidů – kevlarová vlákna, která i v současnosti vynikají svou mimořádnou pevností srovnatelnou s ocelovými vlákny. Další desetiletí představuje velký rozvoj v oblasti polymerních směsí a polymerních kompozitů, jako je směs polykarbonátu a akrylonitrilbutadienstyrenu. Na konci 20. století se objevují tzv. plasty na míru, a to díky řadě objevů katalyzátorů (metallocenové) umožňující při chemických syntézách citlivé řízení distribuce délek makromolekul, ale i syntézu nových materiálů (syndiotaktický polypropylen). Současné objevy v oblasti syntetických materiálů zahrnují objevy tzv. polymerních nanomateriálů a tzv. inteligentní polymerů [4].

## 1.1 Struktura polymerů

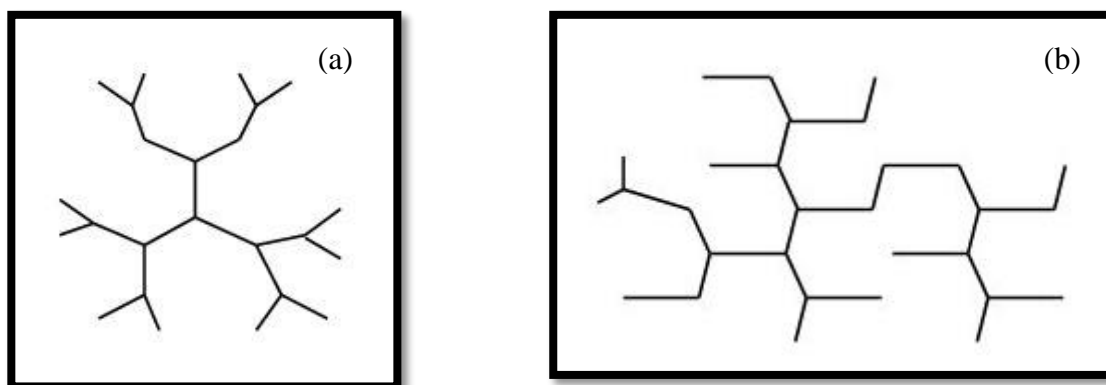
Začátkem 20. století vědci hlásali neobvyklé vlastnosti polymerních materiálů a v roce 1920 vzešlo společné přesvědčení, že se skládají z fyzicky spojených malých molekul. O pochopení struktury polymerního materiálu se zasloužil Hermann Staudinger, který označil polymery jako materiály, které jsou složeny z velmi velkých molekul obsahujících dlouhou posloupnost jednoduchých chemických jednotek [3].

Polymery jsou tedy materiály skládající se z jednoduchých makromolekulárních organických sloučenin. Tyto sloučeniny mohou být vyrobeny buď synteticky, nebo transformací z přírodních zdrojů. Makromolekula je označení struktury kovalentně vázaných opakujících se monomerních jednotek. Termín plast se používá, když se odkazuje na syntetický materiál bez ohledu na strukturu a reakce nezbytných pro syntézu. Polymerní materiál je tedy kombinací definic polymeru a plastového materiálu, který je tvořen makromolekulami, a to skrze chemickou reakci neboli proces, při kterém se dosahuje vzniku polymerů, známém jako polymerace [6].

Makromolekula může mít několik skeletálních podob, jak je znázorněno na obrázku 1 (lineární, cyklickou, rozvětvenou nebo zesíťovanou). V posledních letech stále více roste zájem o složitější struktury materiálů s makromolekulární povahou. Zvláště zajímavými jsou dendrimery (obrázek 2a), což jsou větvené polymery s dobře definovanou strukturou a vysoce rozvětvené polymery (obrázek 2b), které jsou dendrimerům podobné, ale mají mnohem méně definovanou strukturu. Výzkumy těchto typů polymerů zesílily v průběhu 90. let minulého století a nyní se nacházejí aplikace (senzory, prekuzory, v oblasti medicíny nosiče aktivních látek, nanotechnologie), které využívají jejich vlastností [3].



Obrázek 1 – skeletální struktura makromolekuly – (a) lineární, (b) cyklická, (c) rozvětvená a (d) zesíťovaná [3]



Obrázek 2 – skeletální struktura makromolekuly – (a) dendrimer a (b) vysoce větvený polymer [3]

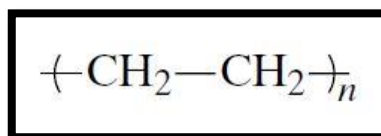
Stupeň krystalinity je jednou z nejdůležitějších charakteristik polymeru tím, že určuje mechanické vlastnosti, jako je mez kluzu, elastický modul nebo odolnost proti nárazu. Na příkladu polyetylen tereftalátu (PET) lze poukázat na rozdílnost vlastností materiálu dvou stavů, které u polymerů nastávají – amorfni a krystalický. Amorfni PET má z hlediska ko-

merčního uplatnění malou hodnotu, protože má špatné mechanické vlastnosti, nízkou rozměrovou stabilitu a vysokou rychlost permeace pro plyny, na druhé straně krystalický PET má vyšší pevnost, dobrou rozměrovou stabilitu a chemickou odolnost. Stupeň krystalinity je teplotně závislá charakteristika a při porovnání jeho vlivu na materiál také silně závislá. Měření stupně krystalinity polymerních materiálů je prováděno pomocí diferenční skenovací kalorimetrie [7]. Polymerní materiály, které jsou složeny z krystalických oblastí, vždy obsahují amorfní oblasti mezi krystaly. Proto termoplastické materiály, které obsahují obě fáze, uspořádanou krystalickou a neuspořádanou amorfní, se označují jako semikrystalické. Materiály, které neobsahují krystalickou fázi, se označují jako amorfní [6].

Velikost polymerních molekul je určována veličinou zvanou molární hmotnost, která vyjadřuje poměr hmotnosti soustavy a látkového množství. Látkové množství představuje veličinu k určování množství látky podle počtu molekul. Jinou mírou je polymerační stupeň, který udává počet monomerních jednotek v makromolekule [8]. Aby mohla být látka označena za látku polymerní, měla by splňovat určitou molekulovou hmotnost. Konkrétní číselná hodnota molekulové hmotnosti pro označení polymerní látky je často předmětem diskuzí, avšak řada vědců se shoduje na hodnotě 25 000 g/mol. Tato hodnota je hodnotou minimální molekulové hmotnosti, při které dojde k dosažení dobrých fyzikálních a mechanických vlastností pro mnoho významných polymerů [1].

### 1.1.1 Polyetylen

Polyetylen (PE) je nejstarší a ve své struktuře nejjednodušší polymer řadící se do skupiny polyolefinů [5]. Polyolefiny představují třídu polymerních alkanů bez vedlejších skupin obsahující 1 000 až 3 000 uhlíkových atomů [1]. Typů PE je hned několik a některé z nich obsahují striktně lineární polymerní řetězce, jiné PE mohou obsahovat ve svých řetězcích větve [9]. Na obrázku 3 je znázorněna struktura PE vycházející ze struktury monomeru etylenu, jenž má vzorec  $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$  [1].



Obrázek 3 – struktura PE [1]

PE lze rozdělit podle hustoty (tabulka 1) na 6 základních typů: 1) vysoko hustotní polyetylen (HDPE), 2) ultra vysokomolekulární vysoko hustotní polyetylen (UHMW HDPE), 3) středně hustotní polyetylen (MDPE), 4) lineární nízko hustotní polyetylen (LLDPE), 5) velmi nízko hustotní polyetylen (VLDPE) a 6) nízko hustotní polyetylen (LDPE) [9].

Tabulka 1 – rozdělení PE podle hustoty a stupně krystalinity

Typ PE	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )	Stupeň krystalinity (%)
HDPE	0,960 – 0,941	65 – 60
UHMW HDPE	0,935 – 0,930	-
MDPE	0,940 – 0,926	55 - 45
LLDPE	0,926 – 0,915	45 – 30
VLDPE	< 0,915	< 25
LDPE	0,910 – 0,940	45 - 55

## 1.2 Polymerní směsi

V dnešní době hrají polymerní směsi v průmyslu velmi důležitou roli, protože umožňují upravit požadované vlastnosti na základě složek dané směsi. Zvláště důležitými se staly minerály plněné systémy, jež mají díky své kombinaci vylepšené vlastnosti s nižšími náklady [10]. Typů polymerních směsí je nepřeberné množství a technologie přípravy směsí je jednou z hlavních oblastí výzkumu a vývoje v oboru polymerů v posledních třech desetiletích [11].

K základnímu polymernímu materiálu je přidáváno různorodých typů materiálů, které jsou označovány jako aditiva. Tyto přísady jsou rozdělovány podle chemické povahy na anorganické nebo organické, podle geometrických tvarů (vlákna, vločky, kuličky, částice) nebo podle jejich funkce, kterou mají plnit. Běžnými anorganickými plnivými jsou: 1) oxidy (hořčíku, křemíku, hliníku), 2) hydroxidy (hlinitý, hořečnatý), 3) soli (uhličitan vápenatý, síran barnatý, síran vápenatý), 4) silikáty (mastek, slída, kaolin, jílové nanočástice,



živec) a 5) kovy (bór, ocel). Používanými organickými materiály jsou především: 1) různé formy uhlíku a grafitu (vlákna, vločky, nanotrubičky, fullereny), 2) přírodní polymery (vlákna celulózy, dřevitá moučka a vlákna, len, bavlna, škrob) a 3) syntetické polymery (polyamidy, polyestery) [12].

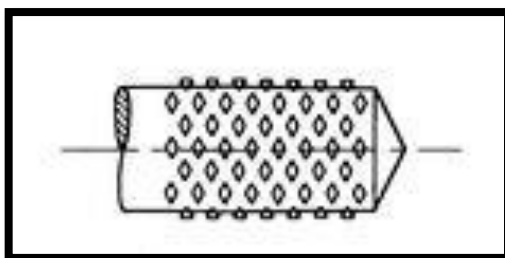
Aditiva jsou široce používána pro všechny typy polymerních materiálů a jedná se o změkčovadla, tepelné stabilizátory, UV stabilizátory, antioxidanty, lubrikanty, látky zpomalující hoření, barviva, modifikátory houževnatosti, biocidní a jinak pomocné látky [13]. Ať už je použit jakýkoli typ aditiva k polymernímu materiálu, musí být charakterizován parametrem rozpustnosti. Kompatibilita složek nastává ve chvíli, kdy jsou tyto parametry pro polymer a aditivum dostatečně blízké, v opačném případě dochází k oddělování fází [14]. Pro kapaliny byl parametr rozpustnosti definován jako druhá odmocnina hustoty kohezní energie. I když byl koncept vyvinut pro kapaliny, velmi brzy byl aplikován na polymery jako stanovení parametru bobtnání lehce zesíťovaného polymeru ve velkém množství rozpouštědla. Parametr rozpustnosti rozpouštědla v místě nejvyššího nabobtnání zesíťovaného polymeru je považován za parametr rozpustnosti polymeru [11].

Směsi na bázi polymerních odpadů mohou být jedním ze způsobů, jak zvýšit povědomí o recyklaci ve společnosti. Vzhledem k tomu, že plniva hrají významnou roli při určování vlastností a chování polymerních kompozitů, mohou být právě recyklovatelné polymery použity dále jako plnivo. Na tuto skutečnost poukazuje jedna ze studií zabývající se vlastnostmi polymerních směsí skládající se z recyklovaného polyetyleny, polypropylenu, slídy a skleněného vlákna. Byly testovány interakce matrice a plniva a jejich vliv na tepelnou degradaci připravených systémů [15].

### 1.3 Kompaundace

Jednou z technologií přípravy polymerních směsí je kompaundace, při které jsou vmíchávána aditiva do základního polymerního materiálu pro zlepšení výsledných vlastností nebo zpracovatelnosti. Kompaundaci při vytlačování lze rozdělit do několika fází: předúprava, míchání, dávkování, tavení, míchání do žádoucí struktury a generace vysokého tlaku. Poslední fáze, při které dochází k vyvíjení dostatečně vysokého tlaku, způsobuje protlačení polymerní směsi vytlačovací hlavou. Při kompaundaci se využívá dvou hlavních principů míchání, jež jsou dány typem míchacího elementu, a podle toho se rozlišuje míchací element distributivní a disperzní. Dva základní elementy se větví a používá se tak řada dalších podtypů.

Distributivní míchání je označováno jako laminární, protože všechny toky v oblasti zpracování polymerů jsou laminární. Nicméně během míchání dochází k deformaci materiálu, která je spolu s celkovým napětím v jednotlivých složkách rozhodující při určování jakosti míchání. Distributivní míchací elementy mohou být – dutinové, s kruhovými kolíky či s výstupky připomínající ananas, odtud název „Pineapple mixer“ (obrázek4).



Obrázek 4 – „Pineapple mixer“ [12]

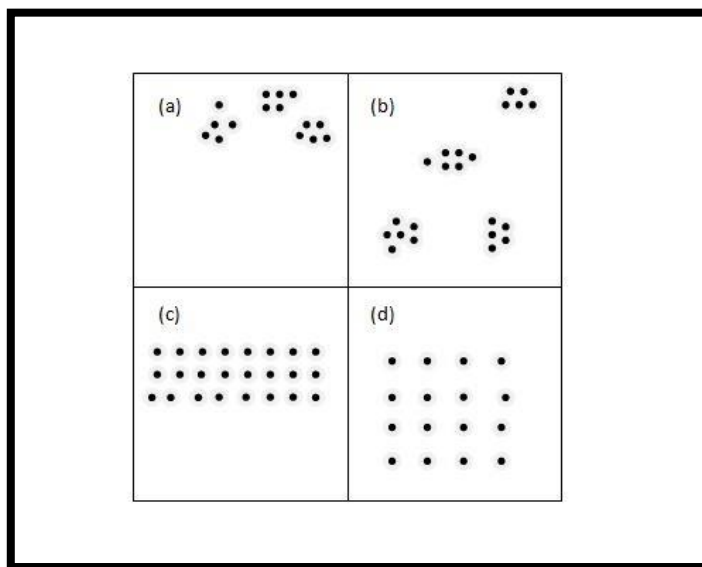
Disperzní míchání je termín používaný k popisu míchání spojeným s nějakou zásadní změnou fyzikálních vlastností jedné nebo více složek směsi. Platí, že disperzní míchání se dělí na dvě části: 1) začlenění přísad (aglomerované částice, druhá polymerní složka) do polymerní matrice a 2) disperze druhé fáze, čímž se získává konečný produkt [16]. Disperzní míchací elementy jsou opatřeny tvarově rozmanitými drážkami a nejpopulárnějším je tzv. „Egan mixer“ [12].



Obrázek 5 – „Egan mixer“ [12]

Vliv na kompaundaci má nejen geometrie míchacího zařízení, ale i fyzikální vlastnosti materiálu (viskozita, hustota) nebo provozní podmínky (teplota, rychlost otáčení, rychlost proudění, doba zdržení), a tím lze ovlivnit účinnost míchání a kvalitu produktu. Rozdíl mezi dobrou a špatnou distribucí a dispergací je znázorněn na obrázku 6, kde jsou

zobrazeny čtyři možné případy výsledného míchání - špatná distribuce i špatná dispergace (a), dobrá distribuce, ale špatná disperze (b) špatná distribuce, ale dobrá disperze (c), dobrá distribuce i dobrá disperze (d) [16].



Obrázek 6 – kvalita distributivní a disperzního míchání [16]

#### 1.4 Vysoce plněné polymerní fólie

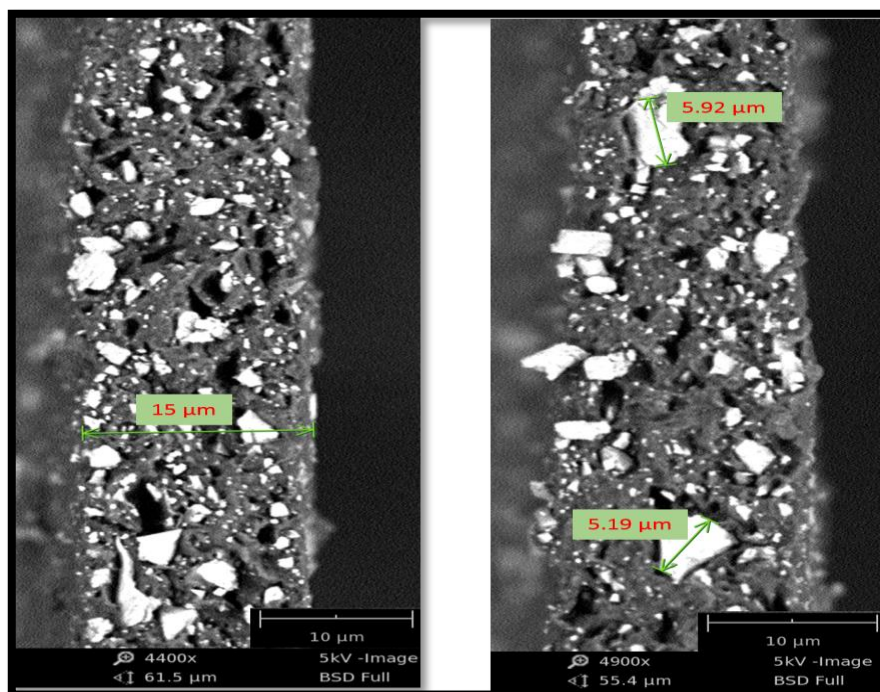
V této diplomové práci jsou použity fólie vyrobené z vysoce plněného polyetyleny technologií vytlačování. Navrženy a vyrobeny jsou tak, že jejich uplatnění je možné pro prodyšné hygienické výrobky. S vysokým uživatelským komfortem může pokožka lépe dýchat a snižuje se tak výskyt nepříjemných vedlejších účinků, jako jsou záněty kůže nebo vznik opruzenin. Proto výrobky nacházejí uplatnění jako vnější strana při výrobě jednorázových hygienických potřeb jako jsou dětské pleny, dámské nebo inkontinenční vložky a prostředky pro dlouhodobě nemocné. Tyto materiály mohou být použity nejen jako zadní strana jednorázových dětských plen, ale například i pro výrobu prodyšných chirurgických pláštů [10].

Při jejich výrobě se využívá LDPE, jehož hustota se pohybuje v rozmezí  $0,915 \text{ g/cm}^3$  až  $0,926 \text{ g/cm}^3$  a stupeň krystalinity je 45 % až 30 %. Největší aplikační zastoupení LDPE představuje až z 80 % výroba fólií [9].

### 1.4.1 Uhličitan vápenatý

Použití anorganických plniv je v plastikářském průmyslu využíváno ke snížení nákladů a zlepšení zpracovatelnosti [13] a mechanických vlastností termoplastů (stálost za tepla, tvrdost, tuhost nebo smrštění). Účinky plniva na mechanické a další vlastnosti kompozitů závisí silně na jeho tvaru, velikosti částic, velikosti agregovaných částic, povrchových vlastnostech a stupni disperze. Obecně platí, že mechanické vlastnosti jsou horší při plnění částicemi o velikosti mikrometrů než částicemi v řádech nanometrů stejného plniva [17].

Uhličitan vápenatý ( $\text{CaCO}_3$ ) hraje důležitou roli v oblasti výroby hygienických prostředků, kde je používán jako plnivo pro LLDPE a následnou výrobu fólií. Bylo prokázáno, že přídavek  $\text{CaCO}_3$  k PE zajišťuje tvorbu pórů v mikrometrech jinak nepropustné PE fólie, což má za následek aplikační použití v oblastech, kde je potřeba přenosu vodní páry [10]. Hustota pórů ve fólii se pohybuje až v hodnotách miliardy/ $\text{cm}^2$  a velikost pórů je menší než kapka vody, takže kapičky vody nemohou proniknout. Nicméně póry jsou mnohem větší než molekuly vodní páry, takže pára může snadno pronikat fólií. Na obrázku 7 je snímek mikroporézní struktury fólie ze skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) o tloušťce asi  $15\mu\text{m}$  [18].

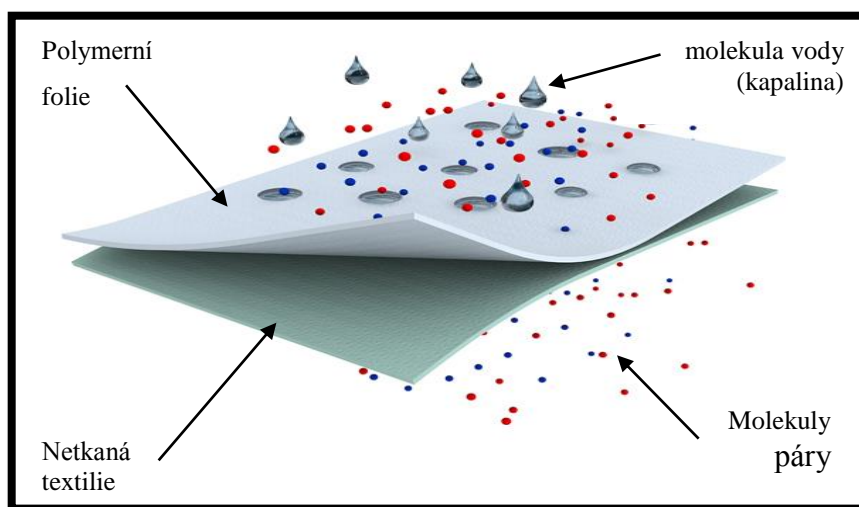


Obrázek 7 – SEM snímky mikroporezní paropropustné fólie

## 1.5 Laminace fólií

Četné příklady v literatuře ukazují, jak vytlačování dvou nebo více polymerů do heterogenních vrstevnatých struktur může produkovat fólie s žádoucími kombinacemi vlastností. Pro obalové materiály se používají lamináty na bázi polymerů s požadovanými vlastnostmi, jako je kyslíková, vodní nebo UV bariéra, pevnost a odolnost teple, čehož není samotný polymer sám o sobě schopen [19].

Mikroporézní paropropustné folie mohou být kombinovány se speciálními materiály a produktem je paropropustný laminát (obrázek 8). Pro výrobu kompozitů jsou dodávány tkaniny, které vytváří pocit látkového materiálu. Tkanina navíc zvyšuje mechanickou pevnost laminátu v mnoha jeho aplikačních oblastech. Výrobce dodané vzorky pro diplomovou práci jsou: 1) paropropustné PE folie a 2) paropropustné lamináty vyrobené laminací PE folie a netkané textilie.



Obrázek 8 – příklad struktury paropropustného laminátu [20]

Mikroporézní folie může být navázána na tkaninu prostřednictvím lepení, tepelného spojení nebo za pomoci ultrazvukové vazby. Pro průmyslové aplikace (podklady koberců, stavební a konstrukční materiály), které používají kompozity na bázi polymerní folie a netkané textilie, je mechanická pevnost poskytována tkaninou v kompozitu velmi důležitá. Pro tyto vysoce pevné průmyslové materiály musí být mezifázová vazba mezi folií a vrstvou látky odolávající drsnějšímu zacházení nebo dlouhodobé expozici velmi pevná [18].

Termín netkaná textilie může být matoucí, protože se zde objevují hned dvě definice. V prvním slova smyslu se jedná o textil, který není tkán. Ovšem běžnější je však termín netkaná textilie používán v textilním průmyslu pro označení jakéhokoliv textilního výrobku, který je vytvořen přímo z vláken a je držen pohromadě lepením nebo zapletením.

Obecnou charakteristikou netkaných textilií je jejich široké uplatnění v oblasti průmyslu – od oděvního, nábytkářského po spotřební. Jsou vyráběny přímo z vláken nebo ze staplových vláken a jejich výroba je ve srovnání s tkanými či pletenými látkami levnější. Další výhodou netkaných textilií je to, že netvoří žádná zrna či zámotky a mají podobné vlastnosti jako vlákna, ze kterých jsou vyráběny, přičemž tyto vlastnosti mohou být modifikovány.

V medicíně jsou netkané textilie nepostradatelné, používají se v oblastech chirurgie, ortopedie, dentální medicíny nebo jako sterilní obalový materiál. Důležité uplatnění nachází netkaná textilie v oblasti osobní péče a hygieny, jako jsou různé hygienické ubrousky, tampóny, inkontinenční produkty a dětské jednorázové pleny [21].

## 2 VISKOELASTICKÉ CHOVÁNÍ POLYMERŮ

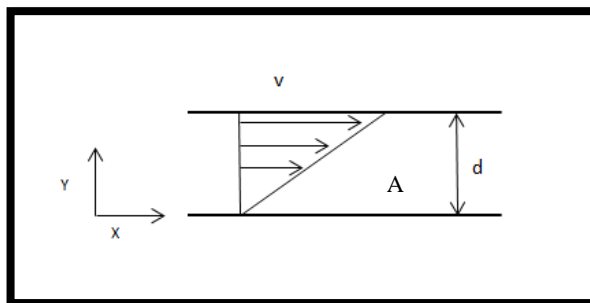
Přímý vztah mezi molekulárními vlastnostmi a makroskopickými mechanickými vlastnostmi polymerních materiálů byl v minulosti předmětem rozsáhlého počtu akademických a průmyslových výzkumných studií. Motivací bylo, že odpověď na tuto otázku by mohla vést ke směrnicím, jak na míru vytvořit materiály, které by mohly sloužit našim potřebám, aniž by bylo potřeba rozsáhlých vývojů a pokusů. Přesto žádný skutečný univerzálně použitelný úspěch nebyl zaznamenán. A to i přesto, že byl zaveden společný pojem pro chování polymerů – deformace. Proto je nejprve důležité pochopit, co vlastní deformační chování polymerních materiálů znamená [22].

### 2.1 Viskózní materiály

Působí-li na kapaliny konstantní smykové napětí, tečou a s časem lineárně rostou jejich smyková deformace. Dojde-li k ustálení toku, je smyková rychlost  $\dot{\gamma}$  podle Newtonova zákona úměrná smykovému napětí  $\sigma$  s konstantou úměrnosti – viskozitou  $\eta$  (rovnice 1).

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

Na obrázku 9 je znázorněn jednoduchý smykový tok mezi dvěma rovnoběžnými deskami ve vzdálenosti  $d$  od sebe, přičemž horní deska se pohybuje rychlostí  $v$  vzhledem k desce spodní. V případě, že se horní deska za použití konstantní síly  $F$  pohybuje konstantní rychlostí ke spodní desce ve směru rovnoběžném s povrchem desky, můžeme definovat rychlost smykové deformace (rovnice 2). Napětí je definováno jako síla  $F$  působící na plochu  $A$  (rovnice 3)



Obrázek 9 – jednoduchý smykový tok [23]

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{d} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Charakteristika toku je důležitým úkolem v oblasti akademického výzkumu a zpracovatelského průmyslu pro kontrolu, měření a identifikaci taveniny. Polymerní taveniny vykazují rysy, kterými se odchyľují od zákonů dynamiky newtonovské kapaliny. Komplexní taveniny obvykle vykazují neneutronské chování, a to v rámci závislosti smykové viskozity. Schopnost předvídat proudová pole neneutronských toků složitých tvarů je nezbytné pro mnoho aplikací. To je často případ v technických aplikacích, které měření požadovaných fyzikálních veličin nemohou provádět přímo, ale je třeba je vyvodit z veličin, které lze měřit. Problémy tohoto druhu se označují jako inverzní problémy a vyžadují použití pokročilých matematických modelů k jejich řešení [24]. Pokud je tedy zjišťována viskozita taveniny polymeru, tak se získaná hodnota viskozity odvíjí především od rychlosti smykové deformace [25].

Závislost viskozity na rychlosti smykové deformace je velmi užitečná a vztah je dobře známý jako "power-law" model [1]. Tato vazba je popsána v rovnicích 4 a 5, kde  $n$  je index neneutronského chování a  $K$  je konstanta nazývaná konzistencí. Z „powerlaw“ modelu jsou odvozeny dva druhy tokového chování tzv. neneutronských kapalin (obrázek 10). Chování, která jsou odlišná od Newtonova zákona, se označují jako dilatantní a pseudo-plastické [25].

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

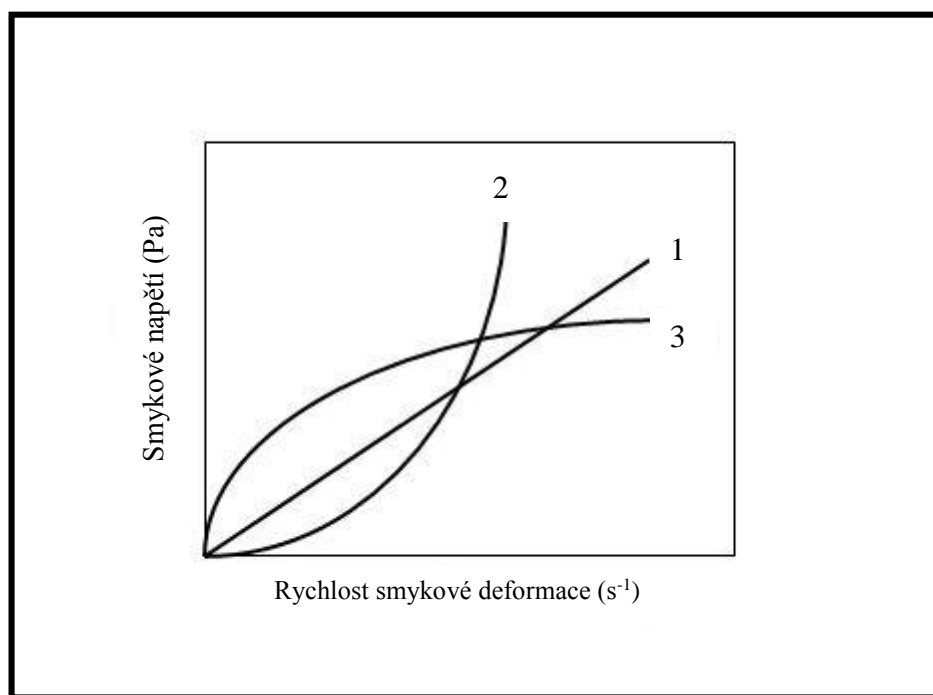
$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Při chování dilatantním ( $n > 1$ ) dochází ke zvyšování viskozity při zvýšení smykové rychlosti (křivka 2). Pokud nedochází k žádné interakci mezi částicemi, pak při velmi nízké smykové rychlosti, kdy kapalná fáze má čas proudit mezi pevnými částicemi, bude nastávat mírný odpor k toku. Začne-li se zvyšovat rychlost smykové deformace, je pro kapalinu stále obtížnější se pohybovat dostatečně rychle, a proto je stále více energie disipová-



no. To má za následek rychle rostoucí viskozitou, která dosáhne maxima, po němž má kapalina tendenci ke zlomu a přestane se chovat jako kapalina.

U pseudoplastického chování ( $n < 1$ ) je viskozita redukována při vzrůstu rychlosti smykové deformace (křivka 3). Chování je vysvětlováno pomocí dlouhých molekul řetězce při nulové smykové rychlosti, které jsou náhodně orientované, stočené a propletené. Dochází-li ke zvyšování rychlosti smykové deformace, molekuly se rozplétají a mají tendenci být odebrány do prostoru. Z tohoto důvodu se při vysoké smykové rychlosti viskozita blíží omezující minimální hodnotě, která odpovídá stavu molekuly společnému rovnoběžně aplikovanému napětí. Když je smyková rychlost snížena, molekuly se vracejí k částečně svinuté formě, kde se sjednotí síly a jsou v rovnováze se silami, které mají sklon způsobit svinutí molekul [26].

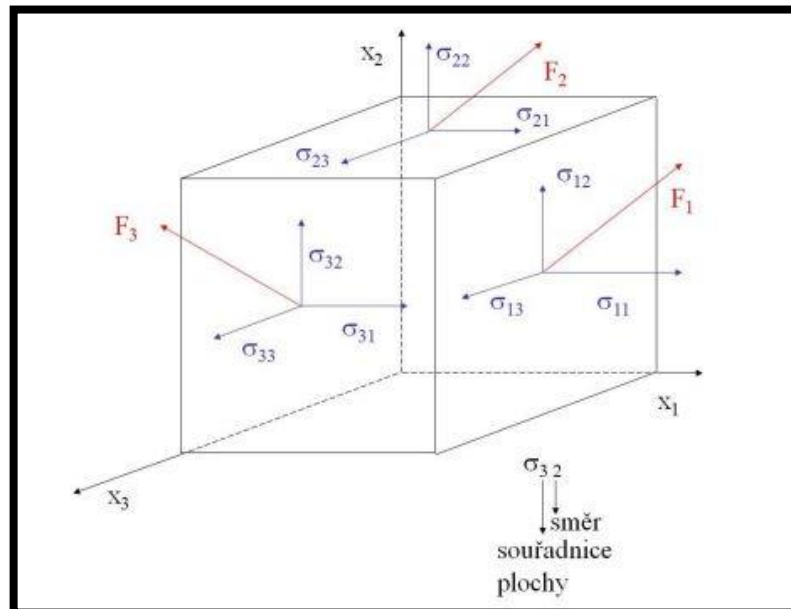


Obrázek 10 – Newtonská (1), pseudoplastická (2) a diletantní kapalina (3) [26]

## 2.2 Elastické materiály

Na pevné těleso působí různé síly, které mohou být v rovnováze a nemění se tak kinematický stav tělesa, ale způsobují jejich deformaci, čímž se změní tvar a velikost tělesa [8]. Teorie elasticity popisuje vratné deformace pevných těles vystavených excitacím různých fyzikálních vlastností (mechanické, tepelné, elektromagnetické). Takové excitace lze distribuovat po celém objemu tělesa nebo přes rozhraní generovat deformace (tj. lokální deformaci) nebo napětí (tj. lokální napětí). Elasticita je základní mechanická vlastnost materiálu a tím se předpokládá: 1) vztah mezi okamžitými poměrnými deformacemi a napětími a 2) vrácení se materiálu do svého původního stavu, pokud je historie excitace obrácena [27].

Napětí je poměr síly působící na jednotku plochy deformovaného tělesa a rozlišují se dva typy působící síly (resp. napětí): 1) normálové síly působící kolmo na plochu a 2) smykové síly působící ve směru rovnoběžném s plochou. Na element tvaru krychle o ploše  $A$  působí síly, které jsou rovnoběžné se souřadnicovými osami (obrázek 11) –  $F_1$  v rovině  $x_1x_3$ ,  $F_2$  v rovině  $x_1x_2$  a síla  $F_3$  v rovině  $x_2x_3$ . Jejich rozkladem do souřadnicového systému dostáváme celkově 9 složek napětí – 3 normálová a 6 smykových [8].



Obrázek 11 – napjatost v objemovém elementu [28]

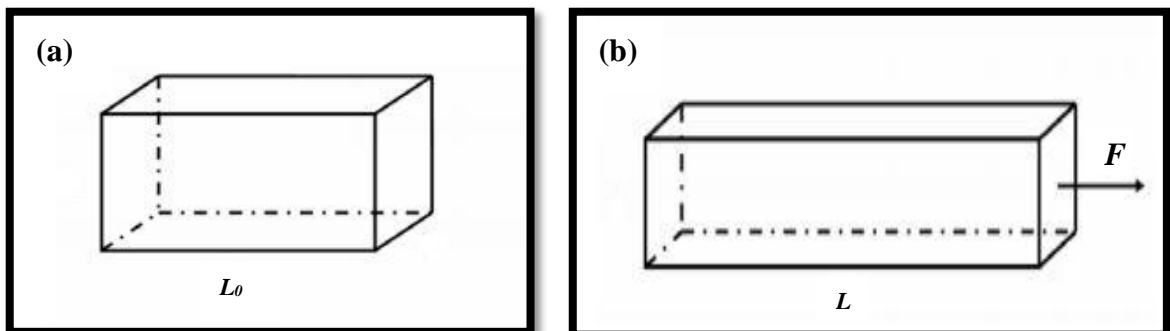
Poprvé si deformace tělesa (konkrétně prodloužení) povšiml Robert Hook. Roku 1660 zaznamenal, že prodloužení pružiny je přímo úměrné hmotnosti tělesa na ní visící. Od tohoto experimentálního pozorování modeloval chování pružných materiálů a uvedl zákon: „*Uttensio sic vi*“ (česky: jaké prodloužení, taková síla) publikován v roce 1678 [29], který předpokládá dokonalou pružnost hmotného tělesa. Podle něj je pojmenován následovně zapsaný zákon (rovnice 6):

$$\varepsilon = E \cdot \sigma \quad (6)$$

Hookův zákon znamená, že deformace v tahu ( $\varepsilon$ ) je přímo úměrná tahovému (normálovému) napětí přes konstantu zvanou Youngův modul pružnosti ( $E$ ). Přičemž Youngův modul pružnosti je základní míra tuhosti materiálu. Čím vyšší je jeho hodnota, tím větší je odolnost materiálu deformaci [1]. Tahové napětí (rovnice 7) je definováno jako síla působící na plochu nedeformovaného tělesa o počáteční délce  $L_0$  (obrázek 12a). Deformací se rozumí poměr změny délky  $\Delta L$  ke konečné délce  $L$  (rovnice 8) deformovaného tělesa (obrázek 12b), kde změna délky  $\Delta L$  zaznamenává přírůstek délky k délce počáteční  $L_0$  [1, 30]

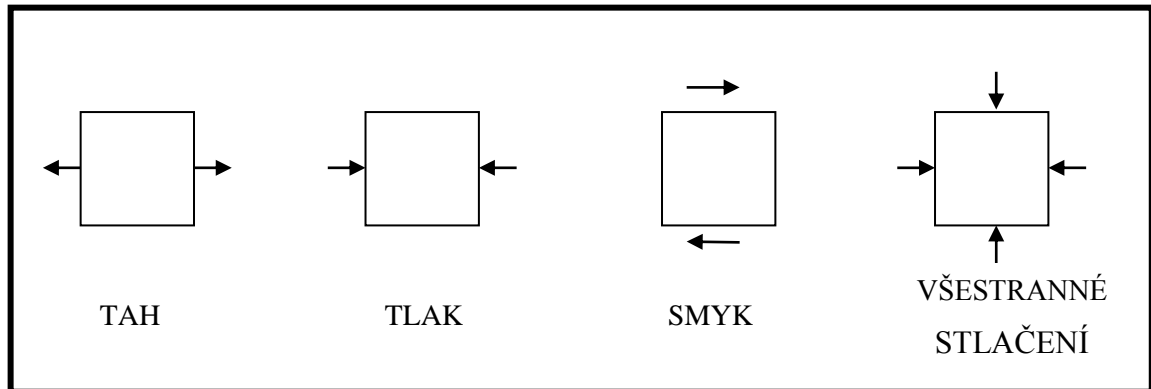
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (8)$$



Obrázek 12 – původní těleso (a) a těleso po deformaci tahem (b) [31]

Těleso může být namáháno nejen tahem, ale i tlakem, smykem nebo všestranným stlačením. Jednotlivé případy deformačního namáhání jsou zobrazeny na obrázku 13.

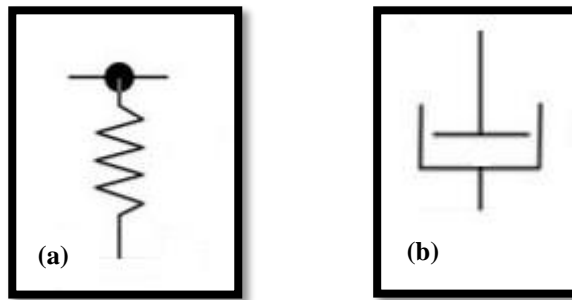


Obrázek 13 – typy deformačního namáhání [31]

### 2.3 Viskoelastické materiály

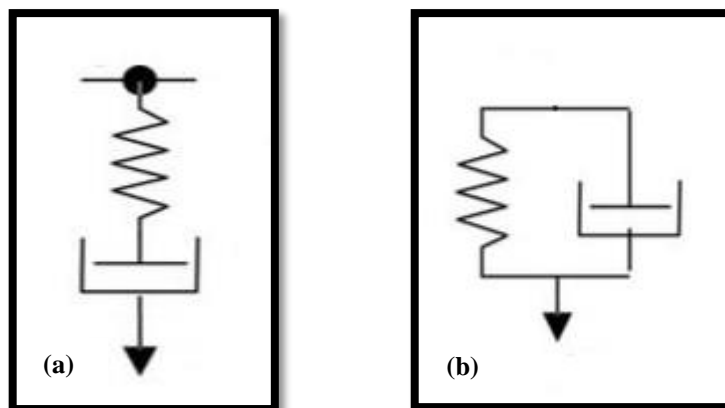
Ve skutečnosti žádná kapalina nevykazuje čistý Newtonský tok a žádné pevné těleso nevykazuje čisté elastické chování. Naopak všechny deformace reálných těles jsou kombinací obou prvků - toku a pružnosti. Z důvodu, že polymerní materiály jsou tvořeny charakteristickými dlouhými řetězci, označujeme pak jejich chování a vlastnosti jako viskoelastické. Popisem viskoelastického chování se zabývá samostatný vědní obor zvaný reologie [1]. Jsou-li materiálové vlastnosti závislé pouze na čase, ale ne na úrovni mechanického zatížení, nazývá se takové chování materiálu jako lineárně viskoelastické. Lineární viskoelasticita je přesně definována pouze pro rozmezí nekonečně malých zatížení.

Lineární viskoelastické chování je vyjádřením kombinace lineárního elastického a lineárního viskózního procesu [32]. S ohledem na složitost chování reálných systémů a pro jednodušší pochopení je velmi praktické znázorňovat viskoelastické chování za pomoci viskoelastických modelů [8]. Viskoelastické modely jsou sestaveny uspořádáním dvou základních jednotkových elementů Hookovské pružiny (obrázek 14a) zastupující elastické chování a Newtonovského pístu (obrázek 14b) znázorňující viskózní chování.



Obrázek 14 – Hookův (a) a Newtonův element (b) [33]

Zapojením dvou jednotkových elementů vznikají dvouparametrové modely, a jsou-li pružina a píst zapojeny v sérii (Maxwellův model – obrázek 15a), předpokládá se relaxace napětí za konstantní deformace. V opačném případě jsou píst a pružina zapojeny paralelně (Kelvinův model – obrázek 15b) a model předpovídá kříp za konstantního zatížení [33].

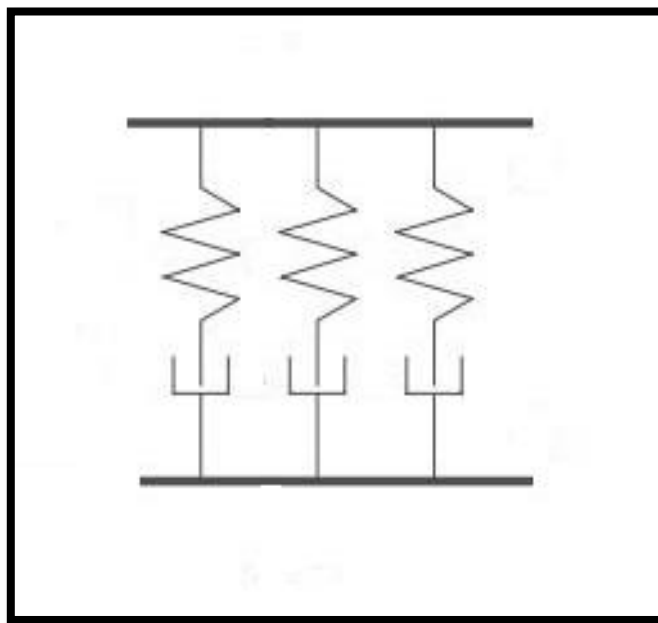


Obrázek 15 – Maxwellův (a) a Kelvinův model (b) [33]

Viskoelastické modely jsou užitečnými nástroji pro výběr vhodných matematických funkcí k popisu jednotlivých jevů. Modely nemají fyzikální vztah k reálným materiálům a je třeba si uvědomit, že nekonečný počet různých modelů může být použit k reprezentaci daného jevu [34]. Přidavek více a více elementů lépe simuluje experimentální chování reálných polymerních systémů [33]. Proto se skládají sériově nebo paralelně jak jednotkové elementy, tak dvou parametrové elementy za vzniku čtyř parametrových modelů: 1) Tuckertův model, který představuje sériové zapojení Hookova elementu, Maxwellova a Newto-

nova, 2) Kuhnův model, který vzniká paralelním spojením dvou Maxwellových elementů a 3) Burgerův model složený z Maxwellova a Kelvinova modelu v sérii [33, 35].

Dále může být paralelně poskládáno několik Maxwellových modelů a získá se tak zevšeobecněný Maxwellův model (obrázek 16). Tento model byl použit v mnoha studiích, například v oblasti výzkumu zabývajícím se kombinací včelích pláštěv a pevného viskoelastického materiálu v aplikační oblasti strukturálního tlumení. Jedná se o kompozitní materiál pro pohlcování energie a kontroly vibrací [36].



Obrázek 16 – zevšeobecněný Maxwellův model [36]

### 3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mezi nejdůležitější vlastnosti všech polymerních materiálů se řadí vlastnosti mechanické. Volba materiálu pro různé aplikace je často založena na jeho mechanickém chování, jako je pevnost v tahu, elongace nebo rázová pevnost. Tyto hodnoty jsou obvykle odvozeny z technické literatury poskytnuté dodavateli materiálů. Častěji je ale kladen velký důraz na porovnávání publikované hodnoty a na zjišťovaných skutečně významných mechanických vlastností v závislosti na konečném požadavku. V praktických aplikacích jsou plasty zřídka vystaveny jedné konstantní deformaci bez přítomnosti jiných nepříznivých faktorů, jako je teplota a vliv prostředí [37].

Zkoušky, kterými se zjišťují mechanické vlastnosti materiálů, se podle časového působení dělí na krátkodobé a dlouhodobé. Jednoznačně nejběžnějším testem řadící se mezi krátkodobé zkoušky je zkouška tahová, naproti tomu typickými dlouhodobými testy jsou testy kríповé a relaxační [31].

#### 3.1 Krátkodobé zkoušky

Tato první část zkoušek se zaměřuje na testování mechanických vlastností, kde jsou ignorovány účinky dlouhých dob a cyklů. Do skupiny krátkodobých zkoušek patří pevnost v tahu, tlaku, smyku, ohýbání, tvrdost a zkouška odolnosti proti trhání [31].

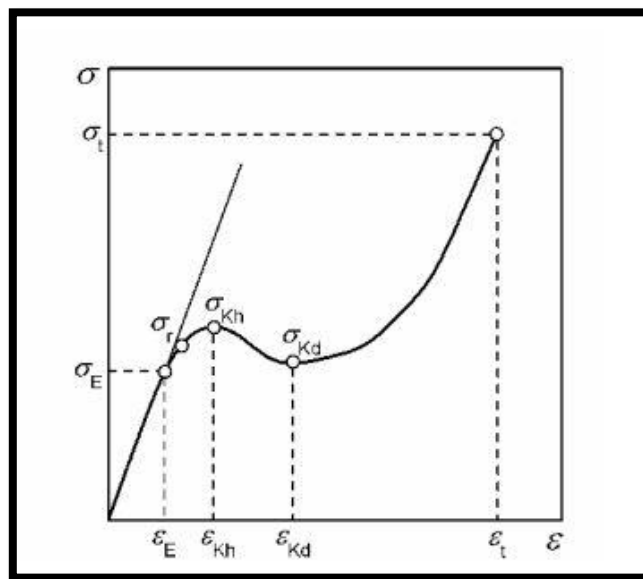
##### 3.1.1 Tahová zkouška

V oblasti testování mechanického chování materiálů se považuje zkouška tahem za základní test, a protože je k dispozici velké množství modifikovaných polymerů, jsou také navrhovány různé přístupy k provádění tahových zkoušek podle testovaného materiálu, a to zejména rozdílná úprava vzorku, zatížení nebo upínací zařízení. Poměrně jednoduché měřitelné parametry jsou použity pro vyhodnocení vlastností a pro zajištění kvality, výběru materiálu a dimenzování jednoduchých úkolů. V důsledku se hlavní oblasti aplikací polymerního testování skládají z: 1) získávání tahových vlastností pro tváření, 2) charakterizace tahových vlastností polymerních desek a filmů a 3) stanovení vlastností izotropních či anizotropních vláken zvyšující pevnost polymerního materiálu [32].

Vzorky pro tahové zkoušky jsou připraveny mnoha různými způsoby, ale nejčastěji jsou zhotoveny buď vstříkáním, nebo lisováním a musí být kondicionovány za standardních podmínek. Vzhledem k tomu, že tahové vlastnosti některých plastů se mohou rychle měnit s malými změnami teploty, doporučuje se provádět zkoušku tahem ve standardním

laboratorním prostředí, tj. při teplotě  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $50 \pm 5 \%$  [37]. Tahové zkoušky jsou prováděny na tzv. trhačím stroji a zkouška představuje deformační chování testovaného materiálu, který je vystaven zatížení. Vzorky jsou po uchycení do čelistí stroje obvykle deformovány při konstantní rychlosti a následně jsou získány informace v podobě tahové (deformační) křivky (obrázek 17), ze kterých jsou vyhodnoceny dvě základní veličiny - modul pružnosti a pevnost v tahu [38]. A právě pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu jsou nejvíce specifikovanými vlastnostmi plastického materiálu.

Zkouška tahem znamená měření schopnosti materiálu odolávat silám, které mají tendenci táhnout jeho část a určit, do jaké míry se materiál táhne, než nastane poškození materiálu. Modul pružnosti v tahu čili údaj o relativní tuhosti materiálu je následně stanoven z digramu po provedení tahové zkoušky [37].



Obrázek 17 – obecná tahová křivka [31]

Na obrázku 17 je schematicky znázorněna obecná tahová křivka, která je výsledkem měření závislosti napětí na protažení (deformace tahem -  $\varepsilon$ ) a na ní pět důležitých bodů pro vyhodnocení tahového chování testovaného materiálu. První bod, který se nachází v lineární oblasti tahové křivky a je protnutím  $\sigma_E$  a  $\varepsilon_E$ , se nazývá mezí úměrnosti a v tomto bodě končí oblast chování materiálu podle Hookova zákona. Z této oblasti se vyhodnocuje Youngův modul pružnosti jako tangenta směrnice počáteční lineární křivky (rovnice 10).



$$E = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (10)$$

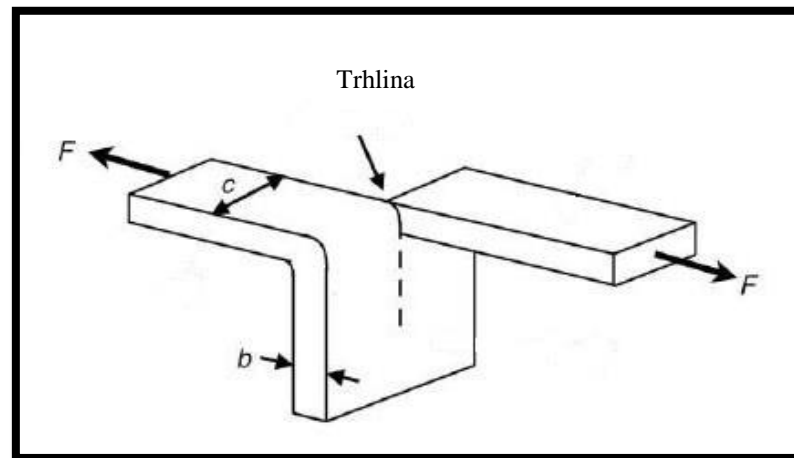
Dalším bodem na křivce je bod, za kterým se objevuje zaoblení tahové křivky. Tento bod je označován jako mez pružnosti  $\sigma_r$ . K zaoblení křivky dochází v důsledku zvyšujícího se napětí, v němž je zahrnuta deformace jak elastická, tak plastická. Za mezí pružnosti dochází i při velmi slabém vzestupu napětí k výrazné deformaci, která je označována jako nevratná (plastická) a tento stav je označován jako mez kluzu  $\sigma_K$ . Na zobrazené tahové křivce se rozlišuje horní mez kluzu  $\sigma_{Kh}$  a dolní mez kluzu  $\sigma_{Kd}$ . Pokud za bodem meze kluzu dochází k poklesu napětí, je mez kluzu definována jako horní mez kluzu. Pokud minimum na tahové křivce pokračuje, je definována dolní mez kluzu. Na deformační křivce lze pozorovat poslední bod, který je výsledkem toho, že dochází za dolní meze kluzu k nárůstu maximální hodnoty napětí, při které nastane přetržení vzorku testovaného polymerního materiálu.

Z naměřených dat tahové křivky lze vyhodnotit další materiálovou charakteristiku – mez pevnosti v tahu. Mez pevnosti je definována jako maximální napětí, které je zapotřebí k přetržení zkušebního tělesa vztažené na jeho počáteční průřez. K výpočtu je využíváno maximální zaznamenané síly během testu [31].

### 3.1.2 Odolnost proti trhání

Odolnost materiálů proti trhání je charakteristika vyjadřující jejich mechanické vlastnosti. Zejména v případě ochranných materiálů (ochranné rukavice, hasičské obleky) je odolnost proti roztržení mezi hlavními požadavky [39]. Na výslednou odolnost proti trhání má silný vliv stupeň krystalinity materiálu, kterého může být dosaženo různými provozními podmínkami při výrobě materiálu [40].

Zkouška odolnosti proti trhání se používá pro pružné materiály a tenké fólie. Oproti tahové zkoušce, při které se měří síla potřebná k přerušení celistvosti materiálu, se při zkoušce odolnosti proti trhání síla neaplikuje rovnoměrně, ale je koncentrována záměrně na porušené místo. Aplikovaná síla spouští nebo udržuje trhání a závisí na geometrii zkušebního vzorku a na povaze nespojitosti [41]. Nejčastější formou geometrie je ta, kde je indukováno roztržení v pravém úhlu ke směru aplikované síly. Geometrie zobrazená na obrázku 18 je používána pro celou škálu materiálů (pryže, plasty i tkaniny) a spočívá v naříznutí o určité délce [42].



Obrázek 18 – geometrie vzorku podle normy ISO 6383-1[43]

Při vyhodnocení se trhací síla působící při trhání na prvních 20 mm a posledních 5 mm neroztržené části zkušebního tělesa zanedbává a stanoví se pouze přibližná střední hodnota síly působící při trhání na zbylých 50 mm neroztržené délky. Hodnota odolnosti proti dalšímu trhání se vypočte podle vzorce 11 [41, 43].

$$\text{Odolnost proti dalšímu trhání} = \frac{F}{b} \text{ (N/mm)} \quad (11)$$

### 3.2 Dlouhodobé zkoušky

Proto, že je většina polymerních materiálů využívána v dlouhodobějších aplikacích a podléhají různě vystavenému namáhání v delším časovém horizontu, jsou zaváděny dlouhodobé zkoušky. Právě polymerní materiály jsou známy tím, že jsou schopny se pod vlastní tíhou deformovat, a to již při velmi nízkých napětích. Takový jev je u polymerních materiálů označován jako studený tok (kříp) a obecně se využívá dvou způsobů, které napomáhají k celkovému vyhodnocení viskoelastického chování – kříповé a relaxační zkoušky [31].

Modul pružnosti ( $G_{(t)}$ ) a elastická poddajnost ( $J_{(t)}$ ) jsou veličiny, které jsou funkcí času při konstantní teplotě, neboli jsou nezávislé na velikosti napětí. Tato skutečnost ovšem platí pro určitou hraniční mez, která se nazývá mezí linearity, po tuto hranici platí následující vztah (rovnice 12).

$$\frac{\sigma_1}{\gamma_{1(t)}} = \frac{\sigma_2}{\gamma_{2(t)}} = \frac{\sigma_3}{\gamma_{3(t)}} = \text{konstantní} \quad (12)$$

Nad hranicí linearity již poměr napětí ( $\sigma$ ) a deformace ( $\gamma$ ) konstantní není (rovnice 13), pod hranicí linearity platí upravený Hookův zákon vyjádřený níže uvedenými vztahy (rovnice 14 a 15), přičemž vztah (14) je vyjádřením kríповého chování a vztah (15) vyjádřením chování relaxačního [35].

$$\frac{\sigma}{\gamma(t)} \neq \text{konstantní} \quad (13)$$

$$\gamma(t) = \sigma \cdot J(t) \quad (14)$$

$$\sigma(t) = \gamma \cdot G(t) \quad (15)$$

### 3.2.1 Kríповá zkouška

Kríповá zkouška dává velmi důležité, praktické a užitečné informace o chování a vlastnostech materiálů a je využívána v mnoha oblastech inženýrství v jakýchkoli aplikacích [45].

Označení kríповé chování představuje pomalý rozvoj deformace materiálu, přičemž zatížení, která jsou vyžívána při zkoušce, jsou v tahu, ohybu nebo stlačení [38]. Ve většině případů se dává přednost deformacím v tahu, a to z důvodu citlivosti a jednoduchosti mechanismu. Vzorek zkušebního materiálu je uchycen do čelistí, a to tak, že z jedné strany je uchycení pevné a z druhé strany je napínán konstantním zatížením působící deformaci po stanovenou dobu [31]. Klasická kríповá měření jsou extrémně časově náročná, protože spočívají ve vystavení zkušebních vzorků na požadované zatížení po požadovanou dobu, což může být několik měsíců, nebo dokonce i let. Kríповé chování odpovídá teorii viskoelastického chování v oblasti velmi malých napětí a představuje tedy časově závislou deformaci při konstantním napětí [38].

Kelvinův model je využíván při popisu krípkového chování, kdy je aplikováno napětí a je zaznamenávána deformace jako funkce času [1]. Jelikož se jedná o paralelní zapojení pružiny a pístu (vedle sebe), je v tomto případě celková deformace  $\gamma_c$  na obou elementech (deformace pružiny  $\gamma_1$  a deformace pístu  $\gamma_2$ ) rovna (rovnice 16) [35]. Popis krípkového chování pomocí Kelvinova modelu znamená, že celkové napětí  $\sigma_c$  se rovná součtu napětí elementů pružiny  $\sigma_1$  a pístu  $\sigma_2$  (rovnice 17). Vztah (18) představuje diferenciální rovnici modelu.

$$\gamma_c = \gamma_1 = \gamma_2 \quad (16)$$

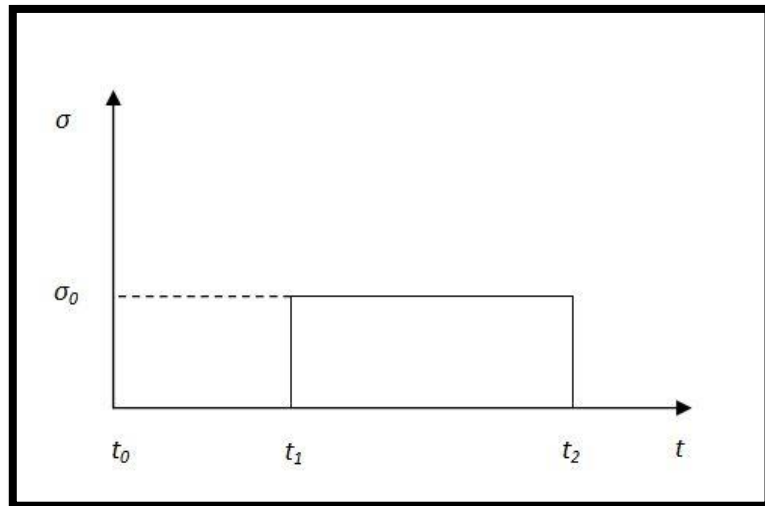
$$\sigma_c = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (17)$$

$$\sigma = (G \cdot \gamma) + \left( \eta \frac{d\gamma}{dt} \right) \quad (18)$$

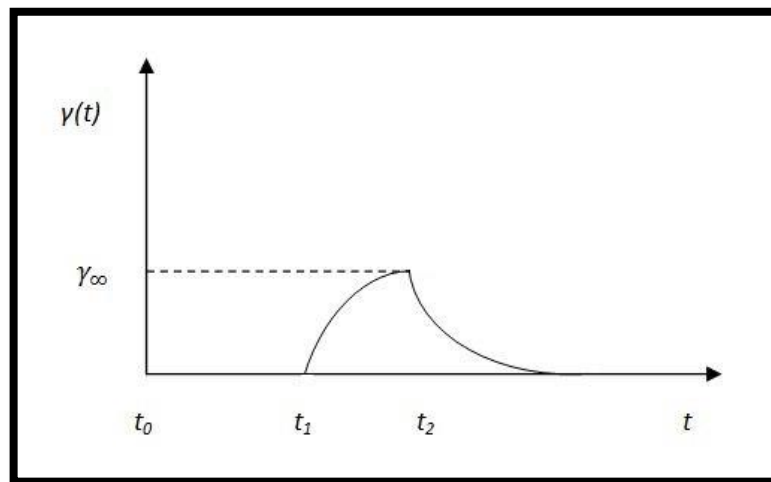
Při krípkové zkoušce jsou zaváděny okrajové podmínky – časy  $t_0$ ,  $t_1$  a  $t_2$ . V čase  $t_0$  je model v klidovém stavu a deformace je nulová. V čase  $t_1$  se skokově spustí napětí  $\sigma_0$ , které je konstantní až do  $t_2$  (tabulka 2). Průběh napětí v závislosti na čase při krípkovém chování je na obrázku 19 a deformační odezva viskoelastického materiálu Kelvinova modelu je znázorněn na obrázku 20 [28].

Tabulka 2 – okrajové podmínky Maxwellova modelu

$t_0$	$\gamma = 0$
$t_1$ a $t_2$	$\gamma = \gamma(t)$
$t_2$	$\gamma = \gamma$



Obrázek 19 – závislost napětí na čase při kríčovém testu [28]



Obrázek 20 – deformační odezva viskoelastického materiálu [28]

Zavedením okrajových podmínek, separací proměnných a integrací se získává deformace jako časová proměnná (rovnice 19). V rovnici se vyskytuje veličina  $\tau$ , která se nazývá retardační doba a pro časy  $t \gg \tau$  nabývá deformace rovnovážné hodnoty  $\gamma_\infty$ , která je dána vlastnostmi elastickými a nezávisí na vlastnostech viskozních. Retardační doba určuje přechod z nedeformovaného do deformovaného stavu. Při Kelvinově modelu je za čas  $\tau$  dosaženo 63,2% deformace rovnovážné (rovnice 20). Při době, která je rovna čtyřnásobné retardační době, je deformace téměř v rovnováze a je rovna 98,2% (rovnice 21) [8].

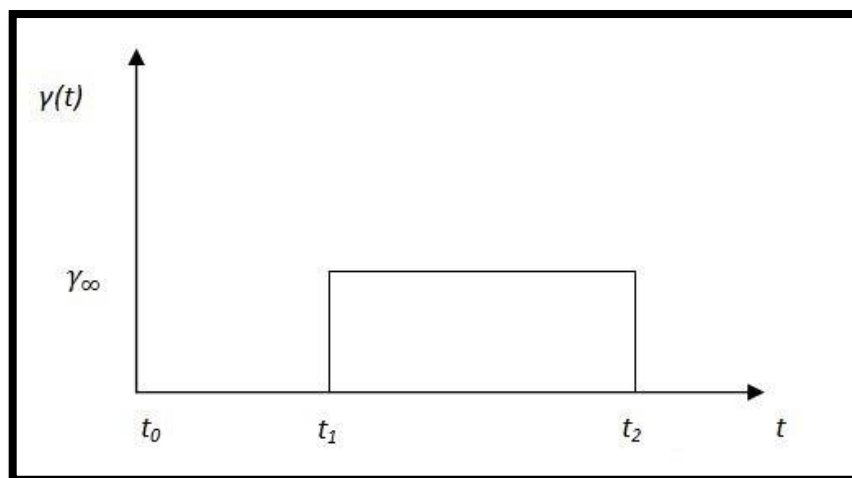
$$\gamma(t) = \gamma_{\infty} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (19)$$

$$\gamma(\tau) = 0,632\gamma_{\infty} \quad (20)$$

$$\gamma(4\tau) = 0,982\gamma_{\infty} \quad (21)$$

### 3.2.2 Relaxační zkouška

Relaxační zkouška se zakládá na měření změny napětí (relaxaci) při konstantní deformaci. Relaxace je výsledkem fyzikálních anebo chemických změn ve vnitřní struktuře zkoušeného materiálu. Průběh změn napětí je ovlivněn vnějšími i vnitřními faktory (teplota, velikost deformace, tvar zkušební vzorku, molekulová hmotnost, skladba směsi, hustota síťování a další)[31]. Makroskopická deformace je při experimentu udržována konstantní (obrázek 21), ale deformační energie se rozptyluje prostřednictvím přesmyku molekul do nižšího volného energetického stavu. Mikroskopická deformace je získatelná napětím a navrácí se k nulové úrovni, i když se makroskopická deformace udržuje na konstantní úrovni. Zbývající volná energie je znázorněním práce, která může být vložena zpět k obnově [45].



Obrázek 21 – časová závislost deformace během relaxačního testu [28]

K matematickému popisu relaxačního chování lze použít Maxwellova modelu, tvořeného sériovým spojením pružiny a pístu. Sériové zapojení jednotkových elementů způsobuje, že celková deformace  $\gamma_c$  se rovná součtu deformací elementů pružiny  $\gamma_1$  a pístu  $\gamma_2$ , přičemž napětí jsou v celém modelu stejná [8].

$$\sigma_c = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (16)$$

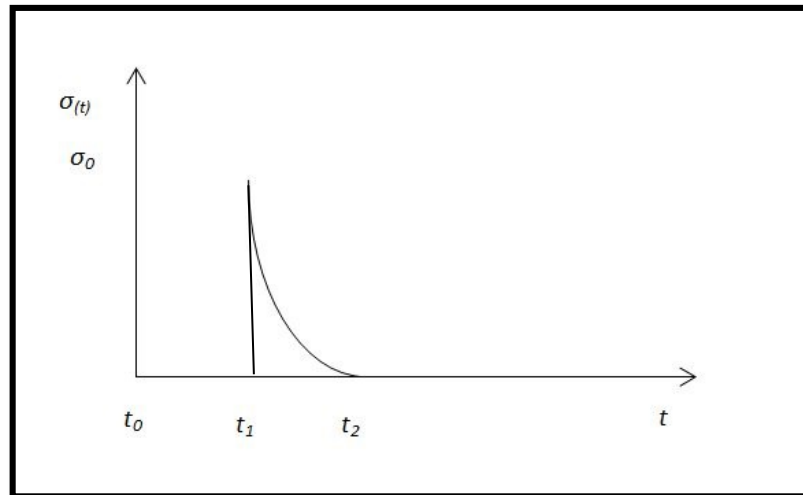
$$\gamma_c = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (17)$$

$$\frac{\gamma_c}{dt} = \frac{\sigma}{G} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (18)$$

Při relaxaci napětí jsou zaváděny okrajové podmínky jako při předchozím kríčovém experimentu – časy  $t_0$ ,  $t_1$  a  $t_2$ . V čase  $t_0$  je model v klidovém stavu a napětí je nulové. V čase  $t_1$  se skokově zavede deformace  $\gamma_1$ , která je konstantní až do  $t_2$  (tabulka 3). Průběh napětíové odezvy viskoelastického materiálu při relaxačním experimentu je zobrazen na obrázku 22 [28].

Tabulka 3 - okrajové podmínky Maxwellova modelu

$t_0$	$\sigma = 0$
$t_1$	$\sigma = \sigma_0$
$t_2$	$\sigma = \sigma(t)$



Obrázek 22 – napěťová odezva viskoelastického materiálu [28]

Při relaxaci napětí je zaváděna veličina – relaxační čas (rovnice 19), která představuje poměr viskozity a modulu pružnosti. Poměr je odvozen od skutečnosti, že při relaxačním experimentu na skokem zavedenou deformaci reaguje pružina okamžitě, přičemž deformace pístu je nulová. Počáteční napětí  $\sigma_0$  je dáno jen odezvou pružiny. Až po určité době se píst tahem pružiny pohybuje, což způsobuje pokles deformace pružiny a tím i pokles napětí v modelu - relaxaci. U reálných materiálů se pokles napětí stanovuje experimentálně, u Maxwellova modelu lze napětí vypočítat při relaxačním experimentu z rovnice 20 jako funkce času (rovnice 21) a následnou separací proměnných a integrací.

$$\lambda = \eta/G \quad (19)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\lambda} = \frac{d\gamma}{dt} G \quad (20)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/\lambda} \quad (21)$$



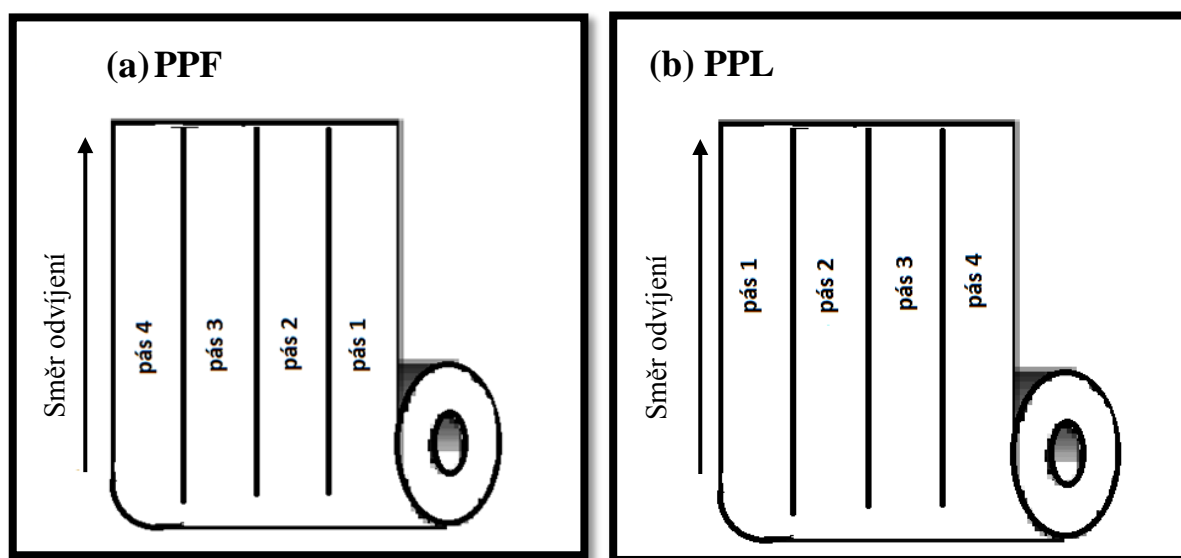
Napětí Maxwellova modelu relaxuje z počáteční hodnoty na nulovou hodnotu pro získané časy  $t \gg \lambda$ . Bylo zjištěno, že v čase  $t$ , který je roven relaxačnímu času, poklesne napětí na 36,8% své počáteční hodnoty. Za čtyřnásobek relaxačního času napětí poklesne jen na 1,8% původní hodnoty [6].

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Výchozím materiálem pro testování byly výrobcem dodané paropropustné fólie (PPF) a paropropustné lamináty (PPL), které jsou vyrobeny technologií vytlačování. Základními surovinami pro výrobu PPF je kompaund obsahující aditivum zajišťující paropropustnost (na bázi uhličitanu vápenatého), polymer (LDPE) a recyklát. Celkově bylo od výrobce dodáno 10 směsí v podobě fólií a laminátů, které se lišily ve složení receptur. A to jednak procentuálním zastoupením tří základních složek, tak i tím, že kompaund a polymer byly použity od různých dodavatelů. Ve vzorcích se především ale mění kompaund a sledují se výsledné vlastnosti směsí. Cílem je vyhodnotit nejvhodnější směs z hlediska stability registrovaného tisku.

PPF mléčné barvy jsou vytlačovány v šíři asi 1 m, následně jsou dlouženy a potisknuty dětskými motivy. Na roli fólie o 1m šíře se rozlišují tzv. 4 pásy (obrázek 23a). Role se 4 pásy je nakonec laminována za použití termotavného lepidla s netkanou textilií a na konci laminační linky je 1m role rozdělena podle pásů na 4 samostatné role určené k distribuci zákazníkovi. Po laminaci se směr odvíjení navinutého materiálu mění (obrázek 23b).



Obrázek 23 – směr odvíjení PPF a PPL po laminaci

## 4.1 Vzorčky

Vzorčky, které společnost pro Fakultu technologickou a následné testování dodávala, lze rozdělit do 4 kategorií. Celkově bylo hodnoceno 10 rozdílných směsí, tzv. zkouškových směsí s označením zkouška 1 až zkouška 10. Zkouškové směsi v jednotlivých kategoriích jsou si podobny svou recepturou (tabulka 4). První kategorie je zastoupena směsí se standardním typem kompaundu, který společnost běžně při výrobě používá, u kategorie II. je upravená gramáž netkané textilie. V rámci III. kategorie byly u směsí použity kompaundy zvyšující tuhost výrobků a pro IV. skupinu směsí pak kompaundy speciální.

Tabulka 4 – kategorie zkouškových směsí

<b>Kategorie</b>	<b>Zkoušková směs</b>
I.	1; 5; 6 a 9
II.	4
III.	3; 7 a 8
IV.	2 a 10

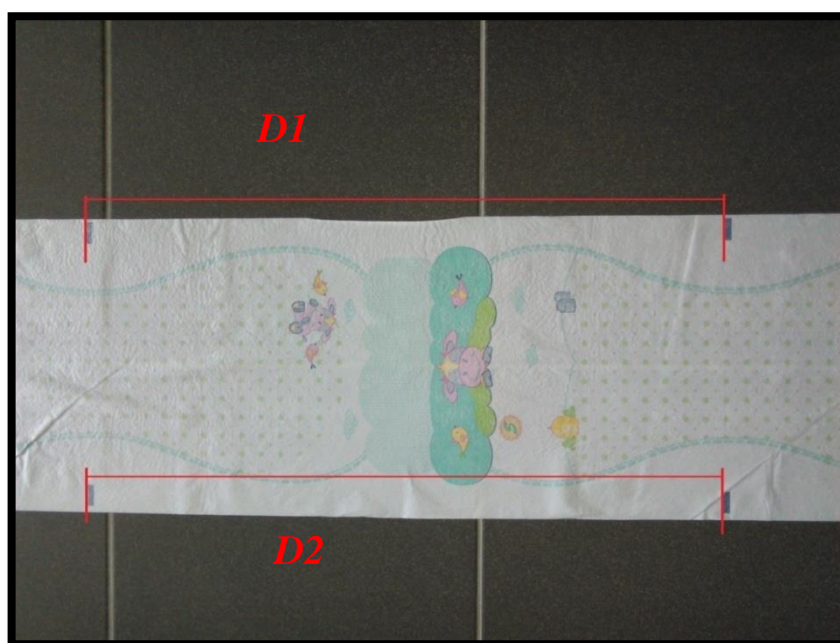
První dodaná sada vzorků představovala vyrobené směsi zkoušky 1 až 4. Od společnosti fakulta obdržela fólie volně bez potisku, fólie volně potisknuté, fólie navinuté na roli a volně složené vzorky laminátů. V další fázi testů byly dodány zkouškové směsi 5 až 10 ve formě potisknuté fólie navinuté na roli a ve formě volně dodaných laminátů (tabulka 5). Kríčovému a relaxačnímu testu byly navíc podrobeny i dva vzorky netkaných textilií (NW) lišící se svou plošnou hmotností.

Tabulka 5 – sada vzorků

Typ směsi	Dodaná forma zkouškové směsi			
<i>zkouška 1</i>	PPF bez tisku volně	PPF potisknutá volně	PPF potisknutá na roli	PPL volně
<i>zkouška 2</i>				
<i>zkouška 3</i>				
<i>zkouška 4</i>				
<i>zkouška 5</i>	PPF potisknutá na roli		PPL volně	
<i>zkouška 6</i>				
<i>zkouška 7</i>				
<i>zkouška 8</i>				
<i>zkouška 9</i>				
<i>zkouška 10</i>				

## 4.2 Registrovaný tisk

Zadáním a požadavkem společnosti bylo vyhodnotit různé typy směsí, z kterých byly fólie vyrobeny z hlediska mechanických vlastností. U fólií je prováděn tzv. registrovaný tisk, což znamená, že u tisknutých motivů jsou na obou stranách folie registrované značky v určité vzdálenosti  $D_1$  a  $D_2$  (obrázek 24).



Obrázek 24 - vzdálenost registrovaných značek

Vzdálenost značek je označována jako tzv. raport a výrobcem je garantována, což se ale vlivem viskoelastického chování polymerní fólie mění. Tato skutečnost následně způsobuje problémy při další laminaci a výrobě konečných produktů, kterými jsou dětské pleňky složené z mnoha dalších vrstev. Proto se ve výrobní společnosti tento raport přeměřuje a zjišťuje se, jak se tyto registrované značky posunují v rámci celé role. Přeměrování bylo provedeno i u zkouškových směsí, které byly v rámci diplomové práce podrobeny laboratorním testům v laboratořích Fakulty technologické.

Prakticky se měření registrovaných značek provádí pomocí ručního rolovacího metru. Nejprve se role fólie či laminátu umístí tak, aby mohla být snadno odvíjena, změří se její průměr a registrované značky na pravé i levé straně navinuté fólie (laminátu) v napnutém stavu. Poté se kousek vzorku z role odvine a opět se změří vzdálenost značky na připraveném stole (tzv. ve volném stavu). Takto se změří 5 vzdáleností registrovaných značek za sebou. Jsou-li registrované značky v daném průměru role naměřeny, seříznou se přibližně 2cm šíře navinutého materiálu a měření vzdáleností registrovaných značek se opakuje po průběhu celé role.

Naměřené hodnoty jsou ručně zaznamenávány v softwaru Microsoft Office Excel, kde jsou následně graficky vyhodnoceny. Registrované značky se měří u směsí fólií navinutých ihned při výrobě, u laminátů ihned po laminaci, po 2 týdenní relaxaci a 4 týdenní relaxaci navinutého materiálu. Kvůli relaxaci materiálu dochází i k různorodému posunu registrovaných značek. Tento posun značek je pozorován v napnutém stavu na roli a ve volném stavu – odvinuté fólie. Praktické měření registrovaného tisku bylo prováděno ve výrobních prostorách společnosti.

### 4.3 Mechanické vlastnosti

Pro hodnocení směsí byly použity zkoušky tahové, kríповé, relaxační a doplňující test odolnosti proti dalšímu trhání. Testy byly prováděny na trhacím stroji Instron 3345 (USA) v laboratoři Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

Podstatou tahové zkoušky bylo ověřit, zda se napětí, pod kterým jsou vyrobené materiály navíjeny, pohybují v oblasti lineárního viskoelastického chování a také vyhodnotit základní mechanické charakteristiky materiálů (Youngův modul pružnosti v tahu a mez pevnosti). Cílem kríповých a relaxačních zkoušek bylo poukázat na nejstabilnější fólie a lamináty. Předpokladem bylo, že nejstabilnější směs by měla vykazovat co nejnižší kríp (tj. deformaci, které je podrobována pod konstantním napětím) a co nejnižší pokles napětí během relaxace (tj. vracet se do svého původního stavu).

Mechanické vlastnosti byly hodnoceny na vzorcích připravených z dodaných směsí tvaru obdélníku o pevně dané šířce 140 mm, vzorek byl uchycován do čelistí trhacího přístroje, které byly od sebe vzdáleny 100 mm. Před začátkem testu byla vždy přeměřena tloušťka vzorků fólie a laminátů. Tloušťka se pohybovala v rozmezí 16  $\mu\text{m}$  až 18  $\mu\text{m}$ , díky netkaným textiliím byly vzorky laminátů přibližně 10x silnější a také byla zaznamenávána nerovnoměrnost tloušťky v rámci jednoho vzorku. Na obrázku 25 je zobrazen vzorek PPL s charakteristickými rozměry. Připravený vzorek daných rozměrů je uchycen v čelistech a připraven k testování (obrázek 26).



Obrázek 25 - vzorek PPL připravený k testování



Obrázek 26 – uchycení vzorku v čelistech trhacího stroje

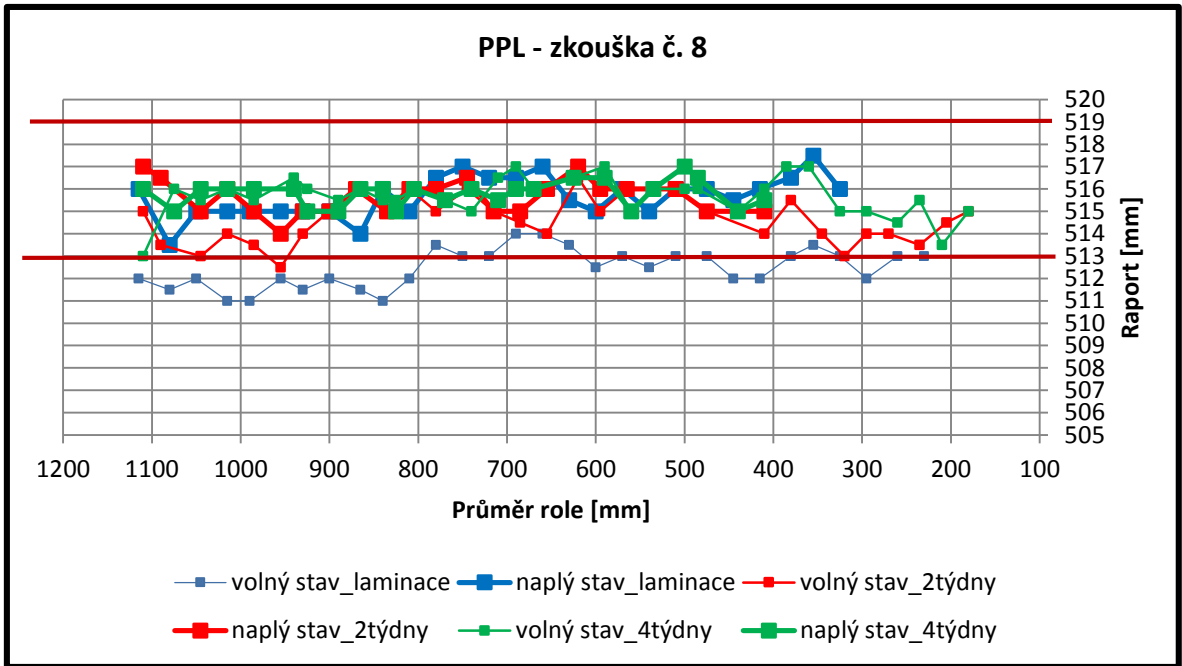


## 5 VÝSLEDKY

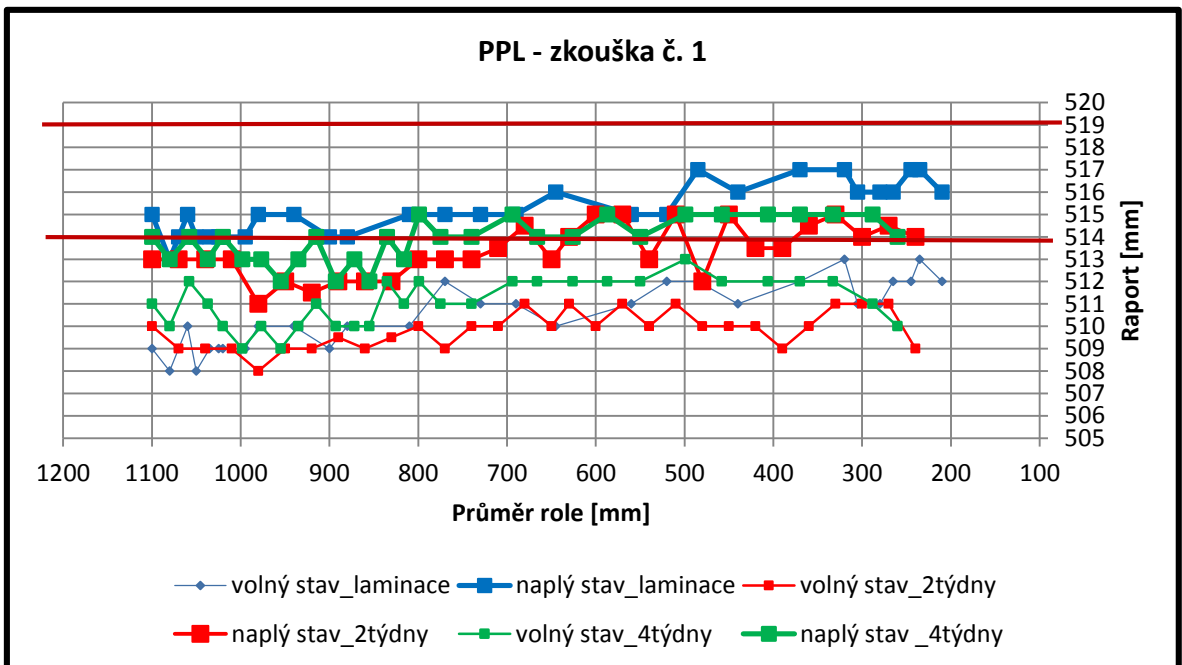
V následující kapitole jsou zaznamenány výsledky, a to nejprve výsledky rozptylu raportů, které byly měřeny v prostorách společnosti, dále jsou uvedeny zkoušky tahové, krí-pové a relaxační jednotlivých směsí 1 až 10. S ohledem na skutečnost, že byly vzorky do-dány ve dvou fázích: 1) zkouška 1 až 4 2) zkouška 5 až 10, jsou pro krí-pové a relaxační testy stejným způsobem zobrazeny výsledné hodnoty a grafické zhodnocení. Zhodnoceny jsou i viskoelastické testy netkaných textilií. Tahové zkoušky byly provedeny pro vzorky fólií navinutých na rolích a laminátů. V poslední podkapitole je uveden doplňkový test – zkouška odolnosti proti trhání.

### 5.1 Rozptyl raportů

Jednotlivé vyrobené zkouškové směsi fólií a laminátů byly podrobeny přeměrování registrovaného tisku. Z hlediska rozsahu diplomové práce a po domluvě s výrobní společ-ností jsou níže uvedeny pouze na ukázkou grafy srovnávající receptury s ohledem na jejich rozptyl. A protože jsou společnostmi distribuovány především paropropustné lamináty, jsou zhodnoceny tyto výrobky, pro které je stanoven rozptyl značek 514 až 519 mm. Jako nej-více stabilní směs se po měření raportů jeví zkoušková receptura 8 (graf 1). Naopak největ-ší rozptyl značek byl zaznamenán u laminátu po průběhu celé role u zkouškové směsi 1 (graf 2).



Graf 1 – zkouška č. 8 PPL jako nejvíce stabilní směs na měřený raport

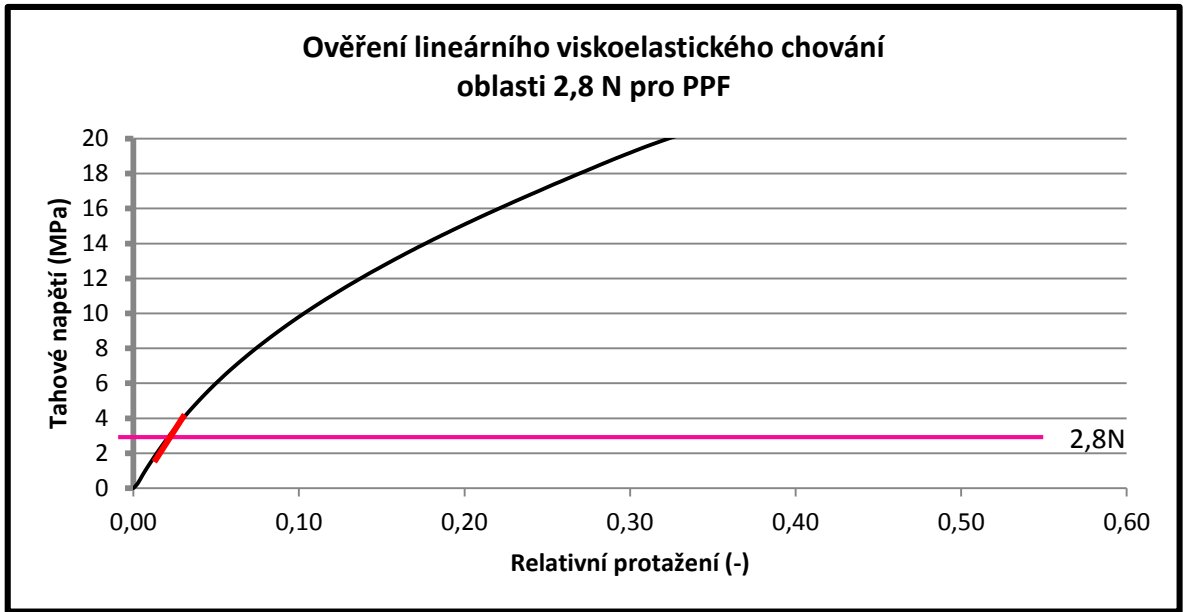


Graf 2 – zkouška č. 1 PPL jako nejméně stabilní směs s ohledem na měřený raport

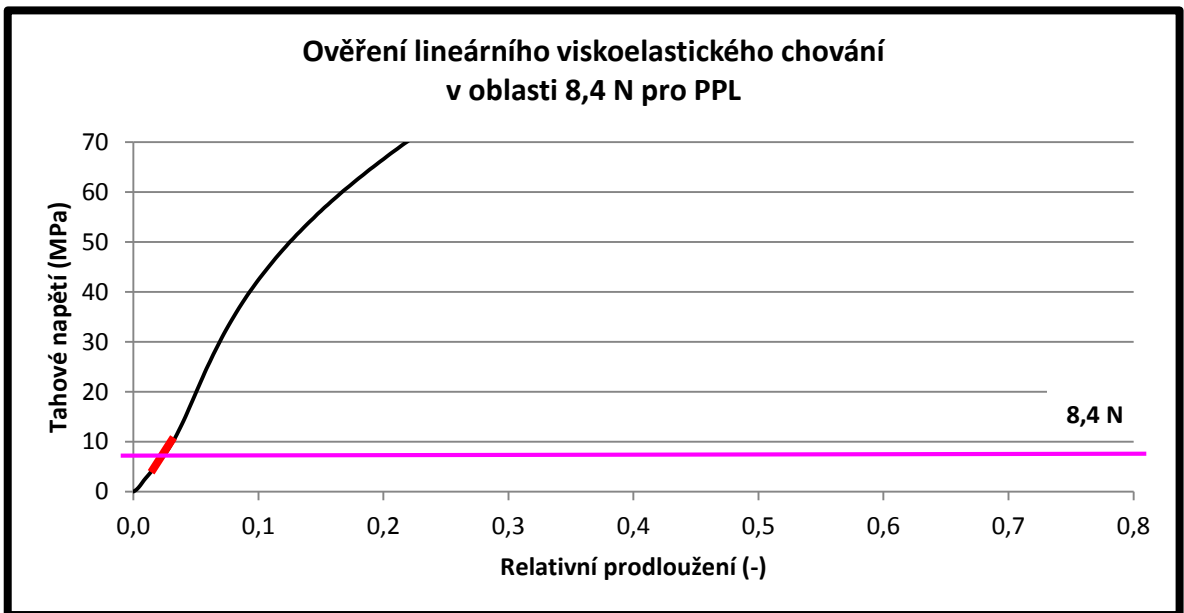
## 5.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena u vzorků fólií navinutých na rolích a u laminátů. Podstatou zkoušky bylo vyhodnotit modul pružnosti testovaných materiálů. Pro měření byly použity dva typy siloměru s rozsahem pro folie 100 N a pro lamináty 5 000 N, čelisti přístroje byly v počáteční vzdálenosti 60 mm, rychlost posuvu byla 100 mm/min. Vyhodnocování Youngova modulu bylo nastaveno tak, že software rozdělil výslednou tahovou křivku na 6 částí v rozsahu protažení 0 – 10 mm a z ní vybral největší směrnici - modul. Kromě modulů byla vyhodnocena i mez pevnosti v tahu ( $\sigma_{max}$ ) materiálů představující maximální zatížení vztažené na počáteční průřez testovaného materiálu - maximální tahové napětí.

Tahové zkoušky byly prováděny i z důvodu, aby se ověřilo, zda napětí, pod kterým jsou ve skutečnosti vyráběné materiály navíjeny (PPF – 2,8 N a PPL – 8,4 N), se nachází v oblasti lineárního viskoelastického chování. Napětí 2,8 N a 8,4 N jsou napětími přepočtenými pro velikosti vzorků pro laboratorní testy. Skutečná napětí jsou asi 7x větší. Potvrzení této skutečnosti je vyhodnoceno na grafech 3 a 4 představujících závislost tahového napětí na relativním protažení. Vynesena je pouze část tahového napětí, a to z důvodu zvětšení lineární oblasti. Pro ukázkové grafy tohoto ověření jsou použita data tahových křivek PPF a PPL zkoušky 1. Z grafického znázornění je patrné, že hodnoty napětí, pod kterými jsou folie a lamináty ve společnosti ve skutečnosti navíjeny, se nachází v oblasti lineárního viskoelastického chování.



Graf 3 – ověření lineárního viskoelastického chování v oblasti 2,8 N pro PPF



Graf 4 – ověření lineárního viskoelastického chování v oblasti 8,4 N pro PPL

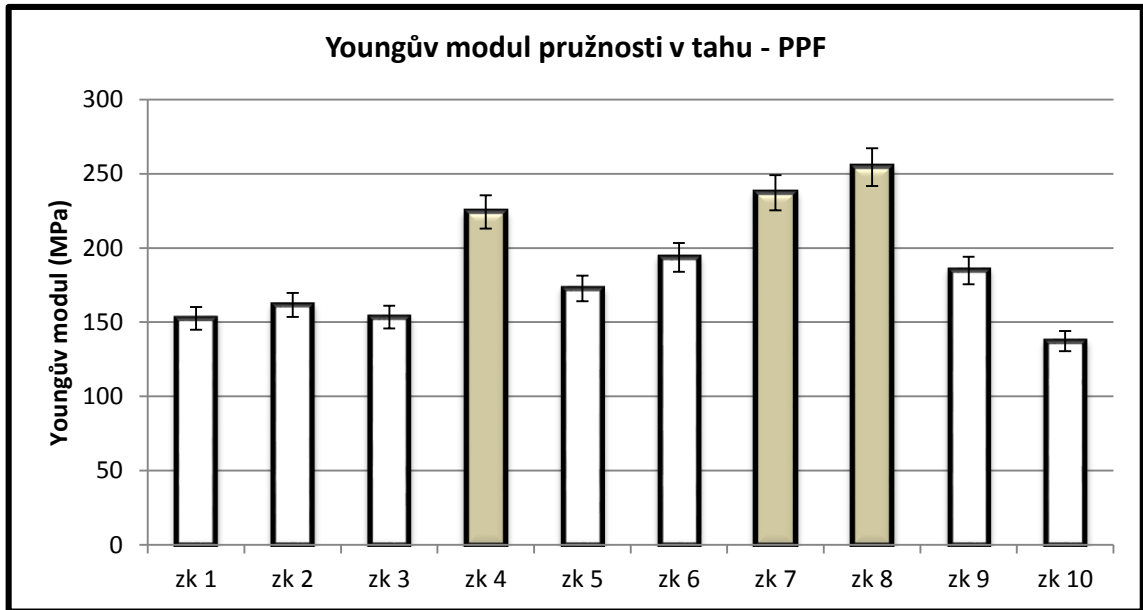
Pro statistickou průkaznost měřených mechanických charakteristik byly měřeny od každé zkouškové směsi vždy tři vzorky. Výsledky tahových zkoušek – Youngův modul pružnosti v tahu a mez pevnosti jsou vedeny níže v tabulce 6.

Tabulka 6 – vyhodnocení tahové zkoušky pro vzorky PPF a PPL

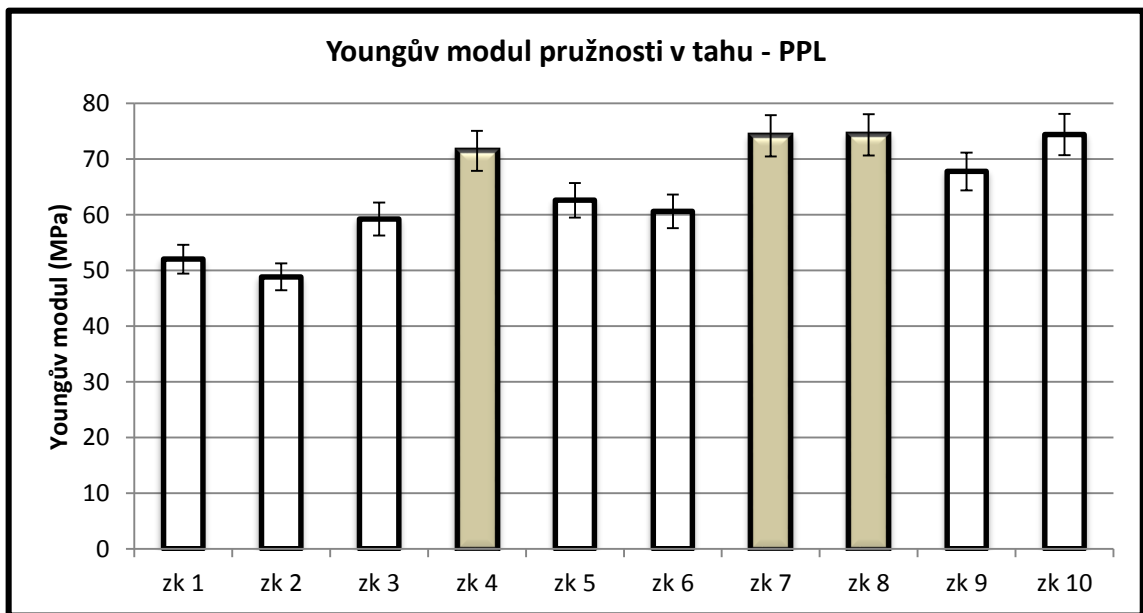
<b>PPF</b>	<b>Youngův modul (MPa)</b>	<b>Mez pevnosti <math>\sigma_{\max}</math> (MPa)</b>	<b>PPL</b>	<b>Youngův modul (MPa)</b>	<b>Mez pevnosti <math>\sigma_{\max}</math> (MPa)</b>
zk 1	152,6 ± 6,0	25,7 ± 1,4	zk 1	52,0 ± 1,9	10,7 ± 0,3
zk 2	161,6 ± 2,1	26,9 ± 0,6	zk 2	48,9 ± 3,0	9,5 ± 0,2
zk 3	153,5 ± 1,0	19,9 ± 0,6	zk 3	59,3 ± 0,7	9,8 ± 0,1
zk 4	224,3 ± 26,6	30,6 ± 4,4	zk 4	71,5 ± 1,8	12,2 ± 0,4
zk 5	172,6 ± 3,7	34,1 ± 1,0	zk 5	62,6 ± 2,0	9,7 ± 0,6
zk 6	193,6 ± 28,3	33,0 ± 1,7	zk 6	60,6 ± 4,8	10,0 ± 0,9
zk 7	237,3 ± 31,7	36,7 ± 1,5	zk 7	74,2 ± 1,0	11,4 ± 0,2
zk 8	254,4 ± 36,7	33,7 ± 1,8	zk 8	74,4 ± 3,6	11,1 ± 0,5
zk 9	184,9 ± 25,9	30,6 ± 3,3	zk 9	67,8 ± 8,0	10,0 ± 0,7
zk 10	137,2 ± 1,4	26,5 ± 2,2	zk 10	74,4 ± 8,9	11,3 ± 1,3

Mezi nejpevnější materiály (v rámci PPF i PPL) se po vyhodnocení Youngova modulu pružnosti v tahu řadí z první sady vzorků směs 4, která přesahuje zbylé hodnoty modulu ostatních zkoušek (o více než 50 MPa) a z druhé sady vzorků směs 7 a 8, které také výrazně přesahují svým modulem ostatní zkouškové směsi (opět o více než 50 MPa). Níže na grafech 5 a 6 je uvedeno srovnání modulů jednotlivých zkouškových směsí. Lze si povšimnout i skutečnosti, že moduly jsou u PPL mnohem menší než u PPF. Důvod poklesu modulů je zapříčiněn silnějšími a nerovnoměrnějšími vrstvami laminátů způsobené netkanými textiliemi.

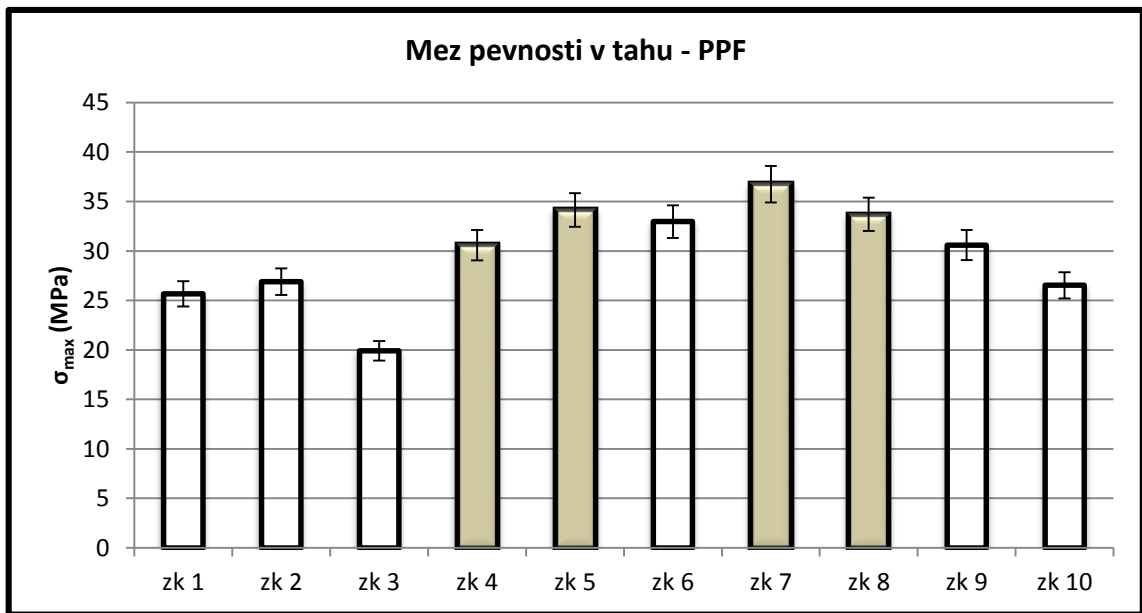
Stejnou tendenci výsledků lze pozorovat i u konečných hodnot mezí pevnosti jednotlivých směsí (grafy 7 a 8). Ovšem větší mez pevnosti z druhé sady vzorků vykazuje především směs 7, dobrou pevnost lze pozorovat nejen u směsi 8, ale nyní i u směsi 5 pro vzorky PPF. Za tři nejpevnější lamináty lze považovat zkoušky 4; 7 a 8.



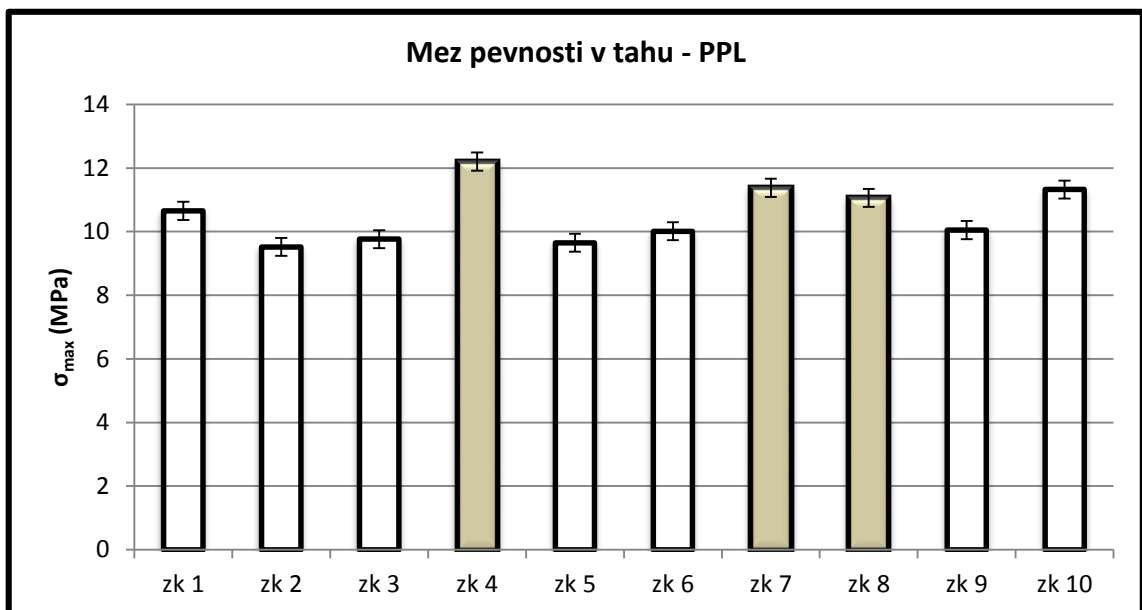
Graf 5 – srovnání Youngova modulu pro všechny zkouškové směsi PPF



Graf 6 – srovnání Youngova modulu pro všechny zkouškové směsi PPL



Graf 7 – srovnání mezi pevnosti zkouškových směsí PPF



Graf 8 – srovnání mezi pevnosti zkouškových směsí PPL

### 5.3 Kríповé a relaxační zkoušky

Po provedení kríповé a relaxační zkoušky, kdy každá probíhala 24 hodin, byla vyhodnocena výsledná data. Pro zkoušku kríповou se jedná o zaznamenání deformace ( $\gamma$ ) v čase 24 hodin při konstantním napětí: 1) pro PPF 2,4 N; 2) pro PPL 8,4 N a 3) pro netkanou textilii 10,5 N. Tyto hodnoty napětí jsou odvozeny z hodnoty napětí, pod jakými jsou výrobky navíjeny ve skutečnosti na výrobních linkách, s přepočtem na velikost zkušební tělesa. Po uplynutí 24 hodin zkoušky kríповé bylo odstraněno zatěžující napětí a deformace byla považována za konstantní. Dále byl sledován pokles napětí po dobu 24 hodin, což bylo podstatou zkoušky relaxační v rámci této diplomové práce. Jako výsledná hodnota relaxační zkoušky byla vyhodnocena hodnota zaznamenaného napětí ( $\sigma$ ) během 24 hodin.

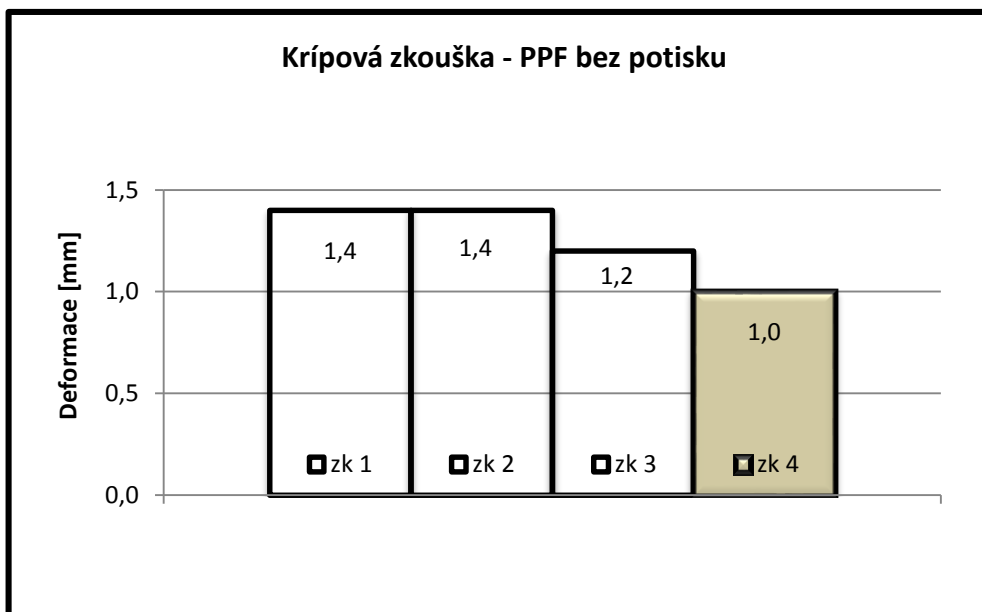
#### 5.3.1 Zkouškové směsi 1 až 4

V tabulce 7 jsou uvedena data kríповé a relaxační zkoušky pro zkouškovou směs 1 až 4, dále jsou uvedeny tyto výsledné hodnoty jako grafické vyhodnocení (graf 9 až 16).

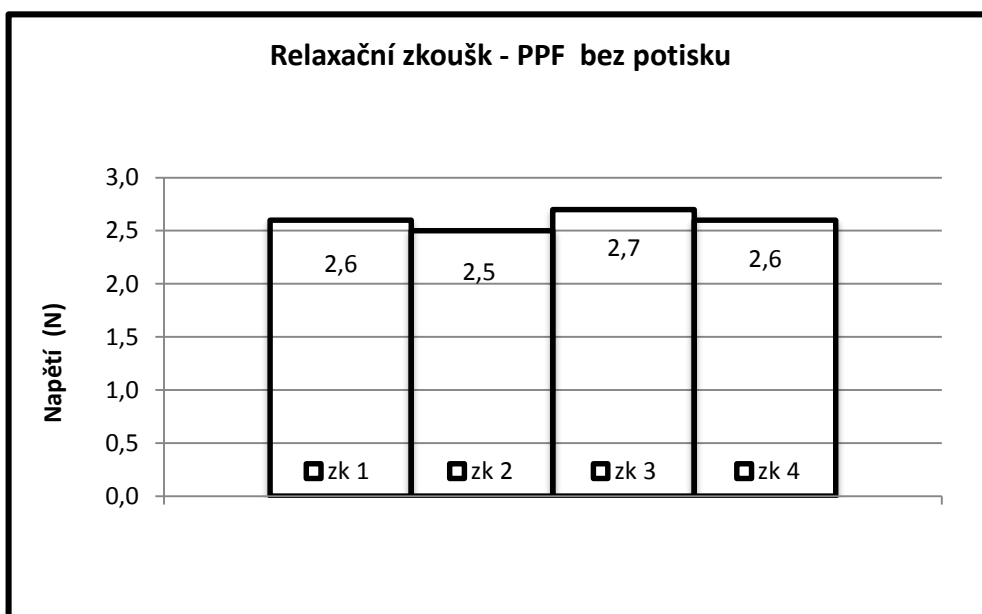
Tabulka 7 – výsledná data kríповé a relaxační zkoušky pro směsi 1 až 4

VZOREK	PPF		PPF		PPF		PPL	
	bez tisku volně		potisknutá volně		potisknutá na roli		volně	
	$\gamma$ (mm)	$\sigma$ (N)	$\gamma$ (mm)	$\sigma$ (N)	$\gamma$ (mm)	$\sigma$ (N)	$\gamma$ (mm)	$\sigma$ (N)
zk 1	1,4	2,6	1,4	2,6	1,3	2,7	3,0	7,9
zk 2	1,4	2,5	1,6	2,5	1,4	2,7	2,6	7,6
zk 3	1,2	2,7	1,6	2,6	1,0	2,6	2,0	7,7
zk 4	1,0	2,6	1,2	2,7	0,8	2,6	1,9	7,5

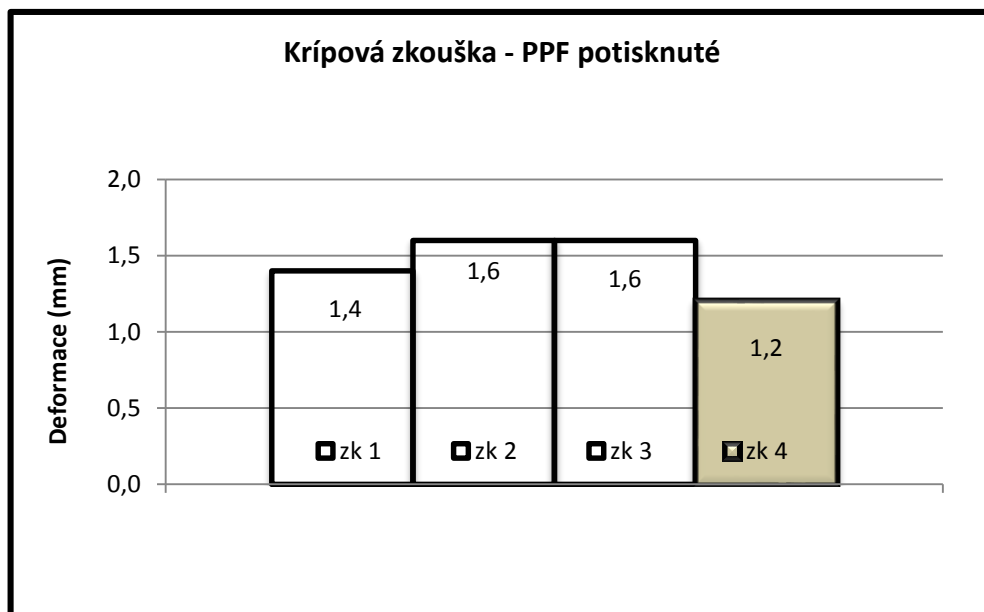




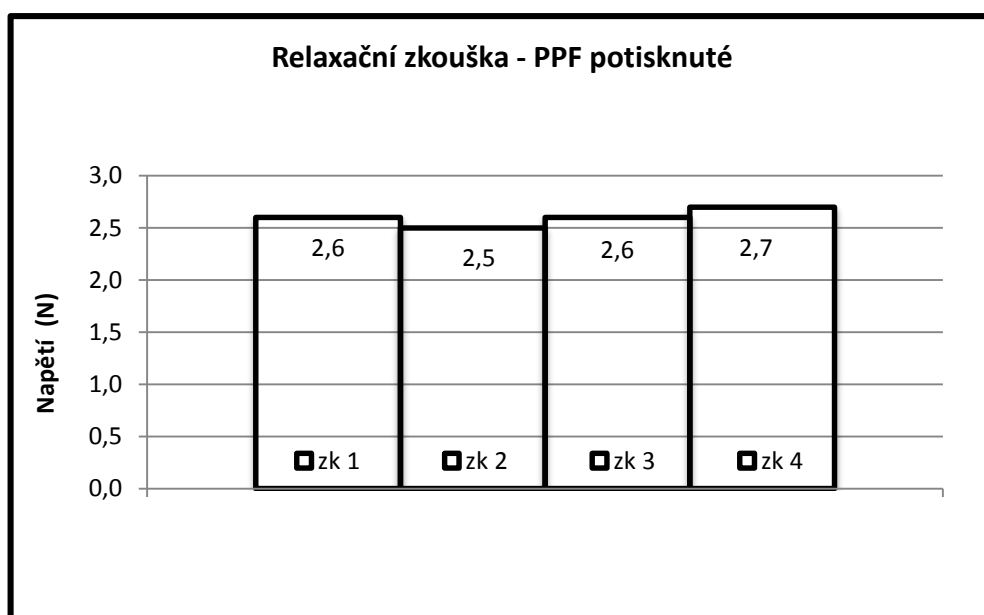
Graf 9 – krípová zkouška - PPF bez potisku



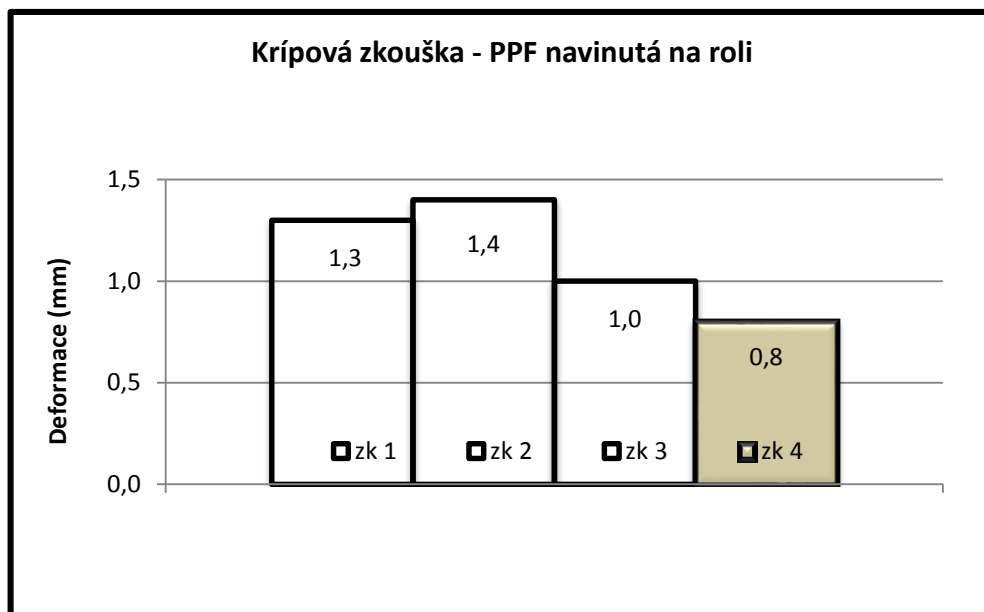
Graf 10 – relaxační zkouška PPF bez potisku



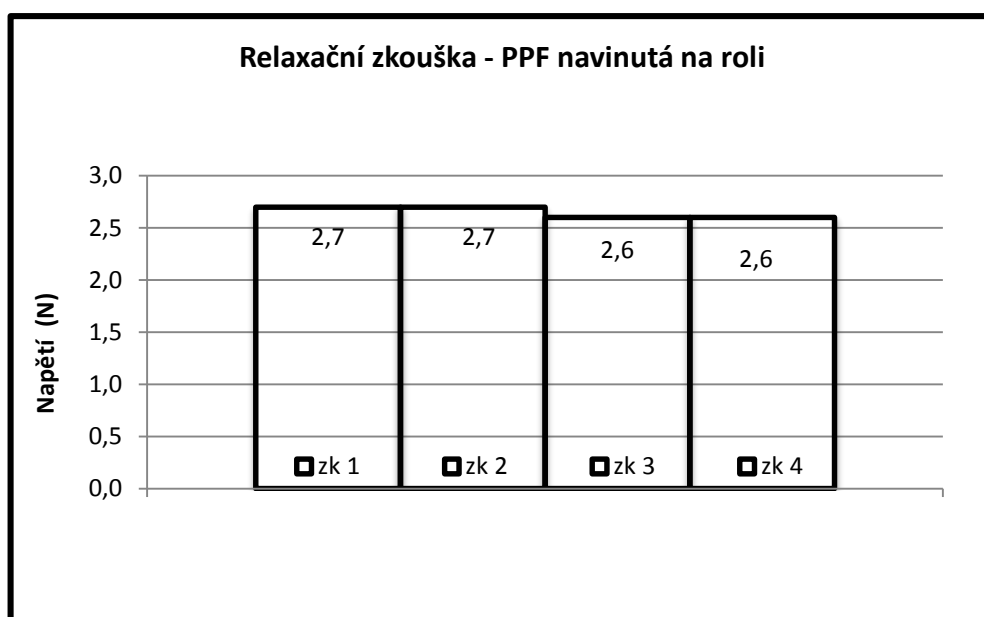
Graf 11 – křípová zkouška PPF potisknuté



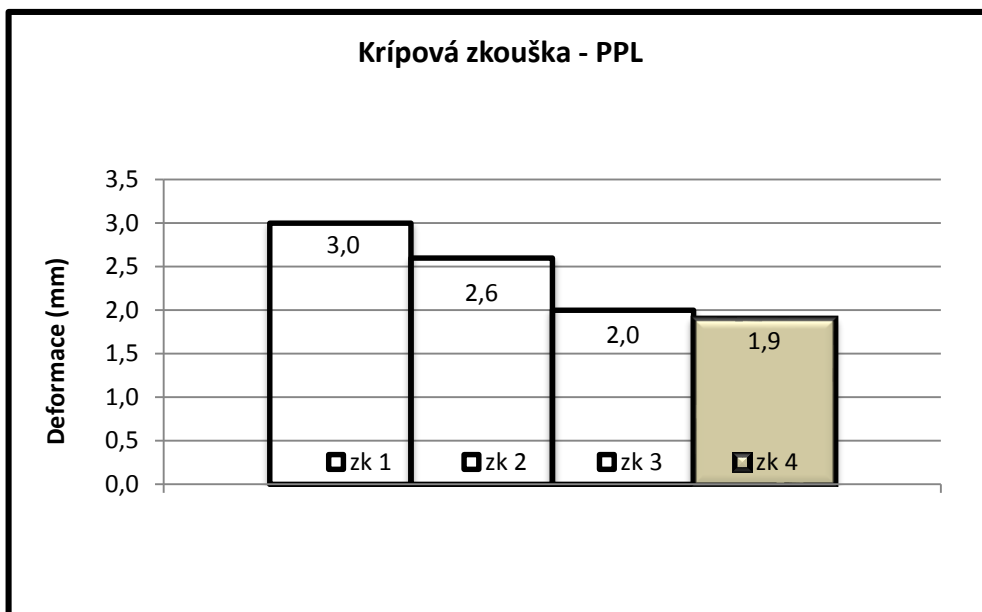
Graf 12 – relaxační zkouška PPF potisknuté



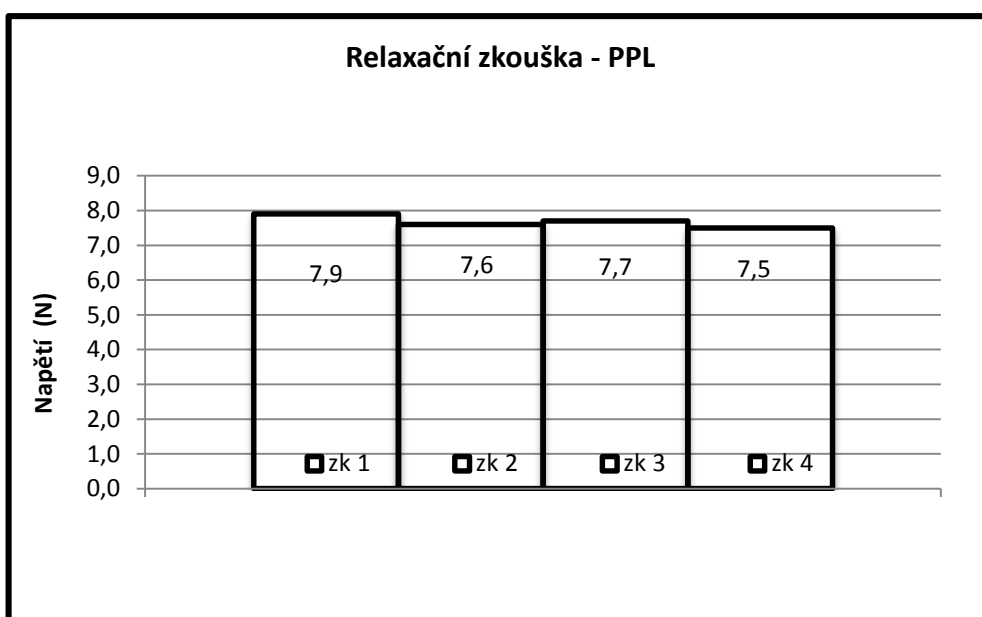
Graf 13 – křípová zkouška PPF navinuté na roli



Graf 14 – relaxační zkouška PPF navinuté na roli



Graf 15 – křípová zkouška PPL



Graf 16 – relaxační zkouška PPL

Na grafech 9 až 16 lze pozorovat srovnání naměřených hodnot deformací a napětí během krípvých a relaxačních testů první sady vzorků zkouškových směsí 1 až 4. Téměř totožná deformace byla zaznamenána mezi vzorky fólií nepotisknuté a potisknuté, tisk motivů na deformaci materiálů má jen minimální vliv. Snížená deformace je zaznamenána u vzorků fólií, které byly pro samotný test připraveny seříznutím z pevně navinutého materiálu na roli. Navinutím na roli je fólie již částečně natažená (deformována), proto jsou uvedené hodnoty deformací po krípvém testu nižší. U vzorků laminátů byly zaznamenány větší hodnoty deformací, což je způsobeno vyšší hodnotou použitého napětí. Srovnají-li se výsledky krípvého testu je nejstabilnější fólií směs 4, u které byla použita vyšší gramáž netkané textilie, u ostatních směsí byla použita netkaná textilie s gramáží nižší. Z krípvých testů první sady vzorků má blízkou hodnotu deformace i zkouška 3, jejíž směs obsahovala kompaund zvyšující tuhost vyrobené fólie.

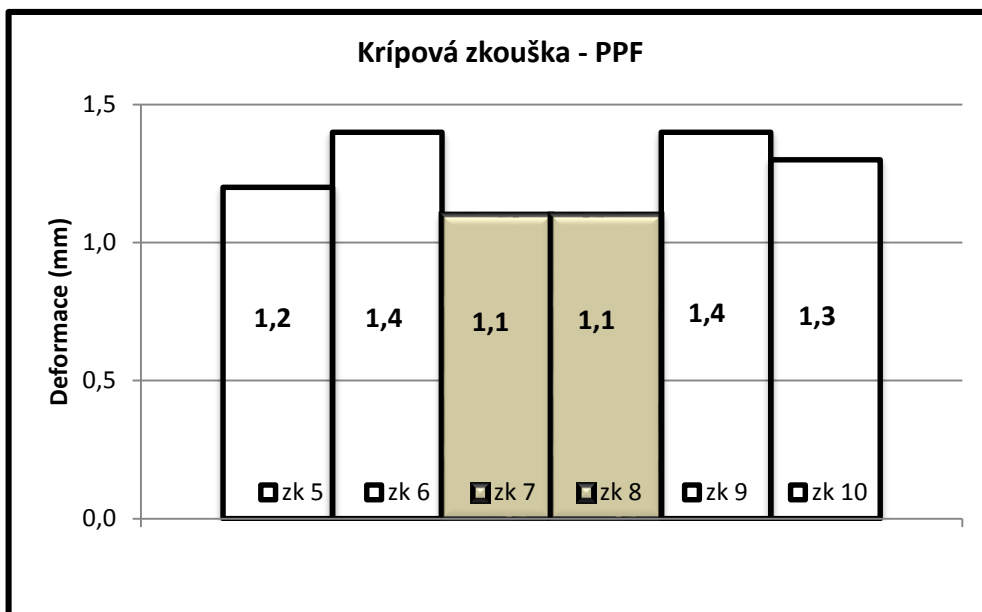
Výsledné hodnoty zaznamenaných poklesů napětí nejsou tak jednoznačné jako nárůst deformací u testů krípvých. Pokles napětí u vzorků fólií od původní hodnoty 2,8 N se dostává maximálně o 0,2 N níže. Větší propad je zaznamenán u vzorků laminátů a konkrétně u směsi 4 je pokles napětí z původních 8,4 N na 7,5 N. Větší pokles napětí zaznamenaný u vzorků laminátů, je předpokladem, že se budou méně vracet do svých původních stavů než vzorky fólií, ve kterých je stále po 24 hodinách více napětí.

### 5.3.2 Zkouškové směsi 5 až 10

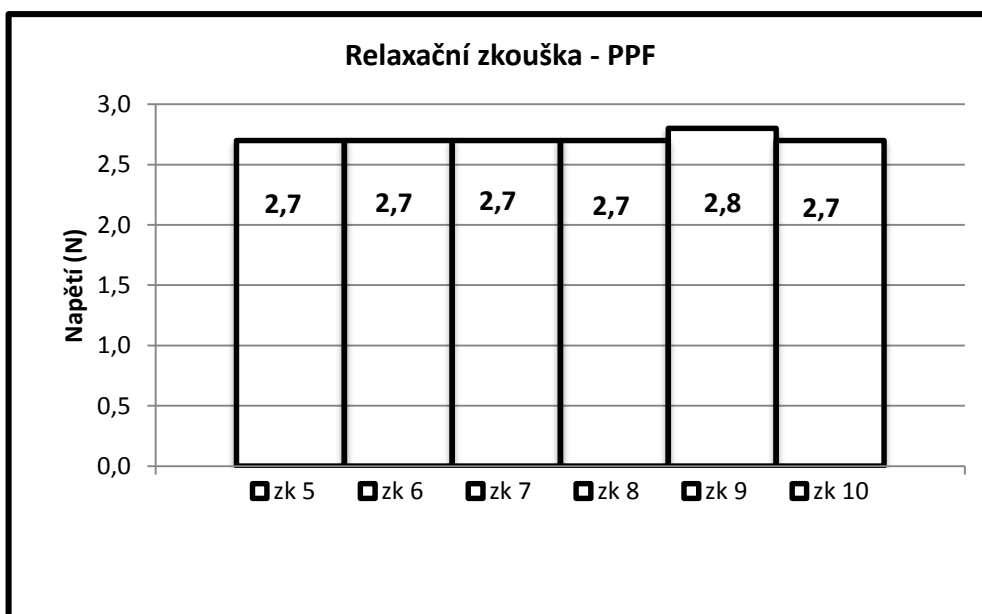
V níže uvedené tabulce 8 jsou uvedena výsledná naměřená data kríповé a relaxační zkoušky PPF a PPL pro zkouškové směsi 5 až 10, dále jsou opět uvedeny výsledné tabulkové hodnoty v grafické podobě pro lepší rozpoznání stabilnější směsi (graf 17 až 20).

Tabulka 8 – výsledná data kríповé a relaxační zkoušky pro směsi 5 až 10

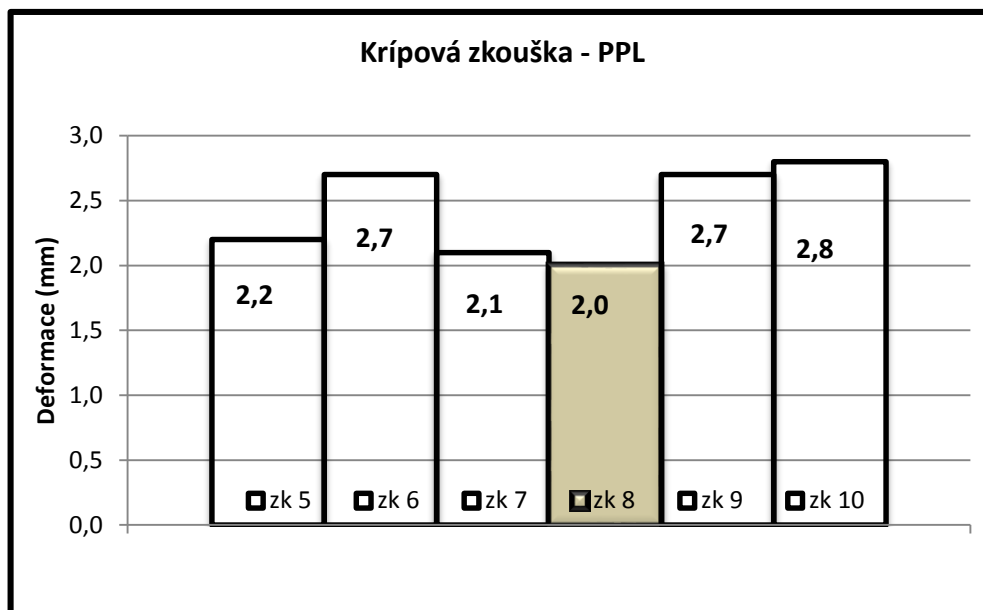
vzorek	PPF potisknutá na roli		PPL volně	
	$\gamma$ (mm)	$\sigma$ (N)	$\gamma$ (mm)	$\sigma$ (N)
zk 5	1,2	2,7	2,2	7,6
zk 6	1,4	2,7	2,7	7,1
zk 7	1,1	2,7	2,1	7,4
zk 8	1,1	2,7	2,0	7,2
zk 9	1,4	2,8	2,7	7,6
zk 10	1,3	2,7	2,8	7,5



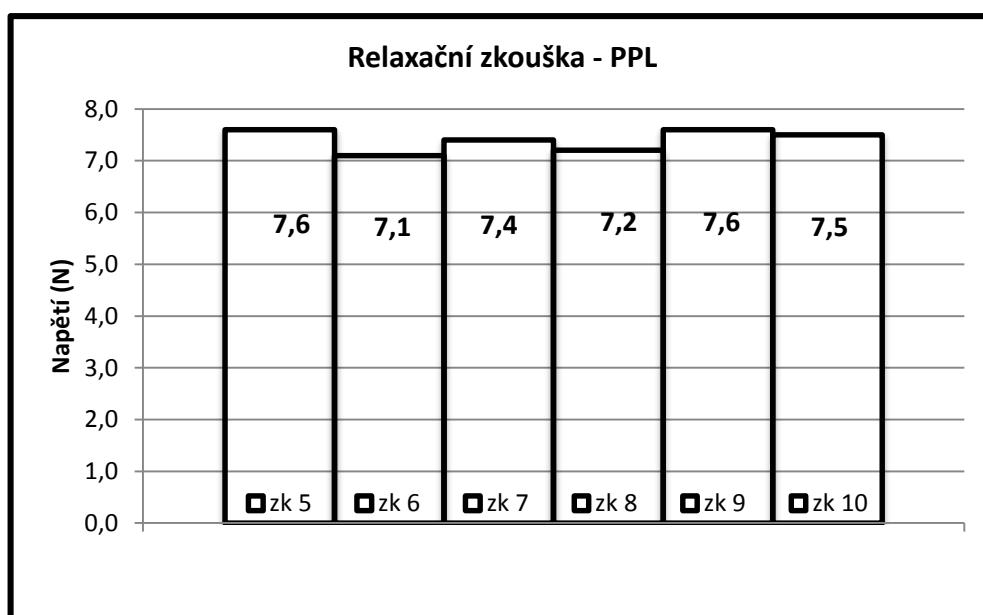
Graf 17 – křípová zkouška PPF navinutá na roli



Graf 18 – relaxační zkouška PPF navinutá na roli



Graf 19 – křípová zkouška PPL



Graf 20 – relaxační zkouška PPL



Druhou sadou měřených vzorků byly vzorky zkuškových směsí 5 až 10, které byly také podrobeny kríčovým a relaxačním testům za stejných podmínek a stejných předpokladů chování. Nejmenší a totožná deformace u PPF byla zaznamenána u směsí 7 a 8. Celé tendenci výsledků deformace PPF odpovídají i naměřené hodnoty deformací PPL. Srovnáním dat deformací PPF a PPL lze jako stabilnější směs vyhodnotit zkoušku 8. Z výsledných hodnot lze usoudit, že kompaund se zvýšenou tuhostí použitý pro směsi kategorie III. má pozitivní vliv na viskoelastické chování fólií s ohledem na stabilitu registračního tisku.

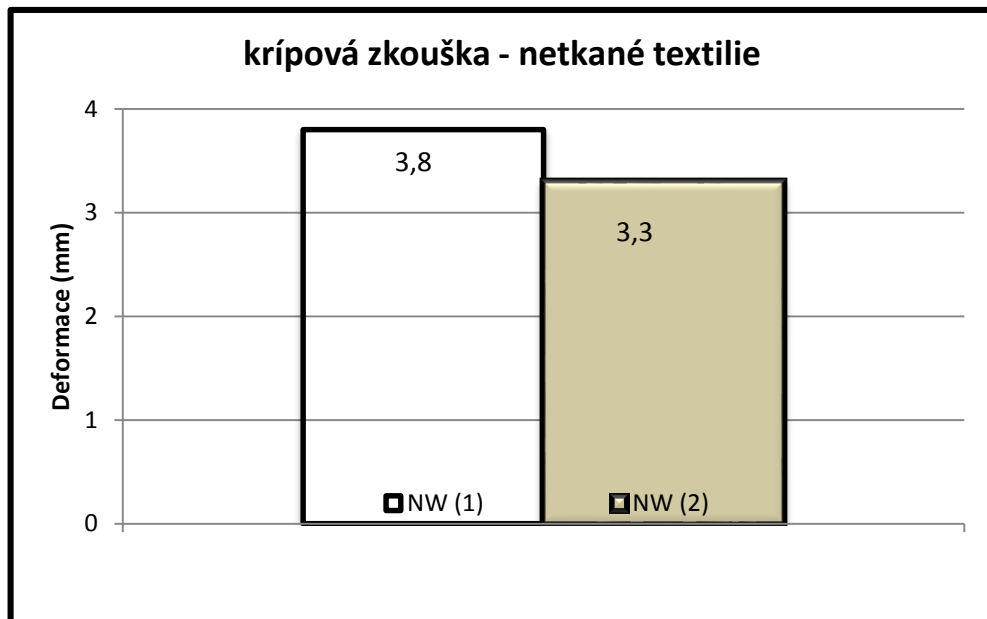
U druhé sady vzorků fólií nebyl zaznamenán výrazný pokles napětí – pouze 0,1 N. Napětí zůstává ve vzorcích a lze zde konstatovat, že fólie má tendenci se po natažení v roli vracet do svých původních stavů. U laminátů byly zaznamenány větší propady napětí, tedy menší tendence vracet se do výchozích stavů materiálů.

### 5.3.3 Netkané textilie

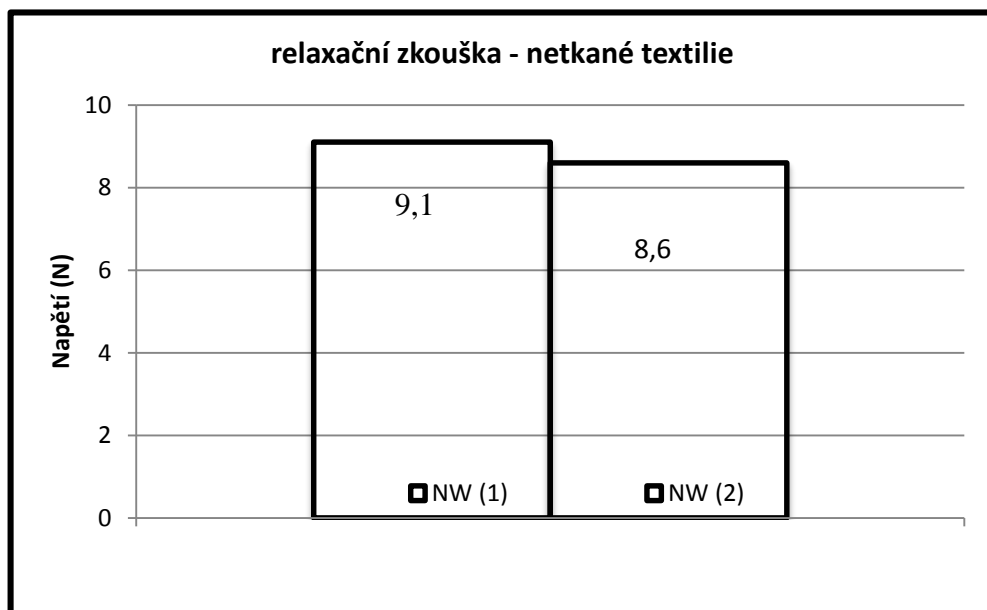
V tabulce 9 jsou zaznamenána data kríčově a relaxační zkoušky pro 2 vzorky netkaných textilií (NW) lišící se svou plošnou hmotností. Dále jsou uvedeny grafy 21 a 22 zaznamenávající výsledné hodnoty testů, podle kterých je menší deformace a vyšší relaxace napětí zaznamenána u netkané textilie s vyšší plošnou hmotností.

Tabulka 9 – výsledná data kríčově a relaxační zkoušky pro vzorky netkaných textilií

	$\gamma$ (mm)	$\sigma$ (N)
<b>NW (1) – nižší plošná hmotnost</b>	3,8	9,1
<b>NW (2) – vyšší plošná hmotnost</b>	3,3	8,6



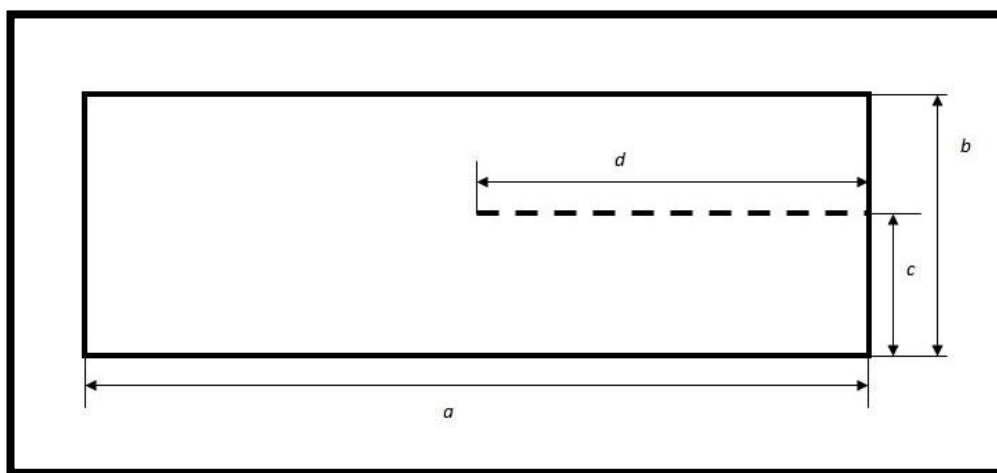
Graf 21 – kríповá zkouška netkaných textilií



Graf 22 – relaxační zkouška netkaných textilií

#### 5.4 Zkouška odolnosti proti trhání

Zkouška byla provedena na dvou vzorcích - síťované folii oproti nesíťované folii pro zjištění, zda síťování napomáhá zabezpečit vyšší odolnost proti trhání. Zastupujícím vzorkem nesíťované folie byl použit vzorek zkouškové směsi 1 bez potisku. Zesíťování folie bylo provedeno radiačním zářením. Geometrie vzorku, která byla při zkoušce použita, odpovídá obrázku 27 a konkrétní rozměry zkušebního tělesa jsou zaznamenány v tabulce 10.



Obrázek 27 – geometrie vzorku pro zkoušku odolnosti proti trhání

Tabulka 10 – rozměry zkušebního vzorku

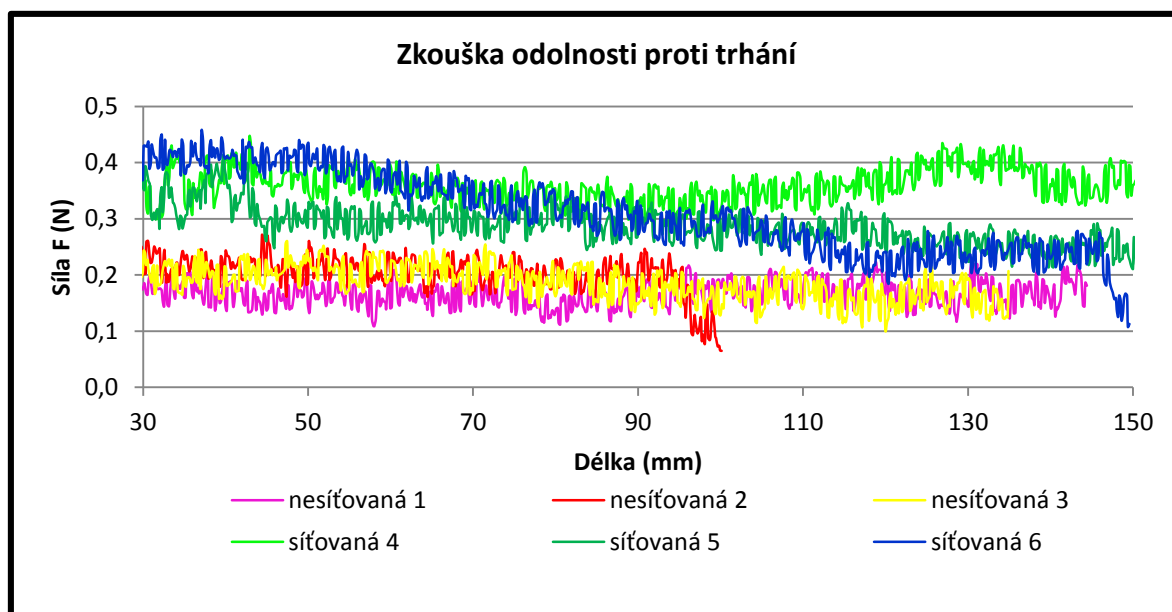
Strana	Rozměr (mm)
<i>a</i>	150
<i>b</i>	50
<i>c</i>	25
<i>d</i>	75

Po uchycení vzorku do čelistí trhacího stroje byl spuštěn test a byla zaznamenávána síla  $F$ , tzv. trhací síla potřebná k roztržení zkušebního tělesa. Hodnota odolnosti proti další-

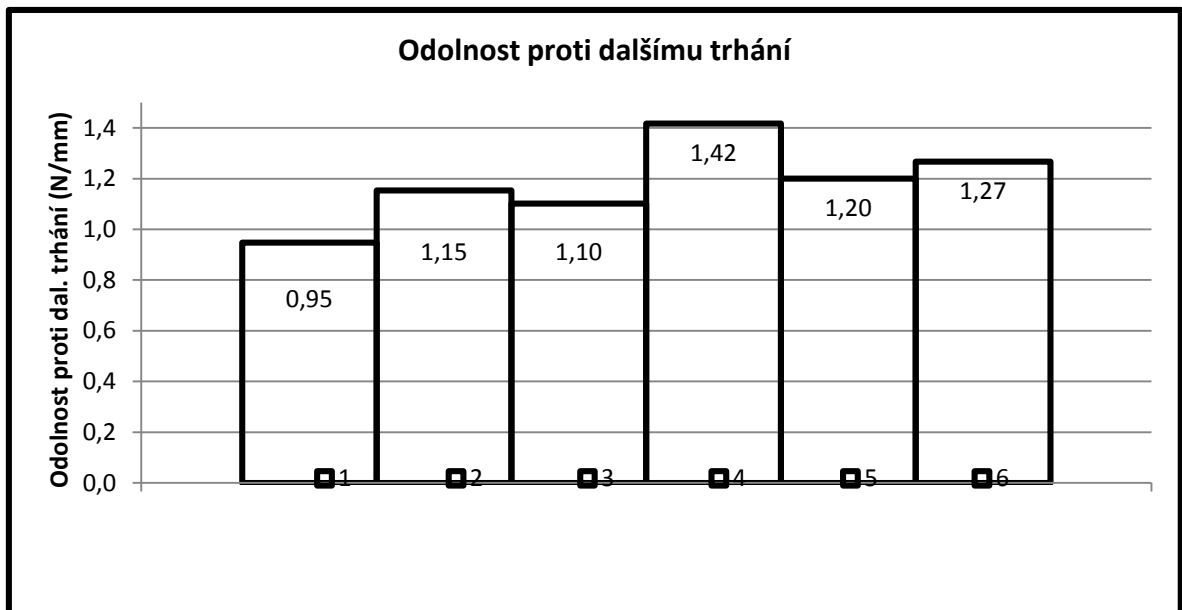
mu trhání se následně vyhodnotila jako poměr  $F/t$ , kde  $t$  je tloušťka vzorku. Test odolnosti proti trhání byl proveden 3x pro nesíťovanou i síťovanou folii. V tabulce 11 jsou zaznamenány průměrné hodnoty snímající síly po zanedbání prvních 30mm a posledních 5 mm od konce zářezu. Na grafu 23 jsou zaznamenána surová data snímající síly. Uvedeny jsou i výsledné poměry  $F/t$ , které jsou dále představeny i graficky (graf 24).

Tabulka 11 – výsledné hodnoty zkoušky odolnosti proti dalšímu trhání

	<b>F (N)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>F/t (N/mm)</b>
<b>1. nesíťovaná</b>	0,1611	0,17	0,95
<b>2. nesíťovaná</b>	0,2076	0,18	1,15
<b>3. nesíťovaná</b>	0,1872	0,17	1,10
<b>4. síťovaná</b>	0,3544	0,25	1,42
<b>5. síťovaná</b>	0,2692	0,23	1,20
<b>6. síťovaná</b>	0,3169	0,25	1,27



Graf 23 - surová data zkoušky odolnosti proti trhání



Graf 24 – výsledné hodnoty odolnosti proti trhání

Radiační síťování se u fólií provádí především z důvodu zvýšení jejich mechanické pevnosti. Po vyhodnocení zkoušky odolnosti proti dalšímu trhání je z výsledků zřejmé, že síťováním fólií bylo dosaženo vyšší pevnosti fólie. K roztržení vzorků bylo u síťovaných fólií zapotřebí vyšší síly. Ovšem radiačně síťovaná folie byla také podrobena kríčovému i relaxačnímu testu ( $\gamma = 0,8$  mm a  $\sigma = 2,6$  N) až po provedení doplňkového testu odolnosti proti trhání, ve kterém byla tato fólie srovnávána se směsí fólie zkoušky 1. Hodnota deformace radiačně síťované folie ale odpovídá deformaci zaznamenané u směsi 4. Proto v aplikačním uplatnění těchto testovaných fólií není síťování podstatným krokem vedoucím ke zvýšení pevnosti a stability fólií a lze jim dosáhnout pouze změnou receptury. Důležitým aspektem je i fakt, že síťované fólie už nelze recyklovat, což by mělo při vysoké spotřebě nemalý ekologický důsledek.

## 6 DISKUZE

Nalezením lineárních oblastí na tahových křivkách bylo potvrzeno, že napětí, pod kterými se výrobky ve společnosti výrobky navíjí, jsou v požadované oblasti viskoelastického chování. Podle Youngova modulu pružnosti v tahu, lze za nejpevnější materiály fólií považovat zkouškové směsi 4; 7 a 8. Nejinak je tomu i u naměřených modulů laminátů – nejpevnější lamináty jsou zkouškové směsi 4; 7; 8 a 10. Moduly laminátů jsou mnohem menší než moduly fólií a to z důvodu toho, že netkaná textilie v laminátu zvyšuje tloušťku, čímž se snižuje tahové napětí.

Křípové testy jsou jedny z viskoelastických testů, kterými se zjišťují mechanické vlastnosti materiálu. Testem je měřena deformace – v případě diplomové práce se jedná o deformaci v tahu za konstantního napětí. V první fázi testů, kdy byly testovány zkouškové směsi 1 až 4 a to ve všech typech dodaného materiálu (PPF nepotištěná, potištěná, v napnutém stavu na roli i PPL) je jednoznačně nejmenší deformace zaznamenána u receptury zkouškové směsi 4. V druhé fázi testů, kdy byly testovány zkouškové směsi 5 až 10, se jeví jako vhodné receptury směsi 7 a 8. U receptur směsi 7 a 8 PPF byla zaznamenána stejná hodnota deformace a to 1,1 mm. U PPL byla deformace těchto dvou směsí zaznamenána také velmi podobná a to 2,1 mm pro zkoušku 7 a 2,0 mm pro zkoušku 8. Deformace receptury 4 pro PPL je velmi podobná zkouškovým směsím 7 a 8 a to 1,9 mm. Nejvhodnější směs z hlediska sledování deformace laminátového vzorku se jeví směsi 4; 7 a 8, což jsou zkouškové směsi kategorie II. a III. Křípovému testu byly podrobeny i dva vzorky netkaných textilií lišících se svou plošnou hmotností. Deformace menší o 0,5 mm byla zaznamenána u netkané textilie s vyšší plošnou hmotností. Což potvrzuje předchozí měření, že netkané textilie s vyšší plošnou hmotností zlepšují stabilitu směsi s ohledem na registrovaný tisk

Relaxační testy byly navazujícími testy na testy křípové, kdy se po 24 hodinách naměřené deformace, která byla následně na dalších 24 hodin brána jako konstantní, snímal pokles napětí. V první sérii testů nebyl zaznamenán rapidní rozdíl mezi jednotlivými zkouškovými směsmi 1 až 4. Při porovnání zkouškových směsí druhé série testů byl také zaznamenán malý rozdíl mezi poklesem napětí jednotlivých směsí. Rozdílné druhy compoundů nemají tedy výrazný vliv na relaxační experimenty. Nejstabilnější směs 8 vykazuje pokles napětí o 0,1 N. Z relaxačních testů lze tedy usoudit, že napětí zůstává ve foliích a tím mají

tendenci se vracet do svých původních stavů. U vzorků laminátů byly zaznamenány menší tendence vracet se do svých původních.

V rámci testů byla provedena i zkouška odolnosti proti dalšímu trhání, kdy byla porovnávána nesít'ovaná folie s radiačně sít'ovanou fólií, přičemž obě folie nebyly potisknuty. Výsledek testu poukazuje na fakt, že radiačně sít'ovaná fólie je mnohem pevnější, než fólie nesít'ovaná, protože byla zaznamenána vyšší síla potřebná k odtrhu dvou ramen vzorku, jak je ilustrováno na jeho geometrii. Radiační sít'ování ale nebude výrobcem začleněno do výrobního procesu a to z důvodu nutnosti zásahu do výrobní linky a kvůli následným problémům s recyklací fólie.

## ZÁVĚR

Polymerní fólie se staly důležitou součástí osobní hygieny a to z důvodů, že jsou vyráběny tak, aby mohly propouštět vodní páry a tím poskytovat uživateli jistý komfort a předcházet tak vzniku nepříjemných onemocnění kůže. Tato vlastnost se stala důležitá při výrobě jednorázových dětských plen. Předmětem této diplomové práce byly polotovary pro výrobu těchto produktů v oblasti dětské hygieny – paropropustné fólie (PPF) a lamináty (PPL).

Výrobce dodané PPF a PPL byly hodnoceny tahovými, kríčovými a relaxačními zkouškami. PPF, jsou potisknuty tzv. registrovaným tiskem. Registrovaný tisk představuje tisk motivu za pomoci značek na obou okrajích pásů fólií, jejichž vzdálenost výrobce garantuje. Dále je fólie laminována s netkanou textilií a následně je laminát polotovarem pro další laminaci a výrobu. Výrobci jednorázových hygienických prostředků zaznamenávají nedodržení garantované vzdálenosti registrovaných značek, což má za následek problémy s laminací dalších vrstev na laminačních linkách odběratelů. Proto výrobce požadoval nalezení nejvhodnější směsi z hlediska registrovaného tisku a proto byly prováděny především tahové zkoušky a viskoelastické testy (kríčovými a relaxačními), které jsou ukazateli mechanických vlastností materiálů.

V rámci práce bylo podrobena testům 10 zkuškových směsí (fólií i laminátů). Na základě laboratorních testů byly jako nejvhodnější směsi s ohledem na stabilitu registrovaného tisku vybrány zkušková směs 4 z kategorie II a směsi 7 a 8 z kategorie III. Společným znakem, který by poukazoval na to, jaké suroviny k výrobě fólií používat pro směs 7 a 8 je stejný použitý kompaund od téhož výrobce, který u výrobků zvyšuje jejich tuhost – tyto směsi byly navíc vyrobeny na stejné lince, přičemž tato výrobní linka odpovídá i tomu, že na ní byla vyrobena směs 4. Jelikož v první sadě vzorků byla u směsí 1 až 3 použita netkaná textilie o nižší plošné a pro směs 4, která z testů vychází jako velmi vhodná směs, netkaná textilie o vyšší plošné hmotnosti, lze pro výrobu laminátů doporučit netkanou textilií s vyšší plošnou hmotností.

Pro výrobu je tedy doporučeno použít netkanou textilií s vyšší plošnou hmotností a vytypovaný kompaund zvyšující tuhost výrobků.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] SPERLING, L. Introduction to physical polymer science. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001, xi, 671 s. ISBN 0471329215.
- [2] FELDMAN, Dorel. Polymer History. *Designed Monomers & Polymers*[online]. 2008, vol. 11, issue 1, s. 1-15 [cit. 2015-03-30]. DOI: 10.1163/156855508x292383.
- [3] YOUNG, Robert J a P LOVELL. Introduction to polymers. 3rd ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, c2011, xx, 668 s. ISBN 978-0-8493-3929-5.
- [4] CARRAHER, Charles E. Introduction to polymer chemistry. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, c2013, xxiv, 530 s. ISBN 978-1-4665-5494-8.
- [5] WHITE, James Lindsay a David D CHOI. Polyolefins: processing, structure development and properties. Munich: Hanser Publishers, c2005, xiii, 271 s. ISBN 1-56990-369-7.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymeric materials: structure, properties, applications. Munich: Hanser Publishers, c2001, xviii, 277 s. ISBN 1-56990-310-7.
- [7] KONG, Y a J.N. HAY. The measurement of the crystallinity of polymers by DSC. 2002. Dostupné z [www.elsevier.com/locate/polymer](http://www.elsevier.com/locate/polymer)
- [8] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987, 306 s.
- [9] KISSIN, Y. Polyethylene: end-use properties and their physical meaning. Munich: Hanser, c2013, xi, 140 s. ISBN 978-1-56990-520-3.
- [10] HALE, W.R., K.K. DOHRER, M.R. TANT a I.D. SAND. A diffusion model for water vapor transmission through microporous polyethylene/CaCO<sub>3</sub> films. 2001. Dostupné z: [www.elsevier.nl/locate/colsurfa](http://www.elsevier.nl/locate/colsurfa)
- [11] ROBESON, Lloyd M. Polymer blends: a comprehensive review. Munich: Hanser Publishers, c2007, xii, 459 s. ISBN 978-3-446-22569-5.

- [12] MANAS-ZLOCZOWER, Ica. Mixing and compounding of polymers: theory and practice. 2nd ed. Munich: Hanser Publishers, 2009, xxvii, 1158 s. ISBN 978-1-56990-424-4.
- [13] FRIED, Joel R. Polymer science and technology. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Professional Technical Reference, c2003, xvii, 582 s. ISBN 0130181684.
- [14] HANSEN, Charles M. Polymer additives and solubility parameters. Progress in Organic Coatings. 2004, vol. 51, issue 2, s. 109-112. DOI: 10.1016/j.porcoat.2004.05.003. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300944004001286>
- [15] ALMAADED, M. A., N. K. MADI, A. HODZIC a C. SOUTIS. Influence of additives on recycled polymer blends. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014, vol. 115, issue 1, s. 811-821. DOI: 10.1007/s10973-013-3224-y. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10973-013-3224-y>
- [16] BAIRD, Donald G a Dimitris I COLLIAS. Polymer processing: principles and design. New York: Wiley, c1998, viii, 346 s. ISBN 0-471-25453-3.
- [17] CHAN, Ch., J. WU, J. LI a Y. CHEUNG. Polypropylene/calcium carbonate nano composites. 2002. Dostupné z: [www.elsevier.com/locate/polymer](http://www.elsevier.com/locate/polymer)
- [28] WU, P.C., G. JONES, Ch. SHELLEY a B. WOELFLI. Novel microporous films and their composites. *Journal of engineered fibers and fabrics*. Cary, N.C.: INDA, TAPPI, the Fiber Society, and AATCC, 2007, č. 1. Dostupné z:  
[www.jeffjournal.org](http://www.jeffjournal.org)
- [39] MUELLER, Ch., V. TOPOLKARAEV, D. SOERENS, A. HILTNER a E. BAER. Breathable polymer films produced by the microlayer coextrusion process. *Journal of applied polymer science*. New York: Wiley, 2000.

- [20] *Felix plastic: Breatheble films* [online]. 2009 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.felixplastic.com/asp/films1.asp>
- [21] ELSASSER, Virginia Hencken. *Textiles: concepts and principles*. 3rd ed. New York: Fairchild Books, c2010, xi, 340 s. ISBN 978-1-56367-844-8.
- [22] MEIJER, Han E.H. a Leon E. GOVAERT. Mechanical performance of polymer systems: The relation between structure and properties. *Progress in Polymer Science*. 2005, vol. 30, 8-9, s. 915-938. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2005.06.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670005000717>
- [23] LIN, Y. *Polymer viscoelasticity: basics, molecular theories, experiments and simulations*. 2nd ed. New Jersey: World Scientific, c2011, xviii, 422 s.: ISBN 978-981-4313-03-2.
- [24] BANDULASENA, H C Hemaka, William B ZIMMERMAN a Julia M REES. An inverse method for rheometry of power-law fluids: The relation between structure and properties. *Measurement Science and Technology*. 2011-12-01, vol. 22, issue 12, s. 125402-. DOI: 10.1088/0957-0233/22/12/125402. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/09570233/22/i=12/a=125402?key=crossref.c35957685cfcfde06d8ebc368b842bd1>
- [25] WILKINSON, Arthur N a Anthony J RYAN. *Polymer processing and structure development*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998, ix, 577 s. ISBN 0-7514-0363-6.
- [26] BELL, D. *Non-Newtonian fluids* [online]. Great Britain, 1979 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.iopscience.iop.org>
- [27] BONNET, Marc a Andrei CONSTANTINESCU. Inverse problems in elasticity. *Inverse Problems*. 2005-04-01, vol. 21, issue 2, R1-R50. DOI: 10.1088/0266-5611/21/2/R01. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0266-5611/21/i=2/a=R01?key=crossref.bba85b522a27b076dd96d50bff83e189>

- [28] Ústav fyziky a materiálového inženýrství. [online]. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=fyzika\\_pol](http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=fyzika_pol)
- [29] VALLÉE, Marc a Andrei LERINTIU. Inverse problems in elasticity. *Inverse Problems*. 2005-04-01, vol. 21, issue 2, R1-R50. DOI: 10.1007/s10659-012-9403-4. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0266-5611/21/i=2/a=R01?key=crossref.bba85b522a27b076dd96d50bff83e189>
- [30] KUBÍK, Ľubomír, Stanislav ZEMAN, Jamal CHAOUFI, Danielle FORTUNÉ, Michael BAN a Kossi ATCHONOU GLO. Mechanical properties of polyethylene foils: n-Monotone Materials—Hooke's Law of Elasticity Revisited. *Journal of Central European Agriculture*. 2014, vol. 15, issue 1, s. 138-145. DOI: 10.5513/JCEA01/15.1.1425. Dostupné z: <http://jcea.agr.hr/volumes.php?search=Article:1425>
- [31] Ústav fyziky a materiálového inženýrství. [online]. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=kzm>
- [32] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER. Polymer testing. Cincinnati, Ohio: Hanser Gardner Publications, 2007, xxxii, 674 s. ISBN 978-1-56990-410-7.
- [33] BIER, James Michael, Casparus Johannes Reinhard VERBEEK, Mark Christopher LAY a De Wet VAN DER MERWE. Short-Term Viscoelastic Properties of Blood meal-Based Thermoplastics. *Advances in Polymer Technology*. 2014, vol. 33, issue 3, n/a-n/a. DOI: 10.1002/adv.21420. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adv.21420>
- [34] RUDIN, Alfred a Phillip CHOI. The elements of polymer science and engineering. 3rd ed. Waltham: Academic Press, c2013, xx, 563 s. ISBN 978-0-12-382178-2.
- [35] STOKLASA, Karel. Vlastnosti polymerních materiálů [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2007 [cit. 2015-04-08].

- [36] JUNG, Woo-Young a Amjad J AREF. A combined honeycomb and solid viscoelastic material for structural damping applications. *Mechanics of Materials*. 2003, vol. 35, issue 8, s. 831-844. DOI: 10.1016/S0167-6636(02)00210-7. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167663602002107>
- [37] SHAH, Vishu. *Handbook of plastics testing technology*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1998, xv, 527 s. ISBN 0471182028.
- [38] LOBO, Hubert a Jose V BONILLA. *Handbook of plastics analysis*. New York: Marcel Dekker, c2003, viii, 650 s. ISBN 0-8247-0708-7.
- [39] TRIKI, Ennouri, Patricia DOLEZ a Toan VU-KHANH. Tear resistance of woven textiles – Criterion and mechanisms. *Composites Part B: Engineering*. 2011, vol. 42, issue 7, s. 1851-1859. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.06.015. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836811002770>
- [40] CHANG, A. C., T. INGE, L. TAU, A. HILTNER, E. BAER a Q. FAN. Tear strength of ductile polyolefin films. *Polymer Engineering* [online]. 2002, vol. 42, issue 11, s. 341-362 [cit. 2015-04-08]. DOI: 10.1533/9781845695552.2.341.
- [41] BROWN, Roger. *Handbook of polymer testing: physical methods*. 1. ed. New York: Dekker, 1999, iii-ix, 845 s. ISBN 0824701712.
- [42] ANDREASSON, Eskil, Nasir MEHMOOD a Sharon KAO-WATER. Trouser tear tests of two thin polymer films. [online]. 2013 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://www.bth.se/fou/>
- [43] ISO 6383-1. *Plasty, folie a desky – Stanovení odolnosti proti dalšímu trhání: 1 – Zkušební metoda trouser*. 1983
- [44] NIELSEN, Lawrence E a Robert F LANDEL. *Mechanical properties of polymers and composites*. 2nd ed., revised and expanded. New York: Marcel Dekker, 1994, xiii, 557 s. ISBN 0-8247-8964-4.
- [45] MATSUOKA, Shiro. *Relaxation phenomena in polymers*. Munich: Hanser, 1992, 322 s., ISBN 3-446-17111-8.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

°C	stupeň Celsia
atm	Atmosféra
CaCO <sub>3</sub>	uhličitan vápenatý
N	Newton
NW	Netkaná textilie
mm	Milimetr
g/mol	gram na mol
PE	Polyetylen
PET	Polyetylen tereftalát
PPF	Paropropustná folie
PPL	Paropropustný laminát
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
UV	Ultrafialové záření

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 – skeletální struktura makromolekuly – (a) lineární, (b) cyklická, (c) rozvětvená a (d) zesíťovaná [3] .....	14
Obrázek 2 – skeletální struktura makromolekuly – (a) dendrimer a (b) vysoce větvený polymer [3] .....	14
Obrázek 3 – struktura PE [1] .....	15
Obrázek 4 – „Pineapple mixer“ [12] .....	18
Obrázek 5 – „Egan mixer“ [12] .....	18
Obrázek 6 – kvalita distributivní a disperzního míchání [16] .....	19
Obrázek 7 – SEM snímky mikroporezní paropropustné fólie .....	20
Obrázek 8 – příklad struktury paropropustného laminátu [20] .....	21
Obrázek 9 – jednoduchý smykový tok [23] .....	23
Obrázek 10 – Newtonská (1), pseudoplastická (2) a diletantní kapalina (3) [26] .....	25
Obrázek 11 – napjatost v objemovém elementu [28] .....	26
Obrázek 12 – původní těleso (a) a těleso po deformaci tahem (b) [31] .....	27
Obrázek 13 – typy deformačního namáhání [31] .....	28
Obrázek 14 – Hookův (a) a Newtonův element (b) [33] .....	29
Obrázek 15 – Maxwellův (a) a Kelvinův model (b) [33] .....	29
Obrázek 16 – zevšeobecněný Maxwellův model [36] .....	30
Obrázek 17 – obecná tahová křivka [31] .....	32
Obrázek 18 – geometrie vzorku podle normy ISO 6383-1[43] .....	34
Obrázek 19 – závislost napětí na čase při kríčovém testu [28] .....	37
Obrázek 20 – deformační odezva viskoelastického materiálu [28] .....	37
Obrázek 21 – časová závislost deformace během relaxačního testu [28] .....	38
Obrázek 22 – napěťová odezva viskoelastického materiálu [28] .....	40
Obrázek 23 – směr odvíjení PPF a PPL po laminaci .....	43
Obrázek 24 - vzdálenost registrovaných značek .....	45
Obrázek 25 - vzorek PPL připravený k testování .....	47
Obrázek 26 – uchycení vzorku v čelistech trhacího stroje .....	48
Obrázek 27 – geometrie vzorku pro zkoušku odolnosti proti trhání .....	67

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 – rozdělení PE podle hustoty a stupně krystalinity.....	16
Tabulka 2 – okrajové podmínky Maxwellova modelu .....	36
Tabulka 3 - okrajové podmínky Maxwellova modelu.....	39
Tabulka 4 – kategorie zkouškových směsí .....	44
Tabulka 5 – sada vzorků .....	45
Tabulka 6 – vyhodnocení tahové zkoušky pro vzorky PPF a PPL.....	53
Tabulka 7 – výsledná data kríповé a relaxační zkoušky pro směsi 1 až 4 .....	56
Tabulka 8 – výsledná data kríповé a relaxační zkoušky pro směsi 5 až 10 .....	62
Tabulka 9 – výsledná data kríповé a relaxační zkoušky pro vzorky netkaných textilií .....	65
Tabulka 10 – rozměry zkušebního vzorku.....	67
Tabulka 11 – výsledné hodnoty zkoušky odolnosti proti dalšímu trhání .....	68



**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1 – zkouška č. 8 PPL jako nejvíce stabilní směs na měřený raport.....	50
Graf 2 – zkouška č. 1 PPL jako nejméně stabilní směs s ohledem na měřený raport .....	50
Graf 3 – ověření lineárního viskoelastického chování v oblasti 2,8 N pro PPF.....	52
Graf 4 – ověření lineárního viskoelastického chování v oblasti 8,4 N pro PPL.....	52
Graf 5 – srovnání Youngova modulu pro všechny zkouškové směsi PPF .....	54
Graf 6 – srovnání Youngova modulu pro všechny zkouškové směsi PPL.....	54
Graf 7 – srovnání mezi pevnosti zkouškových směsí PPF .....	55
Graf 8 – srovnání mezi pevnosti zkouškových směsí PPL.....	55
Graf 9 – kríповá zkouška - PPF bez potisku .....	57
Graf 10 – relaxační zkouška PPF bez potisku .....	57
Graf 11 – kríповá zkouška PPF potisknuté .....	58
Graf 12 – relaxační zkouška PPF potisknuté .....	58
Graf 13 – kríповá zkouška PPF navinuté na roli .....	59
Graf 14 – relaxační zkouška PPF navinuté na roli.....	59
Graf 15 – kríповá zkouška PPL.....	60
Graf 16 – relaxační zkouška PPL .....	60
Graf 17 – kríповá zkouška PPF navinutá na roli .....	63
Graf 18 – relaxační zkouška PPF navinutá na roli.....	63
Graf 19 – kríповá zkouška PPL.....	64
Graf 20 – relaxační zkouška PPL .....	64
Graf 21 – kríповá zkouška netkaných textilií.....	66
Graf 22 – relaxační zkouška netkaných textilií .....	66
Graf 23 - surová data zkoušky odolnosti proti trhání .....	68
Graf 24 – výsledné hodnoty odolnosti proti trhání .....	69